



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

USO DE EXPLOSIVOS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL

ING. FEDERICO ALCARÁZ LOZANO

USO DE EXPLOSIVOS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL

A.C.

Sociedad

USO DE EMPLOJOS EN OBRAS DE INGENIERIA CIVIL



FACULTAD INGENIERIA

Apunte
82-B

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



612288

G.- 612288

© Derechos Reservados 1997

Fundación ICA, A.C.
Av. del Parque 91
Colonia Nápoles
03810 México D.F.
Tel. 669 3985, 272 9991 ext 4270- 4271
ISBN 968 7508 37-X

Sociedad Mexicana de Mécanica de Rocas, A.C.
Camino a Santa Teresa 187.
Bosques del Pedregal.
14020 México, D.F.

G.- 612288

PRESENTACIÓN

El uso de los explosivos en nuestro país, adquiere importancia en las operaciones mineras desde la época colonial con la extracción de minerales; primero se explotaron las porciones superficiales en tajos, zanjas o pequeños túneles, la profundidad aprovechable estaba limitada por las condiciones de la roca y por lo rudimentario de los equipos y herramientas disponibles en esa época; posteriormente con la introducción de los explosivos se realizaron excavaciones más profundas, en rocas duras y resistentes, para extraer de la tierra su riqueza, con este método la producción extractiva se incremento y se fueron acumulando conocimientos empíricos sobre la explotación de las masas de roca y sobre el comportamiento de la roca ante la energía liberada con la acción de los explosivos.

Con la modernización de México y los avances tecnológicos se incremento la utilización de los explosivos, extendiéndose su aplicación a otras actividades, como excavación de taludes y túneles para ferrocarril o carreteras, así como para conducción de agua; excavación de socavones, galerías, túneles y cavernas de centrales hidroeléctricas; en ocasiones se aplican en las proximidades de otras obras, como en la demolición de edificios, o bien debajo de ellas, cuando se realizan túneles de conducción o de acceso dentro de las zonas urbanas. La utilización de explosivos en la construcción de obras requiere cada vez más de un riguroso control de calidad, experiencia y aplicación de las técnicas más modernas en voladuras; con el objetivo de garantizar la seguridad de quienes trabajan o transitan dentro de ellas o porque están instalados o transitan equipos muy costosos.

La **Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas** organizó una reunión sobre Uso de Explosivos en Obras de Ingeniería Civil con la participación de empresas productoras de explosivos de prestigio internacional y de especialistas con amplia experiencia en esta materia, con el objetivo de conocer nuevos productos y actualizarnos en las técnicas más recientes de aplicación. Los temas que se cubrieron fueron desde la historia de los explosivos, las normas de control, los diferentes tipos que existen así como su funcionamiento, el manejo de estos materiales, los sistemas de iniciación, el diseño de voladuras, efectos sobre estructuras, equipos de medición, los aspectos ambientales y casos especiales de aplicación que muestran las técnicas más actuales en el uso de los explosivos.

La **SMMR** espera que esa reunión haya cubierto los objetivos planteados como son el colaborar en la preparación y actualización de estudiantes, técnicos y profesionistas mexicanos que están o entrarán en contacto con esta disciplina y queda abierta la posibilidad de la continuación en una segunda parte que permita profundizar más en la interacción entre el uso de explosivo y el conocimiento de los macizos rocosos.

El presente libro es el resultado de esa reunión. La SMMR agradece al Comité de Publicaciones y al Consejo Directivo de la Fundación ICA, la aceptación de la temática de esta obra para ser publicada dentro de su programa editorial.

También la SMMR desea expresar su más sincero agradecimiento a quienes hicieron posible la realización de la reunión sobre uso de Explosivos en Obras de Ingeniería Civil. A los señores ingenieros Armando Real Rueda, Mario Benhumer León y Jorge Castañeda Maza quienes coordinaron la organización de la reunión. A los conferencistas y moderadores de las sesiones técnicas, así como a los empleados de explosivos patrocinadores de la reunión: ASA, DUPONT, EMUGEL, ICI e INSTANTEL.

Finalmente agradecemos a los ingenieros Magdaleno Martínez Govea y José Luis Garrido Uribe, así como a la srta. Nora León González la coordinación de los trabajos de compilación, captura y revisión de los documentos.

INDICE

CAPÍTULO 1.	HISTORIA	9
CAPÍTULO 2.	NORMATIVIDAD	15
CAPÍTULO 3.	FUNCIONAMIENTO, TIPOS Y CLASES DE EXPLOSIVOS	39
CAPÍTULO 4.	SISTEMA DE INICIACIÓN NO ELÉCTRICOS	53
CAPÍTULO 5.	MANEJO Y USO DE EXPLOSIVOS	83
CAPÍTULO 6.	DISEÑO DE VOLADURAS	109
CAPÍTULO 7.	RESULTADO DEL ESTUDIO DE MONITOREO SÍSMICO REALIZADO EN EL PROYECTO "MARIQUITA", SONORA Y SUS IMPLICACIONES EN EL GASODUCTO NACO-CANANEA-HERMOSILLO	147
CAPÍTULO 8.	VIBRATION MONITORING FOR CIVIL ENGINEERING	179
CAPÍTULO 9.	ASPECTOS AMBIENTALES	193
CAPÍTULO 10.	APLICACIONES	201
	¿QUIUBO, Q'ONDA TRAIS CARNAL? ¿CÓMO ANDAN ESAS VIBRAS?	239

1. HISTORIA

Fue en el siglo XVII cuando se realizaron los primeros trabajos verificados para voladuras de roca en las minas reales de Shcemnitz en Ober-Biberstollen, Hungría, y a pesar de las limitaciones existentes por el equipo deficiente de esa época, los altos costos de la pólvora y la mala calidad del producto, el uso de la pólvora negra en minería se extendió a las minas de Cornwall, Inglaterra.

Posteriormente se desarrollaron importantes avances tecnológicos tanto en países europeos como en los del nuevo mundo, destacándose personajes tales como Roger Bacon que escribió la fórmula de la **Pólvora negra en 1242**, Ascanio Sobrero que descubrió la **Nitroglicerina en 1846** y otros más como Alfredo Nobel (Figura 1), J.R. Glauber, el Dr. Watson, William Bickfordy Eleuthere Irene Dupont.

En la actualidad el procedimiento para aplicar las voladuras se ha transformado en una técnica basada en principios científicos, surgidos del conocimiento de las acciones ejercidas por los explosivos, de los mecanismos de rotura de la roca y de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos. Las aplicaciones se desarrollaron a partir del primitivo invento de la pólvora negra, pasaron por los días de apogeo de la utilización las dinamitas, hasta culminar en la era moderna con el uso extensivo de explosivos nuevos y más seguros.



Figura 1. Alfredo Nobel

1.1. CRONOLOGÍA DE LOS EXPLOSIVOS

Siglo XIII Primera mención del salitre en los escritos Abd-Allah quien lo llamó "nieve china".

1627 Se desarrolló la primera prueba documental del uso de la pólvora negra en las minas reales de Schemnitz en Ober-Biberstollen, Hungría.

1689 Se comenzó a utilizar la pólvora negra en las minas del estado de Cornwall, Inglaterra.

1696 Empleo de la pólvora negra en el sector de la construcción de caminos en Albulá Suiza.

1745 El Dr. Watson, de la Sociedad Real de Inglaterra, hizo explotar pólvora negra mediante una chispa eléctrica.

1750 Benjamin Franklin mejoró la demostración de Watson, comprimiendo la pólvora negra en un recipiente.

1804 Eleuthere Irenee DuPont inicia la producción comercial de la pólvora negra en Wilmington, Delaware, USA.

1830 El Dr. Robert Hare efectuó trabajos para provocar explosiones con mezcla de gases, para ello usó electricidad, conectando alambres incandescentes a una batería de alto amperaje que él llamó "deflagrador", considerándose ésta como la primera máquina explosora.

1831 William Bickfor enterado de estos métodos inseguros y peligrosos desarrolló y patentó "la mecha de seguridad de mineros", ésta consistía en un corazón continuo de pólvora negra fina envuelto en yute acordonado fuertemente y sumergido en barniz caliente para que quedara a prueba de agua.

1846 Ascanio Sobrero, profesor de la Universidad de Turín, Italia, descubre la "nitroglicerina"; en esa misma época Cristian Frederick Schoenbein, un profesor de la Universidad de Basel en Suiza, produjo un nitroalgodón pólvora.

La nitroglicerina causó mucha sorpresa, ya que este explosivo podía hacer muchas veces y mejor el trabajo de la pólvora negra, no sólo movía a la roca sino también la rompía.

1866 Alfredo Nobel mezcló nitroglicerina con diatomita para hacer dinamita. Un año más tarde, en 1867, él mismo no podía iniciar la dinamita en forma confiable con la mecha de seguridad de pólvora negra, por lo que después de realizar varios experimentos, Nobel resolvió el problema obteniendo el fulminato de mercurio en cápsulas de estaño (más tarde de cobre); logrando así un paso importante para el desarrollo de los explosivos modernos.

- 1867 Las propiedades explosivas del nitrato de amonio fueron formalmente utilizadas como "agente explosivo", su aplicación inicial fue la de reemplazar una porción de nitroglicerina para concluirse como un ingrediente en la dinamita.
- 1875 Alfredo Nobel descubre la "gelatina para voladura" al disolver nitrocelulosa en nitroglicerina, e introdujo la "dinamita gelatina".
- 1895 H. Julius Smith introdujo un tramo corto de mecha entre la carga de ignición del fulminante de la pólvora negra y la carga base. Este fue el origen de los estopines eléctricos de retardo.
- 1935 El nitrato de amonio con un sensibilizador era empacado en latas de metal para resistir el agua, un cebo de iniciación sensibilizado con TNT especial fue necesario para iniciar este producto relativamente insensible, pero con características de seguridad en el manejo, al no producir dolores de cabeza, así como su bajo costo.
- 1940 Con las investigaciones que realizó DuPont se generó un explosivo con nitrato de amonio, que no contenía nitroglicerina y consistía básicamente en nitrato de amonio-agua, un espesador y un sensibilizador. Estos productos no tuvieron auge inicialmente porque el mercado de entonces requería en su mayoría de productos de diámetro pequeño y no se contaba con un sensibilizador económico.

Dos explosiones desastrosas de buques cargados con nitrato de amonio, una en Grest, Francia y otra en Texas City, Texas, confirmaron su potencial explosivo, esto fomentó posteriormente el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación, principalmente en el proceso de producir pequeñas bolitas de nitrato de amonio que proporcionarían un producto de fácil manejo a granel.

Ya para los años 50, los combustibles usados al principio como el carbón fueron reemplazados por aceite, dando origen al moderno anfo.

- 1950 Con el desarrollo del equipo de perforación de diámetro grande, el requerimiento de sensibilidad para los hidrogeles no fue tan riguroso, de esta manera se abrió el camino para el desarrollo comercial de estos productos.

Las principales ventajas de los hidrogeles eran su economía, alta densidad de carga y desempeño, baja sensibilidad al impacto, ausencia de ingredientes que causan dolores de cabeza, y también su resistencia al agua.

En 1958, DuPont empieza la fabricación de hidrogeles empacados en bolsas, las primeras formulaciones no eran sensibles a fulminantes regulares y no se propagarían seguramente en barrenos de diámetro pequeño sin el uso de sensibilizadores explosivos.

Es en este mismo año cuando, en Mesabi Range, Minnesota, dicho producto es bombeado dentro de barrenos de diámetro grande usando camiones a granel.

Asimismo, se desarrollan conectores de retardo para cordón detonante, que proporcionan una demora bastante precisa del cordón detonante.

1969 DuPont patentó el sensibilizador que proporcionaría a los hidrogeles la sensibilidad requerida para ser iniciados con un fulminante de potencia 6, en cartuchos de 2,22 cm (7/8") de diámetro, a temperaturas normales.

1976 Se introducen fulminantes de retardo no eléctrico, los cuales proporcionaron mejoras en la regulación del orden de encendido y también redujeron en forma considerable los niveles de ruido, es en ésta época cuando se desarrollan también los explosivos emulsionados.

En el mercado actual de los explosivos no sólo se realizan amplias investigaciones, orientadas a obtener poderosas cargas de energía, que sirvan para construir un mundo moderno, con reglamentos gubernamentales más estrictos, inquietud pública en el ámbito de seguridad, ruido y vibraciones, sino también se investiga en productos que van siendo perfeccionados día a día en sus composiciones tanto químicas como físicas, con el objetivo primordial de encontrar la excelencia, en el renglón de seguridad, en el manejo y uso de explosivos, para todos y cada uno de los protagonistas en el desarrollo de las actividades constructivas y extractivas de un país como México.

2. NORMATIVIDAD

2.1. LEY FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS

La Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos (Ley) fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de enero de 1972. Las disposiciones de esta Ley se consideran de interés público.

La aplicación de la Ley corresponde a:

- a) El Presidente de la República;
- b) La Secretaría de Gobernación;
- c) La Secretaría de la Defensa Nacional y
- d) A las demás Autoridades Federales en los casos de su competencia.

La Ley consigna que las autoridades de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios tendrán la intervención que la Ley y su Reglamento señalen.

El control y vigilancia de las actividades y operaciones industriales y comerciales que se realicen con explosivos, artificios y sustancias químicas, será hecho por la Secretaría de la Defensa Nacional.

Por lo que se refiere a los explosivos, la Ley establece tres tipos de permisos a saber:

- a) Permisos Generales;
- b) Permisos Ordinarios; y
- c) Permisos Extraordinarios.

Los tres tipos de permisos que señala la Ley son de naturaleza intransferible. La Secretaría de la Defensa Nacional tiene la facultad discrecional de negar, suspender o cancelar los permisos mencionados, cuando a su juicio las actividades amparadas en los permisos puedan causar peligro a las personas, a las instalaciones o alterar la tranquilidad de la población.

Los Permisos Generales se concederán a personas que se dediquen de manera permanente a las actividades reguladas por la Ley, tendrán vigencia durante el año en que se expidan y podrán ser revalidados a juicio de la Secretaría de la Defensa Nacional.

Los permisos Ordinarios se otorgarán en cada caso para realizar operaciones mercantiles con personas que tengan permiso general vigente o con comerciantes de otros países.

Los Permisos Extraordinarios se otorgarán a personas que eventualmente se dediquen a alguna de las actividades reguladas por la Ley.

Las sociedades que pretendan dedicarse a la fabricación y comercialización de explosivos, podrán permitir en su capital una participación de hasta el 49% de inversión extranjera, en los términos que establece la Ley de Inversión Extranjera.

Este porcentaje de inversión extranjera no incluye a las sociedades que adquieran y utilicen explosivos para actividades industriales y extractivas.

La Secretaría de la Defensa Nacional, tiene la facultad de practicar visitas de inspección a las negociaciones que se dediquen a las actividades reguladas por la Ley y a solicitar los informes necesarios respecto de estas actividades.

Las negociaciones tienen la obligación de prestar todas las facilidades a las autoridades militares para la práctica de las visitas de inspección.

La Ley considera como sanciones la fabricación, almacenamiento, transporte, comercialización, entre otros, sin el permiso correspondiente.

2.2 PERMISOS DE EXPLOSIVOS

2.2.1 Información general

Si usted requiere el uso de explosivos para romper roca en cualquiera de sus obras, será necesario la obtención del permiso correspondiente de acuerdo a los requerimientos de la Dirección de Armas de Fuego y Explosivos de la Secretaría de la Defensa Nacional.

En el Anexo 1, se podrá observar copia del Oficio 17221, girado por C. General de Brigada DEM Jaime Palacios Guerrero, el 19 de junio de 1991 a esta Cámara, donde nos proporciona los tipos de permisos que existen y los requisitos a cumplir para la obtención de los mismos.

2.2.2 Detalle del procedimiento.

2.2.2.1 Polvorines

El constructor que requiera el uso de productos explosivos por necesidad de su operación deberá construir polvorines que reúnan las características solicitadas por la Secretaría de la Defensa Nacional a través de la Dirección de Armas de Fuego y Explosivos, siendo éstas las siguientes:

2.2.2.2 Lugar

Los polvorines deberán ser colocados de acuerdo a la tabla (B-1) de Seguridad de Distancia-Cantidad que viene en el reglamento de Armas de Fuego y Explosivos de los Secretaría de la Defensa Nacional, la cual se puede observar en el Anexo 2.

2.2.2.3 Capacidad

La capacidad de los polvorines deberá estar en función de las necesidades del usuario y a la autorización de la Secretaría de la Defensa Nacional.

En este caso se recomienda que la capacidad deba ser calculada de acuerdo a los consumos diarios de explosivos, al tiempo que se requiera para la obtención de los permisos para compra. Se debe tomar en cuenta la ubicación de la Zona Militar a cuya jurisdicción corresponda la obra.

Otro concepto que se debe tomar en cuenta es la ubicación de los proveedores y el tiempo de entrega de los productos una vez que se cuente con el permiso para compra de los mismos.

Todo lo antes mencionado es con el propósito de que el usuario tenga en sus polvorines la cantidad de inventarios que le permitan mantenerse en operación evitando paros por falta de productos explosivos. Estos inventarios pueden ser para la operación de una semana, dos semanas o en algunos casos para un mes normal de operación.

2.2.2.4 Almacenamiento.

Antes de iniciar el almacenamiento de explosivos en un polvorín, se debe obtener el permiso correspondiente de parte de la Secretaría de la Defensa Nacional.

El almacenamiento de productos explosivos deberán ser de acuerdo a la tabla de compatibilidad para materiales empacados o envasados que vienen en el Manual de Armas de Fuego y Explosivos de la Secretaría de la Defensa Nacional. Esta tabla se puede ver en el Anexo 3.

Ejemplo

- Agente explosivo = Alto explosivo (godyne, emulsión, etc.)
- (anfos)
- Estopín eléctrico = Fulminantes
- Mecha Clover = Cordones detonantes

2.2.2.5 Construcción

Es recomendable hacer la construcción de los polvorines de la siguiente manera:

Cimentación: De mampostería (piedra braza)

Muros: Tabicón cemento-arena o tabique, reforzado con castillos a cada tres metros de distancia, de 15 x 15 cm. de concreto armado.

Puertas: Deberán ser de madera de 10.16 cm (4") de grueso con bastidor de metal (tanto en la base del soporte como en todo el perímetro de la puerta). En el Anexo 5 se ve el detalle de una puerta.

2.2.2.6 Techo

Altura máxima de 4 m, altura mínima a las orillas de 2,70 m, dejando respiradero entre la pared y el techo de 20 cm, el cual deberá ser protegido con algún tipo de malla metálica, para evitar que animales pequeños se introduzcan al polvorín. El material utilizado deberá ser de lámina de asbesto.

La parte más baja entre el techo y el piso deberá ser de 2,7 m de altura como se muestra en el Anexo 4. Los polvorines podrán tener un techo a una o dos aguas.

2.2.2.7 Farallón

El polvorín deberá estar rodeado por la corteza de algún cerro o en su defecto deberá contar con un farallón de tres metros de altura y 15 m de largo hasta terminar a flor de tierra y teniendo entre el frente del polvorín a farallón cinco o seis metros como mínimo.

2.2.3 Características que deben reunir los polvorines

En general éstos deberán cumplir con las especificaciones complementarias que se muestran en el Anexo 4.

En el caso de la construcción de polvorines se sugiere hacer el diseño de acuerdo a las necesidades de su operación, asesorándose con personal experimentado en este campo.

Una vez que se cuenta con los polvorines, contruidos de acuerdo a las tablas de distancias de seguridad de la Secretaría de la Defensa Nacional, es necesario conseguir las autorizaciones por parte de las autoridades correspondientes como son:

1. Certificado del lugar de consumo expedido por la primera autoridad administrativa, Presidente Municipal o Delegado Político en el Distrito Federal. Modelo No.4, Anexo 6.

2. Opinión favorable del Gobernador del Estado o del Jefe del Departamento del Distrito Federal firmada por el titular (Anexo 7). Esta opinión se debe solicitar por escrito acompañada por el certificado del lugar de consumo expedido por la primera autoridad administrativa (Punto 1).

3. Cuando se cuente con las autorizaciones antes mencionadas, los documentos originales se deben adjuntar a la siguiente documentación que deberá ser presentada en los módulos correspondientes en el edificio de la Secretaría de la Defensa Nacional, en Lomas de Sotelo, D.F., siendo estos los siguientes:

Solicitud, modelo anexo que se proporciona gratuitamente, Anexo 8.

Referencias del lugar de consumo, se proporcionan en el Anexo 9.

Para personas físicas, copia certificada del Registro Civil del Acta de Nacimiento del solicitante.

Para personas morales, Acta Constitutiva de la empresa.

Plano de conjunto a 1 000 metros alrededor del lugar de consumo y a escala de 1:4000, en la que figuran en su caso; instalaciones militares, vías de comunicación, líneas eléctricas, telefónicas, telegráficas, acueductos, gasoductos, construcciones para casa-habitación, obras de arte, zonas arqueológicas, históricas o instalaciones industriales, que pudieran ser afectadas, con los principales accidentes topográficos, Ejemplo (Anexo 10).

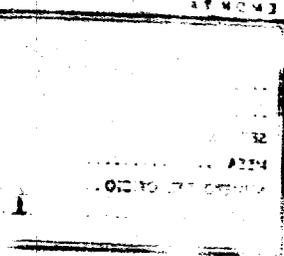
Plano circunstanciado a escala adecuada para la localización de sus instalaciones con especificaciones. Si la solicitud incluye almacenamiento

Certificado de seguridad y referencia de los polvorines, modelos anexos que proporcionan gratuitamente (modelo 2, anexo 11)

Se recomienda adquirir el Manual de Armas de Fuego y Explosivos de la Secretaría de la Defensa Nacional.



SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL DIR. GNAL. R.L.G. FED. ARMAS FGO Y EXP.



EMENDATA	
ANEXO No. 1	
DEPENDENCIA	DIRECCION GENERAL DEL REGISTRO FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS
SECCION	TECNICA DE EXPLOSIVOS
MESA	TRAMITE
NUMERO DEL OFICIO	17221
EXPEDIENTE	

ASUNTO: Se le informan los requisitos para la obtención de Permisos para el uso de explosivos.

Lomas de Sotelo, D.F., a 19 de junio de 1991.

C. PRESIDENTE DE LA CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION. ALBORADA NUMERO 100. COL. PARQUES DEL PEDREGAL. 14017 - MEXICO, D.F.

POR ACUERDO DEL C. GENERAL SECRETARIO DE LA DEFENSA NACIONAL, se le manifiesta a usted, que debido a la desinformación que los diversos organismos tienen acerca de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos y los requisitos que deben cumplir las personas físicas y morales para el otorgamiento de los Permisos para el uso de explosivos, se le informan los requisitos que la legislación vigente solicita.

- I. PERMISO GENERAL.- Para actividades permanentes.
- II. PERMISO EXTRAORDINARIO.- Para Actividades Eventuales (Por unica vez).
- III. PERMISO ORDINARIO.- Para comercialización entre empresas o particulares con Permiso General Vigente (Incluyendo Importaciones y Exportaciones).

Los requisitos para la obtención de ellos son:

- Solicitud, modelo anexo que se proporciona gratuitamente.
- Opinión Favorable del Gobernador del Estado o del Jefe del Departamento del Distrito Federal firmada por el titular.
- Certificado del lugar de consumo expedido por la primera autoridad administrativa (Presidente Municipal o Delegado Político en el Distrito Federal).
- Referencias del lugar de consumo, anexos que también se proporcionan.
- Para Personas Físicas, copia certificada del registro civil del acta de nacimiento del solicitante.

A la hoja número dos.

AL CONTESTAR ESTE OFICIO CITARME, LOS OTROS CONTENIDOS EN EL CUAL DEL ANGULO SUPERIOR DERECHO



SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL DEL GRAL REG FED ARMAS FGO Y EXP.

EMONTA
DEPENDENCIA... DIRECCION GENERAL DEL REGISTRO FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS
SECCION... TECNICA DE EXPLOSIVOS
TRAMITE
NUMERO DEL OFICIO... 17221
EXPEDIENTE...

ASUNTO: HOJA NUMERO DOS.

- Para Personas Morales, Acta Constitutiva de la empresa.
- Plano de conjunto a 1000 metros alrededor del lugar de consumo y a escala de 1:4000, en que figurarán en su caso: instalaciones militares, vías de comunicación, líneas eléctricas, telefónicas, telegráficas, acueductos, gasoductos, construcciones para casa-habitación, obras de arte, zonas arqueológicas, históricas o instalaciones industriales, que pudieran ser afectadas, con los principales accidentes topográficos.
- Plano circunstanciado a escala adecuada para la localización de sus instalaciones con especificaciones.

Si la solicitud incluye almacenamiento.

- Certificado de seguridad y Referencias de los polvorines, modelos anexos que se proporcionan gratuitamente.

Entregados los documentos debidamente requisitados y que la zona militar correspondiente haya inspeccionado que reúnen las medidas de control, seguridad y vigilancia para el uso de explosivos, esta Secretaría, si están completos y correctos los documentos, normalmente entrega los Permisos a quienes los hayan solicitado, en un plazo no mayor de 10 días hábiles.

Por lo anterior, se le agradecerá hacerlo del conocimiento de sus agremiados; enfatizando que la tardanza es la obtención de los documentos que son expedidos en otras dependencias.

SUFRAGIO EFECTIVO. NO REELECCION.
EL DIRECTOR.

GENERAL BALACLOS GUERRERO.

AL PRESENTAR ESTE OFICIO QUIERE...
LUGAR...
DIRECCION SUPERIOR DE FUEGO...

AAA-A'IV-552.

ANEXO No. 2

SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE REGISTRO Y CONTROL DE ARMAS DE
FUEGO Y EXPLOSIVOS
Lomas de Sotelo, D.F.

Tabla (13-1) de Seguridad de Distancia-Cantidad
(Materiales debidamente empacados o envasados)

Descripción del material	DISTANCIAS EN METROS		POLVORINES CON PROTECCION				
	Kilos De	a	Edificios habitados	Vías férreas	Caminos carreteras	Lineas de alta tensión	Entre polvorines
1. Dinamita, explosivos al nitrato de amonio, pólvoras negra y sin humo.	000	500	126	100	100	100	11
	500	750	146	100	100	100	13
	750	1,000	160	100	100	100	14
	1,000	1,250	170	100	100	100	15
	1,250	1,500	180	100	100	100	17
	1,500	2,000	200	100	100	100	18
	2,000	3,000	230	100	100	100	20
	3,000	4,000	250	100	100	100	23
	4,000	5,000	260	110	100	100	25
	5,000	6,000	270	117	100	100	26
2. Artificios (fulminantes, estopines, conectores MS, coroon acetante, etc.)	6,000	7,000	275	122	100	100	27
	7,000	8,000	285	127	100	100	28
	8,000	9,000	295	132	100	100	30
	9,000	10,000	305	137	100	100	31
	10,000	12,000	330	148	100	100	33
	12,000	14,000	350	154	105	103	35
	14,000	16,000	370	160	110	105	36
	16,000	18,000	390	168	116	112	38
	18,000	20,000	405	173	121	118	39
	20,000	25,000	445	185	135	130	43
3. Por lo que respecta a los "artificios", únicamente se autoriza el almacenamiento en cada polvorin lo equivalente a 4 toneladas.	25,000	30,000	480	200	145	140	46
	30,000	35,000	510	208	155	150	49
	35,000	40,000	535	218	160	155	53
	40,000	45,000	550	226	166	162	56
	45,000	50,000	565	240	169	166	63
	50,000	60,000	575	250	171	168	66
	60,000	70,000	585	262	175	172	73
	70,000	80,000	605	274	182	178	80
	80,000	90,000	620	284	186	183	86
	90,000	100,000	635	294	191	188	93
4. Nitrocelulosa (30-70) ó sea 30 partes en peso del solvente por 70 partes del producto, con una nitración de 12.2% como máximo. Cloratos, fósforos, etc.	100,000	125,000	675	378	210	208	117
	000	500	115	100	100	100	10
	500	750	135	100	100	100	12
	750	1,000	145	100	100	100	14
	1,000	5,000	235	100	100	100	23
	5,000	25,000	400	170	122	120	40
	25,000	50,000	500	215	156	150	50
	50,000	75,000	535	242	165	160	70
75,000	100,000	570	275	170	166	85	
100,000	125,000	607	340	190	188	110	

2.4 C A

SECCION DE LA PRESENTA TABLA
DEPARTAMENTO DE

5	Trinitrotolueno, ciclonita, fulminatos, picratos, etc.	000	500	152	125	125	125	15
		500	750	175	135	135	135	20
		750	1,000	192	150	150	145	25
		1,000	5,000	312	165	165	160	35
		5,000	25,000	530	222	180	175	50
		25,000	50,000	675	283	200	200	75
6	Artificios pirotécnicos.	000	500	100	100	100	50	35
		500	1,000	160	160	160	100	45
A.	Fabricantes.	1,000	5,000	200	200	200	150	55
		5,000	10,000	250	250	250	200	65

7. Artificios pirotécnicos. A. La cantidad de artificios pirotécnicos que puedan tener en existencia es de 50 gramos por cada metro cúbico de espacio libre en el depósito de almacenamiento, en la inteligencia de que en los 50 gramos mencionados están incluidos la mezcla explosiva y la inerte, la capacidad total de seguridad será determinada según la ubicación de los depósitos y las dimensiones de los mismos.

A. Comercio.

8. Almacenamiento de municiones en pequeño calibre para armas de fuego y para usos industriales.

1. La cantidad de municiones que pueden tener en existencia las personas o negociaciones que se dediquen a esta actividad es de 500 gramos por cada metro cúbico de espacio libre en el almacén o depósito, en la inteligencia de que en los 500 gramos está incluida la materia explosiva y la inerte, así como la cápsula.
2. Cuando se almacenen cartuchos que solamente tengan colocada la cápsula, se tomarán 85 gramos del explosivo que contengan dichas cápsulas por cada metro cúbico de espacio libre.
3. Si las negociaciones están establecidas en calles de mucho tránsito, sólo se permitirá almacenar como máximo 50 kilogramos contenida en cartucho.

NOTA: Las distancias arriba indicadas, son para cuando los polvorines o depósitos se encuentren protegidos por obstáculos naturales o artificiales, en caso contrario las distancias aumentan en un "cien por ciento (100%)". En el interior de las fábricas únicamente se autoriza el almacenamiento de nitrocelulosa en una cantidad máxima de 5.000 Kgs observando las distancias de la presente tabla, disminuidas en un ochenta por ciento (80%).

000	500	152	125	125	125	15
500	750	175	135	135	135	20
750	1,000	192	150	150	145	25
1,000	5,000	312	165	165	160	35
5,000	25,000	530	222	180	175	50
25,000	50,000	675	283	200	200	75

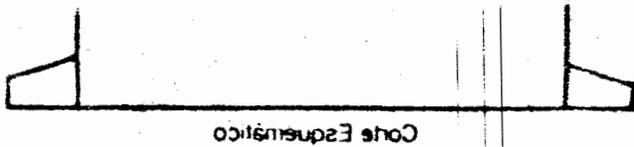
ANEXO No. 3

ANEXO No. 3

COMPATIBILIDAD DE MATERIALES EMPACADOS O ENVASADOS

LA "X" INDICA QUE EL MATERIAL DE LA LINEA HORIZONTAL PUEDE ALMACENARSE CON EL ARTICULO DE LA COLUMNA VERTICAL.

	Pólvora	Acido picrico	Dinitrotolueno	Nitroimidones	Nitroglicerina	Nitrocelulosa	Nitroguanidina	Tetrit	Pulminato de mercurio	Nitruros de plomo, plata y cobre	Estifanato de plomo	Cloratos, percloratos y peróxidos	Sodio metálico	Magnesio en polvo	Aluminio en polvo negro u opaco	Fósforo	P.E.T.N.	T.N.T.	Dinamita y amatoles	Nitrocarbonitratos húmedos	Nitrocarbonitratos secos	Nitrocarbonitratos ácidos	Fosgeno	Ciclonita (frix)	Iniciadores de alta presión detonantes	Detonantes (estopines, cápsulas)	Mechas de seguridad	Cordones detonantes	Cordones encendedores de mecha	Conectores detonantes	Conectores encendedores	Artificios pirotécnicos	Cargas industriales		
Pólvora	X																																		
Acido picrico		XI																																	
Dinitrotolueno			XI																																
Nitroimidones				XI																															
Nitroglicerina					XI																														
Nitrocelulosa						XI																													
Nitroguanidina							XI																												
Tetrit								XI																											
Pulminato de mercurio									XI																										
Nitruros de plomo, plata y cobre										XI																									
Estifanato de plomo											XI																								
Cloratos, percloratos y peróxidos												XI																							
Sodio metálico													XI																						
Magnesio en polvo														XI																					
Aluminio en polvo negro u opaco															XI																				
Fósforo																XI																			
P.E.T.N.																	XI																		
T.N.T.																		XI																	
Dinamita y amatoles																			XI																
Nitrocarbonitratos húmedos																				XI															
Nitrocarbonitratos secos																					XI														
Nitrocarbonitratos ácidos																						XI													
Fosgeno																							XI												
Ciclonita (frix)																								XI											
Iniciadores de alta presión detonantes																									XI										
Detonantes (estopines, cápsulas)																										XI									
Mechas de seguridad																											XI								
Cordones detonantes																											XI								
Cordones encendedores de mecha																											XI								
Conectores detonantes																											XI								
Conectores encendedores																											XI								
Artificios pirotécnicos																																			XI
Cargas industriales																																			

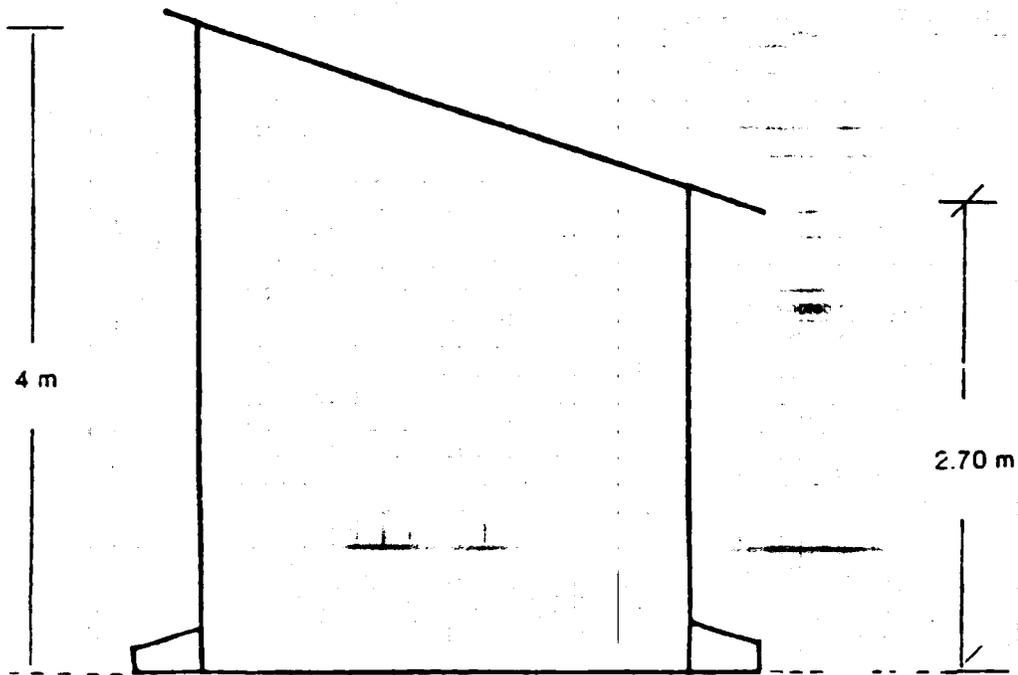


Corte Esquemático

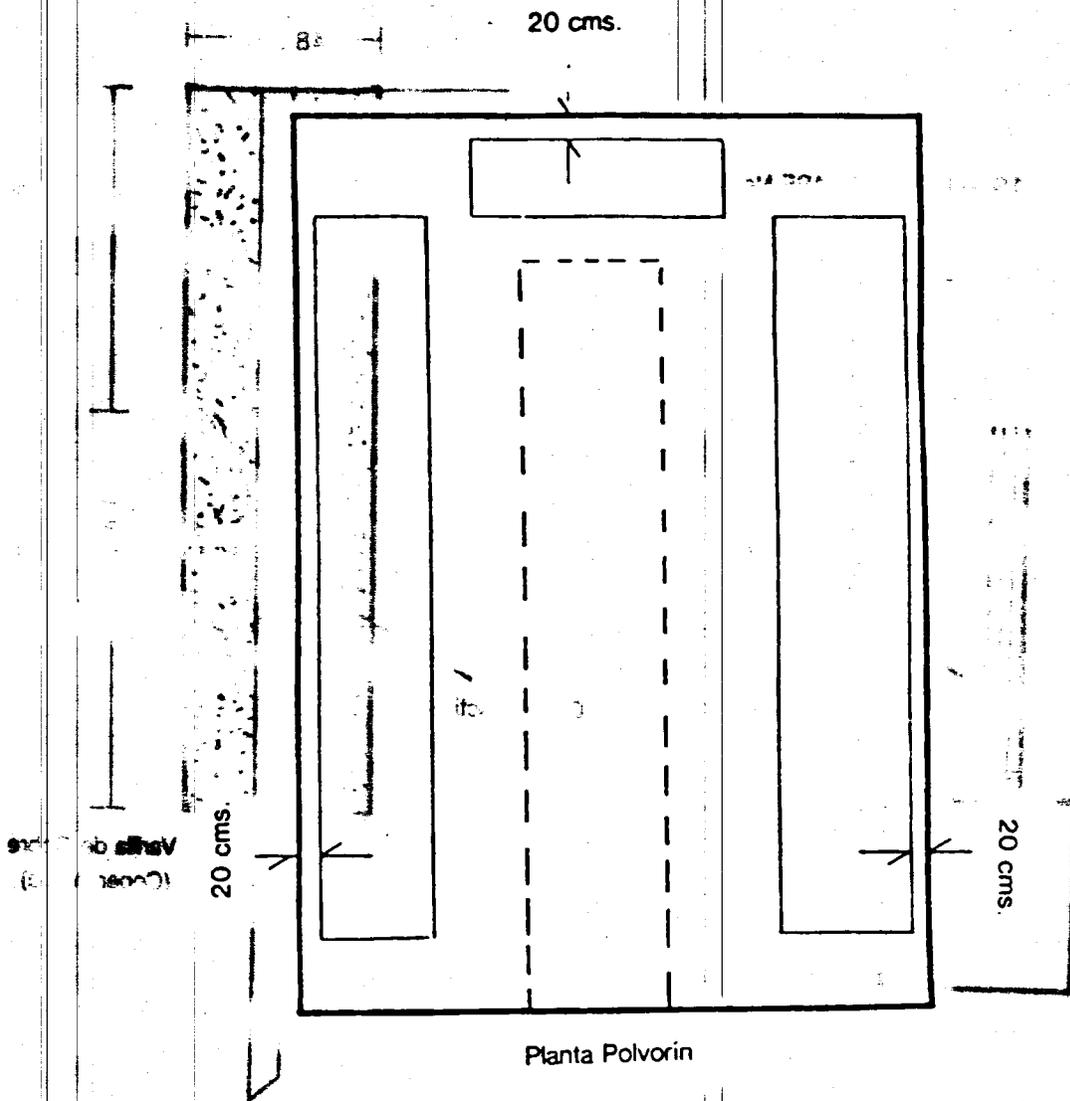
ANEXO No. 4

CARACTERISTICAS POLVORINES

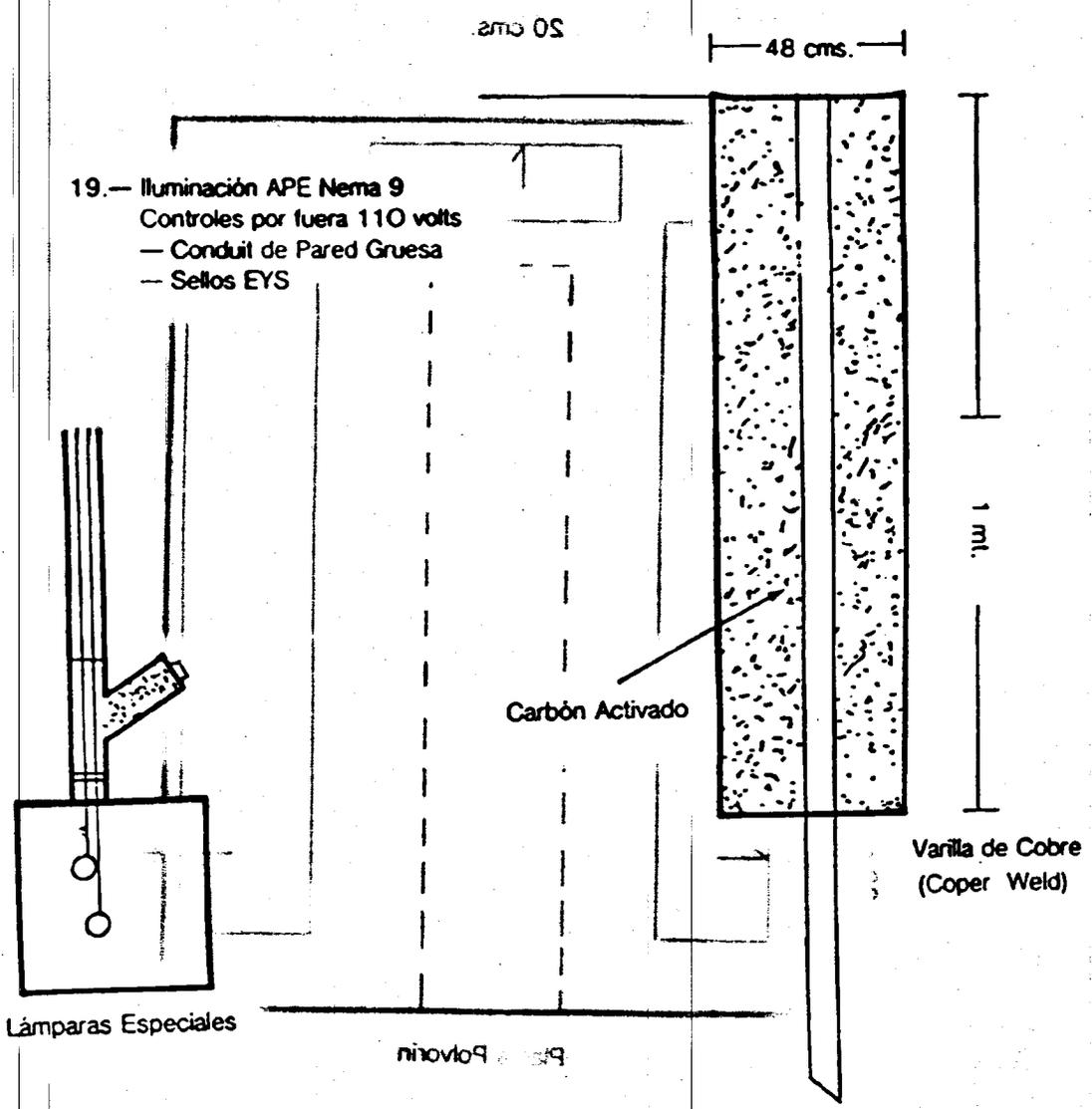
- 1.— Pendiente en Banqueta
- 2.— Dren Perimetral
- 3.— Pala y Pico disponibles
- 4.— Bote de Arena
- 5.— Extinguidores (2)
- 6.— Puerta de Acero y Madera con Chapa y Candado
- 7.— Tierra Fisica
- 8.— Rejilla de ventilación con protección antirroedor
- 9.— Libre de Humedad
- 10.— Pisos pulidos y líneas de accesos



Corte Esquemático

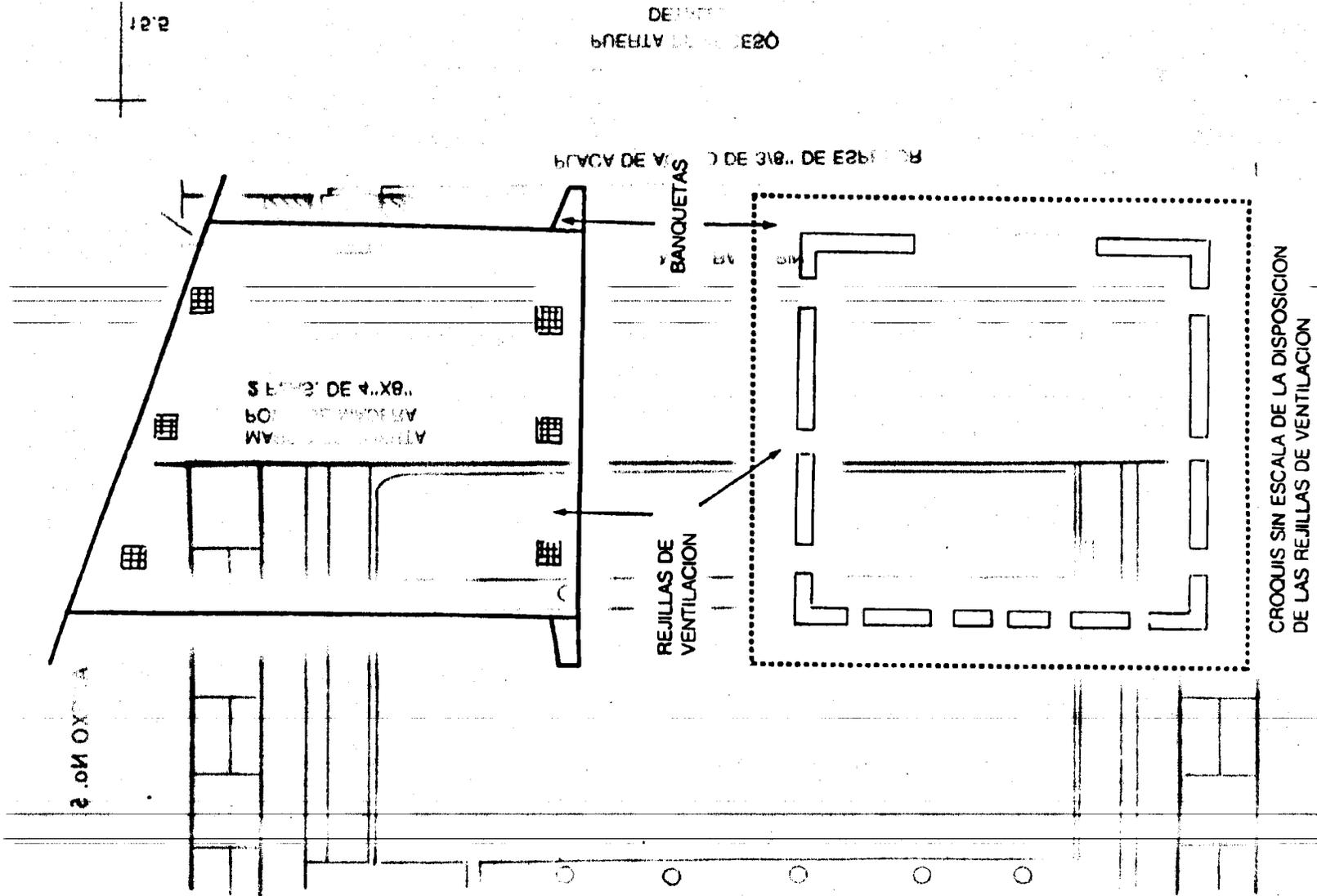


- 11.— Separar estibas de paredes
- 12.— VIGILANCIA (24 Hrs.)
- 13.— Cercado
- 14.— Pararrayos
- 15.— Aplanado y Pintura
- 16.— Tarima de madera
- 17.— 20 mts. libre de mat. orgánica, alrededor
- 18.— Talud o protecc. natural

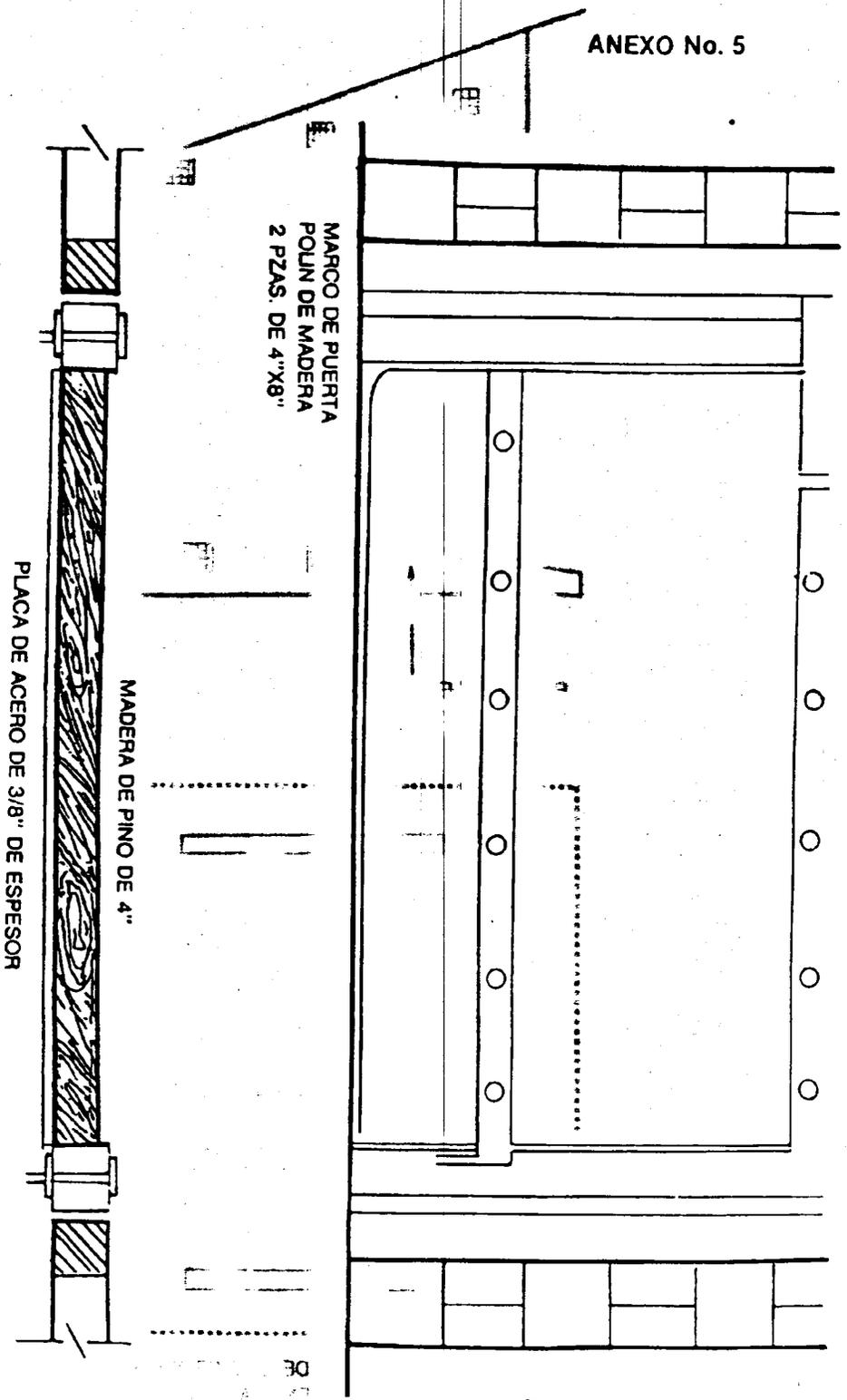


- 20.— Libro de registro de entradas y salidas
 - 21.— Copia en cuadro del permiso
 - 22.— Limite máximo de personas (letrero)
 - 23.— Anuncios:
 - 24.— Tambores de 200, con agua.
- Polvorin No. _____
 Peligro Explosivos
 Prohibido Fumar

- 11.— Señalar estibas de paredes
- 12.— (Hrs.)
- 13.— Cercado
- 14.— Páramos
- 15.— Aislamiento y Pintura
- 16.— T...
- 17.— 20...
- 18.— T...



ANEXO No. 5



PUERTA DE ACCESO
 DETALLE

ANEXO No. 6

SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL
DIRECCION GENERAL DEL REGISTRO FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS
LOMAS DE SOTELO, D.F.

CERTIFICADO DE SEGURIDAD DEL LUGAR DE CONSUMO DE EXPLOSIVOS, ARTIFICIOS O SUBSTANCIAS QUIMICAS
RELACIONADAS CON LOS MISMOS, EXPEDIDO POR LA PRIMERA AUTORIDAD ADMINISTRATIVA.

EL SUSCRITO: _____ PRIMERA AUTORIDAD

ADMINISTRATIVA DE: _____

HACE CONSTAR Y CERTIFICA:

QUE _____
(Denominación o razón social)

CON DOMICILIO EN: _____

CALLE _____ NUMERO _____ CIUDAD, POBLACION O LOCALIDAD _____

MUNICIPIO O DELEGACION _____ ESTADO, TERRITORIO O DISTRITO _____ Z.P. _____ TELEFONO _____

EMPLEARA LOS MATERIALES SIGUIENTES: _____

(pólvora, dinamita, explosivos al nitrato de

amonio, artificios, nitrocelulosa, clorato de potasio, etc.)

TRABAJOS QUE EFECTUARA PRECISAMENTE EN EL LUGAR DE CONSUMO UBICADO EN: _____

(Referido a puntos conocidos del terreno para su fácil localización)

EL CUAL POR SU SITUACION, NO REPRESENTA PELIGRO PARA LA SEGURIDAD Y TRANQUILIDAD PUBLICA

_____ a _____ de _____ de 19 _____

Sello y firma

ANEXO No. 6

MODELO No. 4

ANEXO No. 7

SECRETARIA DE LA DEF. NAL

DIR. GRAL. REG. FED. ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS.

CERTIFICADO DE SEGURIDAD

DEL POLVORIN O ALMACEN

No. _____

EL SUSCRITO

(Nombre y Apellido)

PRIMERA AUTORIDAD.

HACE CONSTAR Y CERTIFICA

QUE LOS POLVORINES UBICADOS EN:

(Referidos a puntos conocidos del terreno para su fácil localización)

DESTINADOS PARA ALMACENAR:

(Pólvora, dinamita, explosivos al nitrato de amonio,

artificios, clorato, nitrocelulosa, nitrato de amonio, etc.)

QUE SERA UTILIZADO POR:

(Denominación o razón social)

CON DOMICILIO EN:

Localidad

Municipio

Estado

EN LA ACTIVIDAD DE:

(Explotación de canteras, industria de la construcción, minera metalúrgica, cerillera, de

pinturas, etc.)

POR SUS CONDICIONES, SITUACION Y MEDIDAS DE SEGURIDAD, SON ADECUADOS: NO PRESENTAN PELIGRO PARA MANTENER EL ORDEN PUBLICO, ESTAN PROTEGIDOS CONTRA ROBOS Y GARANTIZAN LA TRANQUILIDAD DE LA POBLACION.

EL CUAL POR SU SITUACION, NO REPRESENTA PELIGRO PARA LA SEGURIDAD Y TRANQUILIDAD DE LA POBLACION.

a _____ de _____ de 19 _____

Sello y firma

EL PRESIDENTE MUNICIPAL (FIRMA Y SELLO)

1.8.04

ANEXO No. 8

SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL
DIRECCION GENERAL DEL REGISTRO FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLS

SOLICITUD DE PERMISO GENERAL PARA DEDICARSE A LA COMPRA Y CONSUMO DE EXPLOSIVOS, ARTIFICIOS Y SUBSTANCIAS QUIMICAS RELACIONADAS CON EXPLOSIVOS (ARTICULO 42 FRACCION I DE LA L.F.A.F.Y.E.)

A. DATOS DEL SOLICITANTE:

Apellido Paterno		Apellido Materno		Nombre (s)	
Fecha de Nacimiento	Sexo	Lee	Escribe	Profesion u Oficio	Nacionalidad
Calle				Número	
Ciudad, Población o Localidad				Código Postal	
Municipio o Delegación		Estado, Distrito		Teléfono	

Referencias del Domicilio cuando se requieran.

C. DATOS DE LA NEGOCIACION.

Denominación o Razón Social	
Calle	Número
Ciudad, Población o Localización	Código Postal
Municipio o Delegación	Estado o Distrito

Actividad a la que se dedicará Teléfono

EXPLOSIVOS SOLICITADOS MENSUALMENTE: (CANTIDADES) Y (TIPOS)

ALTO EXPLOSIVO _____

AGENTES EXPLOSIVOS _____

ARTIFICIOS _____

SUBST. QUIMICAS _____

OTROS _____

Lugar y fecha

Firma Autorizada.

ANEXO No. 8.1

SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL
 DIRECCION GENERAL DEL REGISTRO FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS.
 LOMAS DE SOTELO, D.F.

SOLICITUD DE PERMISO EXTRAORDINARIO PARA LA COMPRA DE POLVORA DE EXPLOSIVOS DE ARTIFICIOS O DE SUBSTANCIAS QUIMICAS RELACIONADAS CON LOS MISMOS (ARTICULO 57 DEL REGLAMENTO DE LA LEY FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS).

 DATOS DEL SOLICITANTE:

(2) 010 27

PRIMER APELLIDO	SEGUNDO APELLIDO	PRIMER NOMBRE	SEGUNDO NOMBRE	
FECHA DE NACIMIENTO	NACIONALIDAD	SEXO	LEE .ESCRIBE	PROFESION, OFICIO
OCUPACION	CALLE	NUMERO	CIUDAD, POBLACION O LOCALIDAD	
MUNICIPIO O DELEGACION	ESTADO, TERRITORIO O DISTRITO	Z.P.	TELEFONO	

REFERENCIAS DEL DOMICILIO CUANDO LAS REQUIERA

 DATOS DE LA NEGOCIACION

DENOMINACION O RAZON SOCIAL

CALLE NUMERO CIUDAD, POBLACION O LOCALIDAD

MUNICIPIO O DELEGACION ESTADO, TERRITORIO O DISTRITO Z.P. TEL.

ACTIVIDAD A LA QUE SE DEDICARA

CANTIDADES Y CLASES DE MATERIALES EXPLOSIVOS POR COMPRAR

TIEMPO EN QUE SE CONSUMIRAN LOS MATERIALES SEÑALADOS EN EL PUNTO ANTERIOR

PROTESTO, QUE LOS DATOS ANOTADOS SON VERIDICOS, QUE LA FIRMA ES AUTENTICA Y LA UNICA QUE UTILIZARE EN LOS DOCUMENTOS QUE DIRIJA A LA SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL.

 Lugar y Fecha

 Firma del solicitante

ANEXO No. 9

SECRETARIA DE LA DEFENSA NACIONAL
DIRECCION GENERAL DEL REGISTRO FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS.
LOMAS DE SOTELO, D.F.

REFERENCIAS DEL LUGAR DONDE EL SOLICITANTE CONSUMIRA O USARA LOS EXPLOSIVOS ARTIFICIOS O SUS TANCIAS QUIMICAS RELACIONADAS CON LOS MISMOS, EN LAS OBRAS, OPERACIONES INDUSTRIALES O EXPLO TACION MINERA QUE SEÑALA EN SU GESTION PETITORIA.

(Denominación o Razón Social del peticionario)

SITUACION EXACTA DEL LUGAR DE CONSUMO:

(Referida a puntos conocidos del terreno

para facilitar su localización).

UBICADO EN:

Municipio

Delegación

Estado

Distrito

DISTANCIAS MAS CORTAS, EN SUS ALREDEDORES A:

MTS.

MTS.

MTS.

Casas habitación

MTS

MTS.

Carreteras

Vías Férreas

Lineas eléctricas

Polvorines

"EXISTE O NO" BARRERA DE PROTECCION A:

Casas habitación

Carreteras

Vías férreas

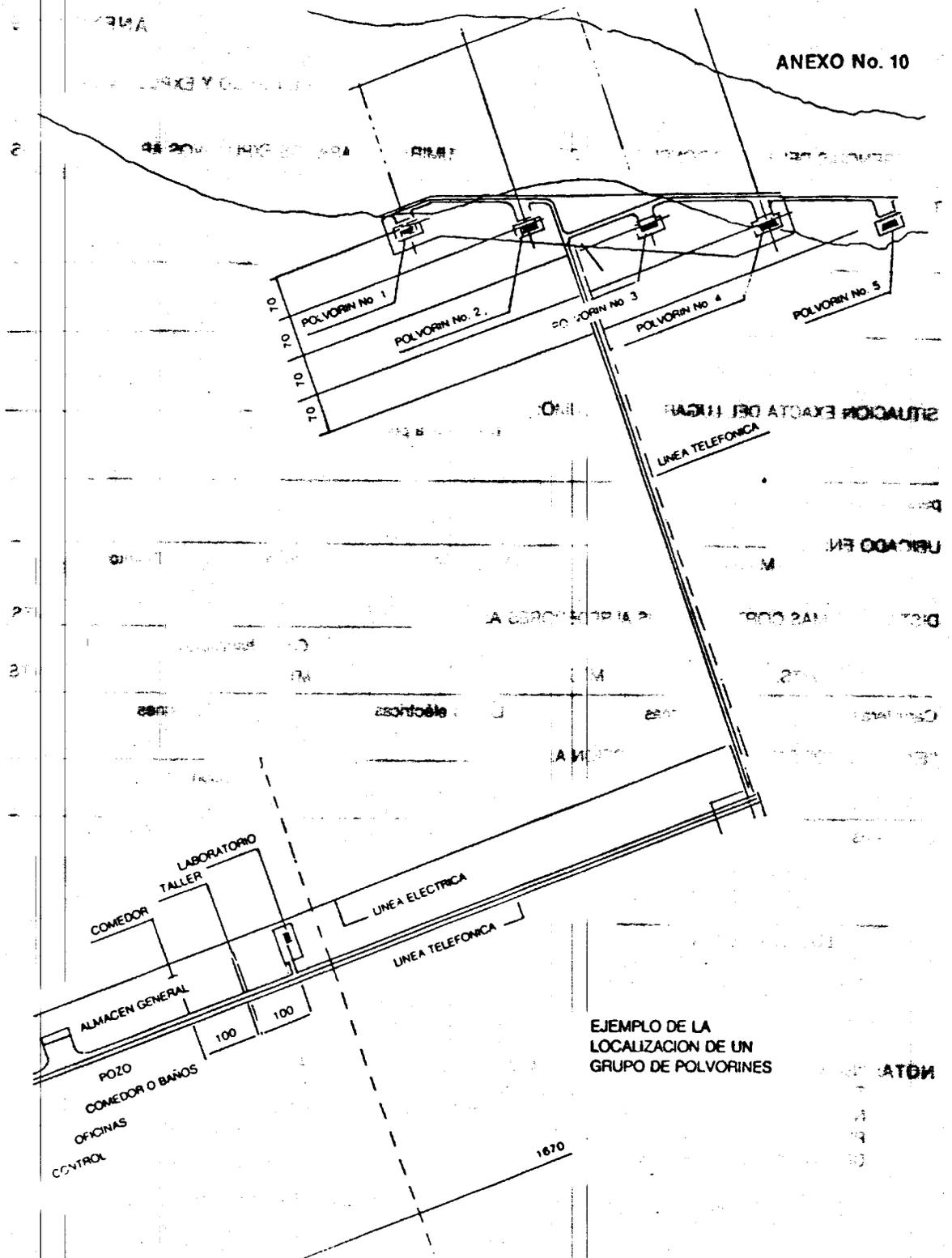
Lineas eléctricas

Polvorines

LUGAR Y FECHA

FIRMA DEL INTERESADO

NOTA: "BARRERA DE PROTECCION", SIGNIFICA CUALQUIER ELEVACION NATURAL DEL TERRENO MURALLA AR- TIFICIAL DE ESPESOR NO MENOR DE UN METRO CONSTRUIDA CON TIERRA, ADOBES O SACOS TERRE- NOS, O BOSQUE DE TAL DENSIDAD QUE LAS PARTES CIRCUNDANTES QUE REQUIERAN PROTECCION NO PUEDAN VERSE DESDE EL LUGAR DE CONSUMO DE EXPLOSIVOS AUN CUANDO LOS ARBOLES ESTEN DESPROVISTOS DE HOJAS.



EJEMPLO DE LA LOCALIZACION DE UN GRUPO DE POLVORINES

SECRETARIA DE LA DEF. NAL.

MODELO No. 2

ANEXO No. 11
DIR. GRAL. REG. FED. ARMA'S
DE FUEGO Y EXPLOSIVOS.

REFERENCIAS DE POLVORINES

REFERENCIAS DE POLVORINES DONDE EL SOLICITANTE ALMACENARA EXPLOSIVOS, ARTIFICIOS Y/O SUBSTANCIAS QUE UTILIZARA EN OBRAS, OPERACIONES INDUSTRIALES, COMERCIALES O EN LA EXPLOTACION MINERA.

POLVORINES No. _____ (o ALMACEN)

NOMBRE _____

RAZON SOCIAL _____

SITUACION EXACTA DEL POLVORIN _____
Referida a puntos conocidos del terreno para facilitar su colocación.

UBICADO EN _____ ó _____
Municipio o Delegación Estado Distrito Federal

TIPO _____
Superficial Semi-enterrado Enterrado Socavón de mina Móvil

DIMENSIONES INTERIORES _____ mts. _____ mts. _____ mts. VENTILACION _____
Largo Ancho Alto

MATERIALES DE CONSTRUCCION DE _____
Cimientos Muros Piso Puertas Techo

DISTANCIAS MAS CORTAS DEL POLVORIN A: _____ mts. _____ mts. _____
Casas habitación carreteras vías

_____ mts. No. _____ mts. SI O NO EXISTE BARRA DE PROTECCION A:
férreas polvorin

_____ mts. _____ mts. _____ mts. _____ mts. del polvorin
casas habitación carreteras vías férreas líneas eléctricas

ARTICULO Y CANTIDAD POR ALMACENAR: _____

tratándose de explosivos, se tendrá en cuenta: capacidad y tablas de "compatibilidad" y distancia cantidad

VIGILANCIA Y SEGURIDAD _____
(describirlas)

CASA PROVEEDORA _____ PERMISO GENERAL NUMERO _____

Lugar y fecha _____ AUTORIZADO _____

NOTA: "BARRERA DE PROTECCION". SIGNIFICA CUALQUIER ELEVACION NATURAL DEL TERRENO MURALLA ARTIFICIAL DEL ESPESOR O MENOR DE UN METRO CONSTRUIDA CON TIERRA, ADOBES O SACOS TERRE-ROS O BOSQUE DE TAL DENSIDAD QUE LAS PARTES CIRCUNDANTES QUE REQUIERAN PROTECCION NO PUEDAN VERSE DESDE EL POLVORIN, AUN CUANDO LOS ARBOLES ESTEN PROVISTOS DE HOJAS.

3. FUNCIONAMIENTO, TIPOS Y CLASES DE EXPLOSIVOS

3.1 Funcionamiento de los explosivos

Para algunos usuarios de explosivos no es importante el tener conocimientos profundos sobre la química y física de los explosivos, no obstante, una revisión sobre estos temas nos ayudará a comprender como trabajan los explosivos en los materiales donde se usan.

Un explosivo es un compuesto químico o mezcla de compuestos (unos combustibles y otros oxidantes), que iniciados debidamente, dan lugar a una reacción muy rápida y a una gran producción de calor (reacción explosiva).

En la reacción se producen gases a temperaturas y presiones muy altas. Dependiendo del tipo de explosivo, su composición será diferente, y por tanto sus propiedades finales; ello conlleva a que para cada tipo de aplicación se deberá escoger el explosivo más idóneo.

Los principales componentes que reaccionan en un explosivo son combustibles y oxidantes, en la siguiente lista se observan algunos de estos componentes:

Combustibles	Oxidantes
Aceites	Nitrato de amonio
Carbón	Nitrato de sodio
Aluminio	Nitrato de calcio
TNT	
Nitrato de amina	
Nitroglicerina	

Para que un explosivo brinde su máxima energía y no produzca gases nocivos, es necesario que su balance de oxígeno sea cero, y esto se da cuando un explosivo contiene el suficiente oxígeno para oxidar completamente todos los combustibles, en teoría, si esto se logra, los productos finales después de la detonación serán H₂O, CO₂, y N₂.

En la práctica normalmente se obtienen otro tipo de gases, en algunos casos tóxicos como el CO, NO₂ y el N₂O; sin embargo, en la mayoría de los trabajos de ingeniería civil el uso de los explosivos es a cielo abierto, y en el caso de los trabajos en túneles dichos gases se desechan con ventilación, usándose tubería a alta presión para provocar su salida al exterior.

Para un correcto dimensionamiento de las cargas, se debe tomar en cuenta que la carga detonante actúa en el medio circundante en dos fases. Explicándolo de una manera más sencilla, se puede decir que la primera fase del efecto de choque de la explosión, produce en el material un esfuerzo por la onda, con una presión inicial del orden de 10⁵ a 10⁶ kg/cm², lo que en un medio cerrado produce que dicha carga exceda la resistencia a la compresión

del material. Debido a que la energía de la onda disminuye rápidamente en la distancia con respecto al lugar de colocación de la carga, ésta pierde rápidamente el efecto de compresión en el material, por lo que sólo el esfuerzo cortante y el esfuerzo de tensión tienen efecto; en una onda de choque las ondas de esfuerzo son reflejadas y regresan en forma de onda de tensión, si la energía (que depende del tamaño de la carga) es suficiente para sobrepasar la resistencia a la tensión del material, ocurrirá la desintegración del material (Figura 3.1)

En la segunda fase, la presión de los gases de los explosivos (del orden de 104 kg/cm²) empuja al material hacia afuera del cráter ocasionando una segunda desintegración del material.

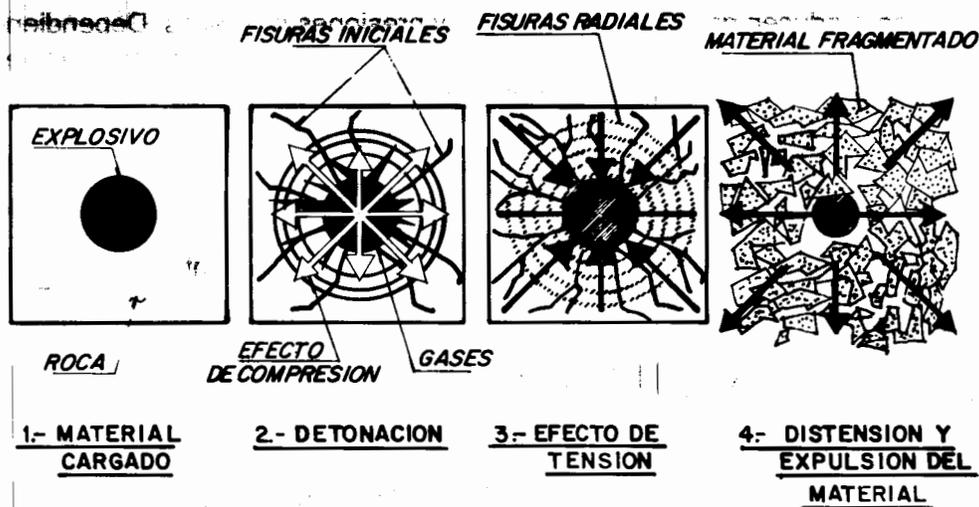


Figura 3.1. Fases de la fragmentación generada por el efecto del explosivo en la roca.

En conclusión, una gran presión ejercida por los gases a altas temperaturas después de la detonación, es lo que rompe el medio que contiene al explosivo. Esto se efectúa en dos pasos, el primero debido a la presión de la detonación ejercida en un principio por el iniciador y el segundo por la presión de explosión, siendo ésta última la más importante en el rompimiento de los materiales.

3.1.1 Características de los explosivos

Las características individuales que tienen los explosivos, por sí solas, son muy importantes para entender la utilidad potencial de un explosivo específico para una utilidad en especial. Las siguientes características son las más significativas:

3.1.1.1 Densidad o gravedad Específica

Es el peso por unidad de volumen de un explosivo, expresada usualmente en gramos por centímetro cúbico. Esta característica permitirá determinar la cantidad de explosivo y su distribución por barreno.

3.1.1.2 Velocidad de detonación (VOD)

Se define como la velocidad en la que la reacción de detonación se extiende a través de una columna de explosivo, ya sea confinado en el barreno, en cartucho o a granel. Para que un explosivo sea de utilidad, esta velocidad deberá ser igual o mayor a la velocidad sónica de la roca a explotar. Al incrementarse la velocidad, el explosivo fragmentará en grado mayor a la roca.

3.1.1.3 Presión de detonación

Es considerada como la presión en la zona de choque adelante de la zona de reacción. La presión que se crea repentinamente fragmentará por su condición al material en vez de sólo desplazarlo y a esta capacidad se le denomina «efecto brisance». La presión de detonación de un explosivo aumentará dependiendo del grado de confinación en que se encuentre, es por eso que será necesario evitar al máximo los huecos vacíos dentro del barreno.

3.1.1.4 Presión de explosión

Es la presión que ejercen los gases como producto de la explosión inicial y se contempla como un 45% de la presión de detonación.

3.1.1.5 Energía

Es la particularidad potencial del explosivo para realizar un trabajo.

3.1.1.6 Potencia

Es el trabajo útil que realiza un explosivo, comparado con el trabajo útil que realiza un agente explosivo convencional referido a un 100%.

3.1.1.7 Sensibilidad

Es la propiedad de la onda explosiva de propagarse de cartucho en cartucho o de continuar a través de una columna.

3.1.1.8 Diámetro crítico

Es el diámetro mínimo al cual un explosivo puede ser detonado.

3.1.1.9 Sensitividad

Es la propiedad que poseen los explosivos para ser detonados por iniciadores convencionales, ya sean cordones detonantes, fulminantes, Primadet, etc.

3.1.1.10 Gases

Son aquellos materiales desprendidos después de la detonación de los explosivos y deberán pertenecer al grado de los inocuos; cuando un explosivo produce gases tóxicos limita su uso a explotaciones a cielo abierto.

3.1.1.11 Estabilidad

Es la propiedad de los explosivos para mantenerse en condiciones de uso durante un periodo determinado de tiempo, conservando sus características inalterables.

3.1.1.12 Resistencia al agua

Dentro de los explosivos es la propiedad más determinante por la versatilidad de su uso o limitación de este. Ya que deberán conservar todas sus demás características, aún en contacto directo con el agua, durante un lapso determinado.

3.1.1.13 Flamabilidad

Es la propiedad que tienen los explosivos a la facilidad de incendiarse por temperatura, fricción, contacto directo con flama o cualquier otro medio, que le resta seguridad en el manejo.

3.1.1.14 Eficiencia

Es el porcentaje real de energía que genera un explosivo en el momento de su detonación.

3.1.1.15 Compresión

Es la capacidad de un explosivo a ser comprimido manteniendo o aumentando sus características de eficiencia, velocidad de detonación, sensibilidad, etc.

3.1.2 Clases de explosivos

En la actualidad los explosivos se clasifican en tres tipos: químicos, mecánicos y nucleares. Nos referiremos a los primeros dado que en ellos radica la gama de explosivos utilizados en las aplicaciones constructivas y mineras, que son el mayor interés de nuestro trabajo.

Como se puede apreciar en la figura 3.2, los explosivos químicos se dividen en deflagrantes y detonantes, los explosivos deflagrantes son aquellos que tienen intervalos de descomposición menores a 1000 m/s, como ejemplo tenemos a la pólvora negra, que como ya se mencionó este tipo de explosivo está prácticamente en desuso.

Los explosivos detonantes son aquellos que tienen una velocidad de descomposición mayor de 1000 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.

Dentro de los explosivos químicos se encuentran los explosivos tácticos (o militares) y los explosivos industriales (o comerciales), como es obvio nos referiremos a los explosivos industriales, ya que los tácticos se encuentran restringidos a la fuerzas armadas, además, su uso resulta muy costoso comparado con el uso de los explosivos industriales.

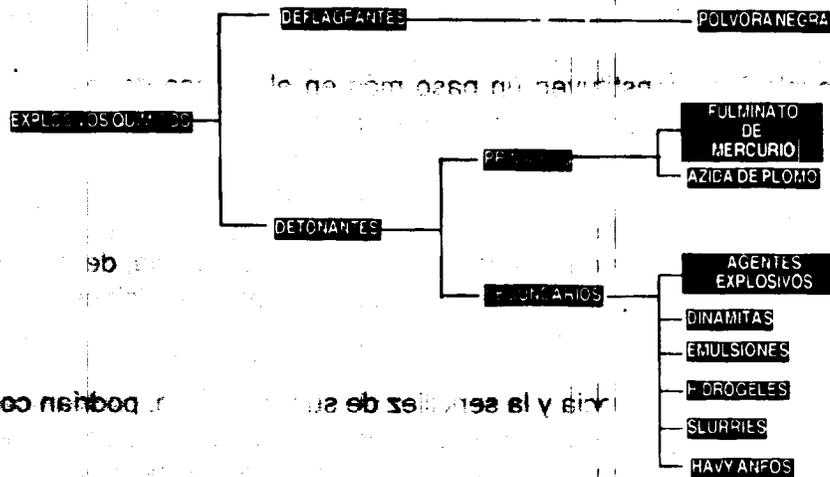


Figura 3.2. Tipos de explosivos químicos

3.1.3 TIPOS DE EXPLOSIVOS Y ARTIFICIOS

3.1.3.1 Dinamitas

Es el término genérico que cubre a los explosivos sensibilizados con nitroglicerina, es el tipo más sensible de los productos comerciales y se dejó de fabricar en el país hace 25 años.

A continuación se presentan algunos tipos y se menciona la aplicación a la que se han dirigido:

Tipo	Uso
Dinamita pura	Trabajos superficiales
Dinamita amoniaca	Canteras
Dinamita gelatinizada	Exploración sismográfica
Semigelatina	Líneas subterráneas
Permisibles	Minas de carbón

3.1.3.2 Hidrogeles

Un hidrogel es una mezcla de gelatinizador, un sensibilizador explosivo o no explosivo, nitrato de amonio, nitrato de sodio y agua. Existen en varios diámetros y son el sustituto de las dinamitas en el mundo, ya que realizan el mismo trabajo, sin riesgos y sin las molestias ocasionadas por la nitroglicerina.

Los hidrogeles se empezaron a desarrollar en 1940; sin embargo, no se comercializaron porque los barrenos usados eran en su mayoría inferiores a 10 cm de diámetro. Su verdadero desarrollo empezó desde los años cincuenta hasta la actualidad.

3.1.3.3 Emulsiones

Las emulsiones explosivas constituyen un paso más en el avance de los hidrogeles. Al igual que los hidrogeles, las emulsiones están formadas por productos que intrínsecamente no son sustancias explosivas, pero que mezclados adecuadamente y con una iniciación correcta, reaccionan como explosivos de considerable confiabilidad.

Diversas son las formulaciones que se pueden fabricar en esta familia, desde emulsiones encartuchadas de diámetro pequeño, sensibles al cápsul 6, hasta emulsiones no sensitivas, ya sea encartuchadas o bombeables.

Dadas las características de potencia y la sencillez de su fabricación, podrían compararse con un agente explosivo emulsificado resistente al agua y de mayor velocidad de detonación. Salvo que las emulsiones contienen además nitrato de sodio o calcio y un emulsificante (glicerina o parafina) en su mezcla.

3.1.3.4 "Slurries" (hidrogeles de nueva generación)

Ya ha aparecido en el mercado nacional un tipo de alto explosivo que revoluciona el concepto de los explosivos por su desarrollo en el campo. Este nuevo producto combina las mejores propiedades tanto de los hidrogeles como de las emulsiones.

Los "slurries" son compuestos que no llevan en su formulación ningún producto que sea de por sí explosivo; únicamente, estos productos, reaccionan de forma explosiva en el momento en que se inician con el detonador, cordón detonante o cualquier iniciador.

Todo el conjunto del explosivo va disuelto en una masa acuosa, la cual confiere al producto las características que posee, entre ellas se encuentra su excelente resistencia al agua, excelente resistencia a la presión hidrostática, su gran seguridad en el manejo y transporte, no producen dolores de cabeza, y por último los gases emanados de su detonación no representan peligro alguno para la salud, debido a sus ínfimos niveles de toxicidad, dan por resultado un producto superior tanto en energía como en velocidad de detonación, redituando al usuario por los costos más bajos, no sólo en la explotación de rocas sino también en los procesos de fragmentación. Este explosivo se comercializa en el mercado nacional bajo el nombre de emulgel.

3.1.1.5 Agentes explosivos (anfós)

El nitrato de amonio mezclado con materiales combustibles fue patentado en 1955 por HB Lee y RL Akre, dando origen al anfo (ammonium nitrate-fuel oil).

El agente explosivo es el de uso más generalizado en el mundo y si no fuera por su alto grado higroscópico (o alta captación de humedad), acapararía virtualmente la totalidad del uso en el mercado, utilizándose en la mayoría de los casos al alto explosivo como iniciador únicamente, ya que el agua además de volver insensible a los agentes explosivos los deshace, es decir, produce la desintegración del pellet o grano de anfo.

Como su nombre lo indica, el anfo (ammonium nitrate-fuel oil), es una mezcla de nitrato de amonio (grado industrial) en un 94,3% en peso y aceite combustible (diesel) en un 5,7% en peso. Cuando el porcentaje de aceite combustible varía, positiva o negativamente, hay un efecto de pérdida de energía y generación de gases nocivos, por lo tanto es de suma importancia utilizarlo en la proporción adecuada, como se aprecia en el siguiente gráfico (Figura 3.3).

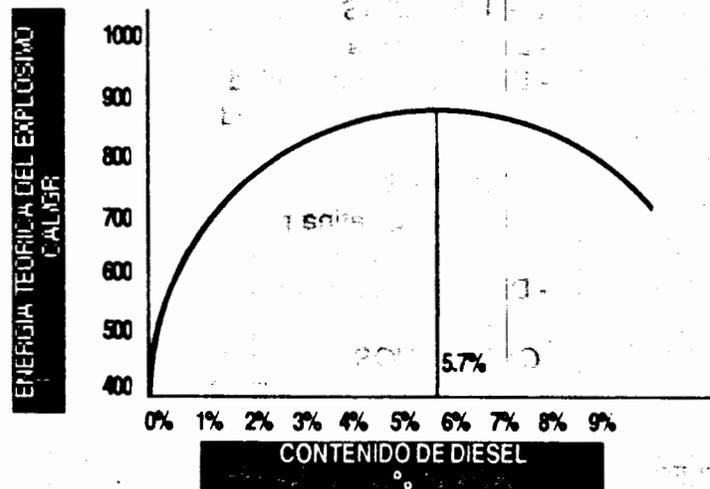


Figura 3.3 Efecto del contenido de diesel en la potencia del agente explosivo.

3.1.3.6 Heavy anfos (anfos pesados)

En nuestro país, en los últimos años, se han venido aplicando en grandes explotaciones a cielo abierto mezclas «in situ» de emulsiones a granel y agentes explosivos, llamados comúnmente heavy anfos.

Dependiendo de las proporciones de la mezcla, las características del mismo las acercarán ya sea a un alto explosivo o a un agente explosivo, pudiéndose fabricar en formulaciones mezcladas en camiones y bombeables, o encartuchadas y descargables por gravedad. Una característica importante es que entre más elevado sea el porcentaje del agente explosivo utilizado en la mezcla menor será la resistencia al agua.

3.2 Tipos y clases de explosivos

Primero se definen los explosivos y después se clasifican de acuerdo a su función.

Explosivo.- Es toda sustancia susceptible de proporcionar, con una descomposición química y en un lapso de tiempo muy corto, una gran cantidad de gases a altas temperaturas y presión, los cuales producen cuatro efectos básicos:

- Fragmentación de la roca
- Desplazamiento de la roca
- Vibración del suelo
- Golpe de aire

Todo explosivo por norma requerirá de un dispositivo de disparo, para que se ubique dentro de la clasificación de explosivos, por sus características detonantes (Figura 3.3).

Tabla 3.1 Clasificación de los explosivos

DINAMITAS	GRANULADAS	<ul style="list-style-type: none"> - Dinamita pura - Dinamita alta densidad - Dinamita baja densidad
	GELATINAS	<ul style="list-style-type: none"> - Dinamita gelatina pura - Dinamita gelatina amoniacal - Dinamita semigelatina
HIDROGELES Y EMULSIONES	CARTUCHOS	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrato de monometilamina - Aluminio - Aire sensibilizado
	SISTEMA A GRANEL	<ul style="list-style-type: none"> - Aire sensibilizado - Aluminizado - Explosivo sensibilizado
ANFO	ENVASADOS	<ul style="list-style-type: none"> - Anfo normal - Anfo aluminizado - Anfo alta densidad
	SISTEMA A GRANEL	<ul style="list-style-type: none"> - (agente explosivo seco) - Anfo - Cordón detonante - Mecha de seguridad - Ignitacord - Fulminantes
DISPOSITIVOS DE DISPARO		<ul style="list-style-type: none"> - Noneles - Estopín eléctrico - Conector de superficie (ms) - Conector TH - Booster (detonador de alta presión)

3.3 Clasificación de los explosivos

3.3.1 Dinamitas

3.3.1.1 Dinamita pura

Consiste de nitroglicerina, nitrato de sodio, antiácidos, aceites combustibles y ocasionalmente azufre. Su uso es limitado por ser costosa y de alta sensibilidad al choque y a la fricción.

3.3.1.2 Dinamita alta densidad

Comúnmente es llamada dinamita extra, se diferencia de la anterior por substituir parte de la nitroglicerina y el nitrato de sodio por nitrato de amonio, lo que la hace menos sensitiva a la fricción y al choque, su uso también es limitado.

3.3.1.3 Dinamita baja densidad

Su composición es similar a la de "alta densidad", excepto porque la mayoría de la nitroglicerina está substituida por nitrato de amonio, es de uso limitado.

3.3.2 Gelatinas

3.3.2.1 Dinamita gelatina pura

Gelatina especial o extra compuesta por nitroglicerina, nitrocelulosa y nitrato de sodio, existen proporciones que casi la semejan a la dinamita pura; se usa básicamente en barrenos profundos o faltos de confinamiento, pueden afectar su velocidad.

3.3.1.2 Dinamita gelatina amoniacal

Se llama gelatina extra, pero difiere de la anterior por reemplazar a la nitroglicerina y al nitrato de sodio por nitrato de amonio, se usa en condiciones húmedas y como carga de fondo en barrenos de diámetro pequeño, a veces dependiendo de su formulación sirve como iniciador del agente explosivo.

3.3.1.3 Dinamita semigelatina

Con formulación de 30 a 60% de nitroglicerina y diferente densidad en sus ingredientes, se usa en trabajos donde existe poca agua y los barrenos son de diámetro pequeño, tiene tan buena consistencia que se pueden cargar barreno hacia arriba.

3.3.3 Hidrogeles y emulsiones

3.3.3.1 Hidrogeles

Son una mezcla de nitrato de amonio, nitrato de sodio, sensibilizador, gelatinizador y diferentes cantidades de agua, que se fabrican en diversos diámetros; fueron los primeros substitutos de la dinamita por ser más manejables y seguros en su transporte.

3.3.3.2 Emulsiones

Se producen en una mezcla de agua-aceite, donde al someterse a una adecuada agitación y a un agente emulsificante quedan unidas, y posteriormente se le adicionan los elementos

sensibilizadores que cada compañía ha patentado (microesferas, gas, ácidos especiales, parafinas especiales, etc.). Las emulsiones han tenido buena aceptación en el mercado nacional y ha mejorado su técnica y uso directo en el campo hasta llegar a implementarse su utilización en el sistema a granel, generando ahorros tanto en la barrenación como en la cantidad de explosivo, es aplicable por lo general en grandes operaciones.

3.3.4 Agentes explosivos secos (anfo)

En un principio fueron fabricados con carbón y aceites combustibles combinados con nitrato de amonio en diversas proporciones, pero basados en la experiencia, el nitrato de amonio poroso mezclado con diesel proporcionó óptimos resultados, produciéndose lo que se denomina comúnmente anfo (ammonium nitrate and fuel oil), fabricado con un 94,3% de nitrato de amonio y un 5,7% de diesel, la dosificación debe ser exacta para evitar pérdidas de energía y que afecte lo que deseamos fragmentar o demoler.

Como observamos en la tabla 3.1 se pueden tener envasados y a granel; en los envasados se adiciona aluminio para incrementar su energía, pero también aumenta su costo; y a granel mediante un camión mezclador se suministra el nitrato con su proporción de diesel directamente en el barreno.

3.3.2 Dispositivos de disparo

3.3.2.1 Cordón detonante

Fabricado con un núcleo de pentrita (PETN) recubierto por capas textiles impermeables, es semejante a una cuerda, muy manejable y resistente a el agua, no puede ser iniciado por flama de mecha o la flama de un cerillo, por lo general es iniciado con un fulminante 6 y mecha, en toda su extensión posee la potencia de un fulminante 6. En el mercado nacional tiene tres presentaciones de acuerdo a el trabajo a realizar, ya sea 7*-cebado o amarre.

3.2.2 Mecha de seguridad

Está constituida principalmente de un núcleo de pólvora negra especial, recubierto por varias capas textiles y un acabado en cera, que le dan protección y aislamiento impermeable. Su función es de transmitir fuego a una velocidad estable (135 s/m) a un fulminante o cápsul para iniciar la voladura.

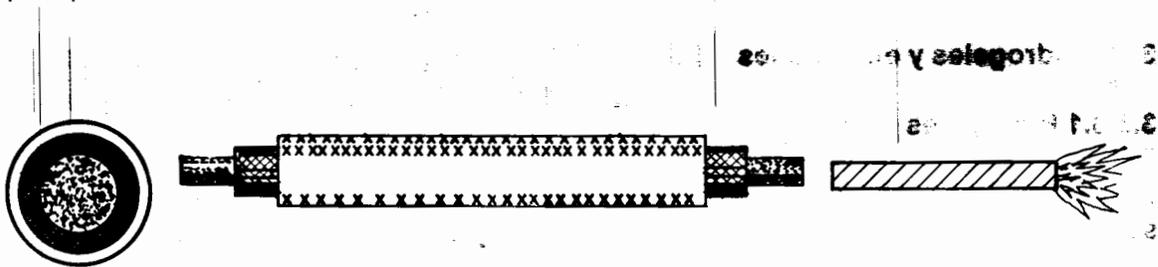


Figura 3.4 Esquema de la mecha de seguridad

3.3.2.3 Ignitacord

Es básicamente un alambre flexible que recubre a un compuesto inflamable, que arde a una velocidad uniforme, produce una flama vigorosa e intensa que enciende los conectores TH engargolados a las mechas; es decir, es un mecanismo de ignición y retardo, ya que el tipo A se ha determinado como 5 veces más rápido que la mecha de seguridad. Fácilmente es iniciado por impacto, fricción o chispas, y viene en carretes de 30 m.

3.3.2.4 Fulminantes

Consiste en un casquillo de aluminio con tres cargas: ignición, iniciación y base de alto explosivo, y su función es como sigue: la primera carga capta el flamazo de la mecha, convirtiéndola de combustión a detonación que a su vez inicia a la carga base, son en extremo peligrosos ya que se inician con calor excesivo, golpes o chispas. (Figura 3.5)

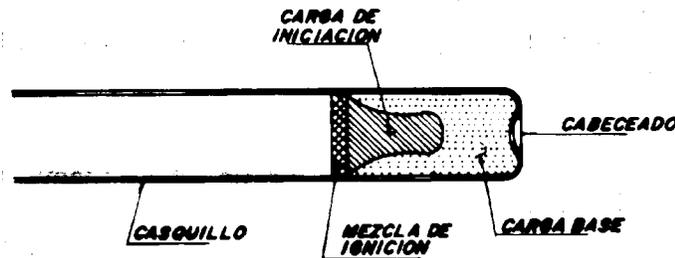


Figura 3.5 Características de los fulminantes

3.3.2.5 Noneles

Es un iniciador, clasificado dentro de los estopines, aunque no eléctrico, de donde proviene su nombre (NON-Electric). Consiste en un tubo plástico laminado de diámetro chico con un sello ultrasónico en la punta, su interior está revestido de una capa muy delgada de material reactivo,

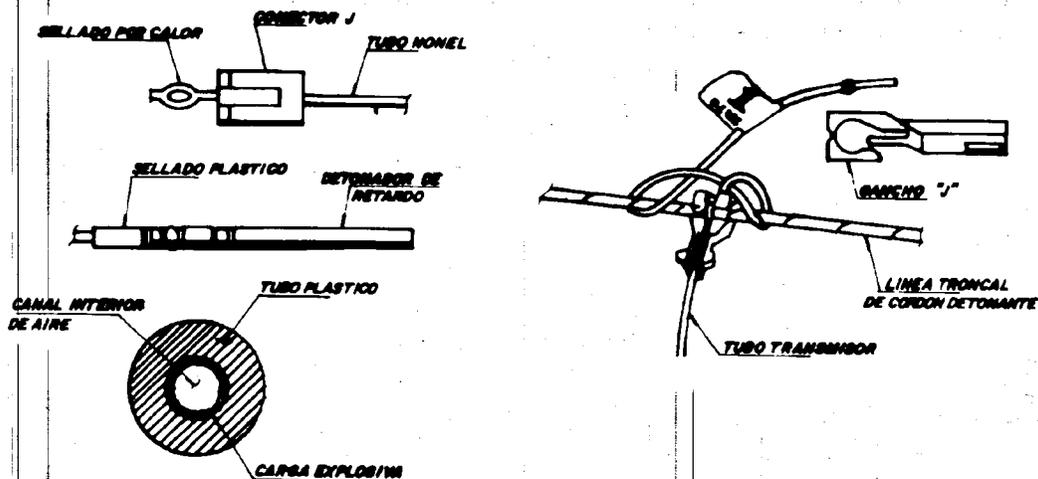


Figura 3.6 Esquema que muestra la estructura de los Noneles

que transmite una señal de baja energía (onda de choque), que se propaga a una velocidad uniforme por nudos, dobleces e inicia al detonador de retardo, posee en su extremo un conector tipo "J" que puede deslizarse hacia los lados, arriba y hacia abajo. En el mercado nacional se tiene en varias presentaciones, longitudes y periodos, de acuerdo a el trabajo a efectuar. (Fig.3.6)

3.3.2.6 Estopín Eléctrico

Fabricado en un casquillo de aluminio conteniendo varias cargas de pólvora, que son iniciadas por un par de alambres de metal introducidos en un tapón de hule que proporciona hermetismo contra humedad, estos alambres están puenteados y empotrados en la mezcla de ignición, al paso de la corriente se calienta e inicia la carga de ignición e inicia el núcleo de pólvora de retardo, y ésta posteriormente a la carga base, tienen en su extremo etiquetas distintivas que indican el período y longitud; tienen la potencia de un cápsul 8.

3.3.2.7 Conector de Superficie MS

Trabaja bajo el mismo principio que el nonel, con un tubo transmisor excepto que es bidireccional o sea que se puede iniciar hacia cualquier sentido, tiene dos fulminantes en los extremos del tubo, recubiertos por un tubo plástico de color y etiqueta de acuerdo a el periodo del retardador, básicamente viene en presentaciones de 17, 25, 35, 50, 65 y 100 milisegundos (ms) Figura 3.7.

3.3.2.8 Conector TH

Se usa para conexiones de thermalia o ignitacord, es un casquillo de aleación de cobre que contiene en su base una mezcla de ignición, con una ranura cercana a su base que la asegura y coloca en contacto con la mezcla, son resistentes al agua y una vez engargolados a la mecha la protegen de la humedad.

3.3.2.9 Booster

Son iniciadores de alta presión, formulados con pentolita (PETN Y TNT) no contienen nitroglicerina, son impermeables y de larga vida útil (con buen almacenamiento), pueden ser iniciados con nonel o cordón detonante, tienen una velocidad de detonación de 7925 m/seg. y densidad de 1.6 gr./cc.

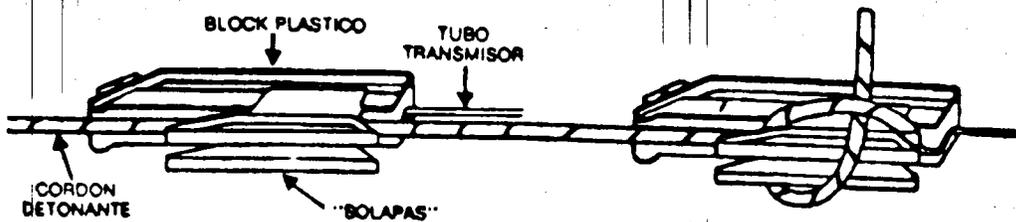


Figura 3.7 Se muestra la constitución del conector de superficie (ms)

4. SISTEMA DE INICIACIÓN NO ELÉCTRICOS

4.1. Sistemas de iniciación

Se requiere una cantidad considerable de energía para iniciar un alto explosivo como son las emulsiones, hidrogeles, etc. En las voladuras, los altos explosivos son iniciados por un detonador o fulminante. Los agentes explosivos, como el anfo, son los productos comunes utilizados como la principal carga de columna en el barreno y son mucho menos sensitivos a la iniciación que los altos explosivos. Para iniciar estos productos, el iniciador es puesto dentro de un alto explosivo, el cual a su vez, se coloca dentro de la columna del agente explosivo. El nombre común que se utiliza en los sistemas necesarios para iniciar los explosivos es el **sistema de iniciación**.

Estos sistemas son requeridos para hacer explotar varias cargas, en numerosos barrenos separados en una secuencia predeterminada de tiempos de retardo, la cual es diseñada para proveer óptima fragmentación y un mínimo de vibración del suelo y golpe de aire.

Un sistema de iniciación es una combinación de dispositivos explosivos y componentes accesorios diseñados para transmitir una señal e iniciar una carga explosiva, desde una distancia segura y cuando es deseado. La señal de iniciación puede ser eléctrica o no eléctrica.

4.1.2 Historia

En los primeros años de 1800, cuando las voladuras se realizaban utilizando pólvora negra, no existía un método estándar que fuera seguro para iniciar la pólvora negra, lo que ocasionaba accidentes, con frecuencias fatales.

Fue hasta 1831, cuando el inglés William Bickford desarrolló y patentó la "Mecha de Seguridad de Mineros". En 1836, Richard Bacon en Simsbury, Connecticut, importó mecha producida por Bickford y se asoció posteriormente con él para formar la primera compañía fabricante de mechas en América, firma que actualmente es líder mundial en fabricación de sistemas de iniciación no eléctricos.

En 1860, la nitroglicerina era el principal explosivo utilizado, pero no era confiablemente iniciado mediante la flama de una mecha de pólvora negra, Alfred Nobel intentó sin éxito iniciar diferentes mezclas de pólvora negra y nitroglicerina líquida, usando mecha de pólvora negra. En 1864, encontró que depositando una pequeña carga de pólvora negra molida dentro de una cápsula cerrada de madera y conduciendo la mecha a través de un ajustado agujero en la cápsula (Figura 4.1), podía realmente iniciar la nitroglicerina. Nobel pronto se dio cuenta que el choque de la cápsula al explotar era un factor importante en la iniciación confiable de la nitroglicerina. La cápsula de madera fue el primer paso que hizo época en la invención del detonador y marcó el punto de partida al uso de altos explosivos en las voladuras de roca.

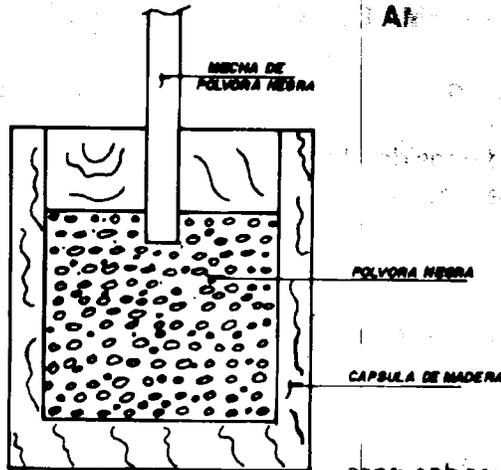


Figura 4.1 Primer fulminante utilizado para iniciar nitroglicerina.

En 1865, Nobel patentó el uso de una pequeña cantidad de un explosivo primario, el fulminato de mercurio, prensado dentro de una cápsula de cobre y engargolado a la mecha. El fulminato tiene la propiedad de pasar de un estado de combustión al de detonación rápidamente. En 1895, se introdujo el primer detonador de retardo iniciado eléctricamente. Después, en 1913, principia el uso del cordón detonante.

En la actualidad continúa el concepto, de utilizar una combinación de explosivos primarios y secundarios en los detonadores. La energía de iniciación puede ser transmitida al detonador de varias maneras, con el fin de iniciar una carga primaria, como la azida de plomo. Al detonar la carga primaria inicia la detonación de la carga base, normalmente explosivos secundarios relativamente sensitivos como son PETN, Tetryl, RDX/TNT (Figura 4.2).

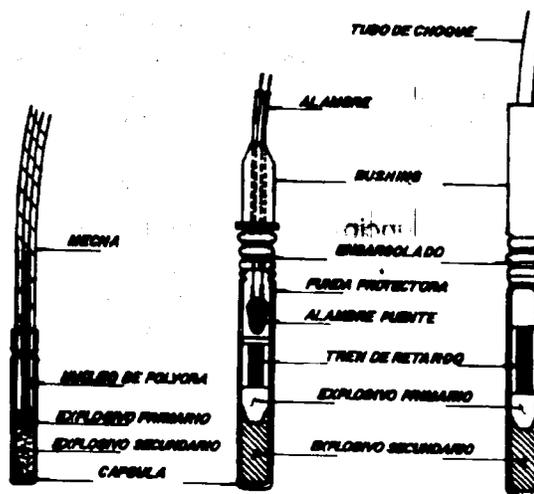


Figura 4.2 Detonadores : a) detonador ordinario iniciado por mecha; b) detonador eléctrico de retardo; c) detonador no eléctrico de retardo.

Actualmente se han desarrollado retardos pirotécnicos con índices de combustión de alta precisión. La experiencia práctica ha guiado hacia el desarrollo de los tiempos de retardo más apropiados para diferentes aplicaciones específicas. En los años 1950's, la introducción del retardo-corto o retardo de milisegundo, con 25 ms de intervalo, ayudó enormemente a controlar el proceso de voladuras. Con este dispositivo fue posible minimizar vibraciones y rocas en vuelo mientras simultáneamente mejoraba la fragmentación. La dispersión con retardos pirotécnicos se mantiene dentro de 1,5 a 3,0% de los tiempos nominales de retardo, la última generación de detonadores son los electrónicos, que pueden ser fabricados con dispersión de sub milisegundo en el retardo. La figura 4.3 muestra como la dispersión en los tiempos de disparo ha disminuido con la introducción sucesiva de sistemas de detonadores cada vez más refinados.

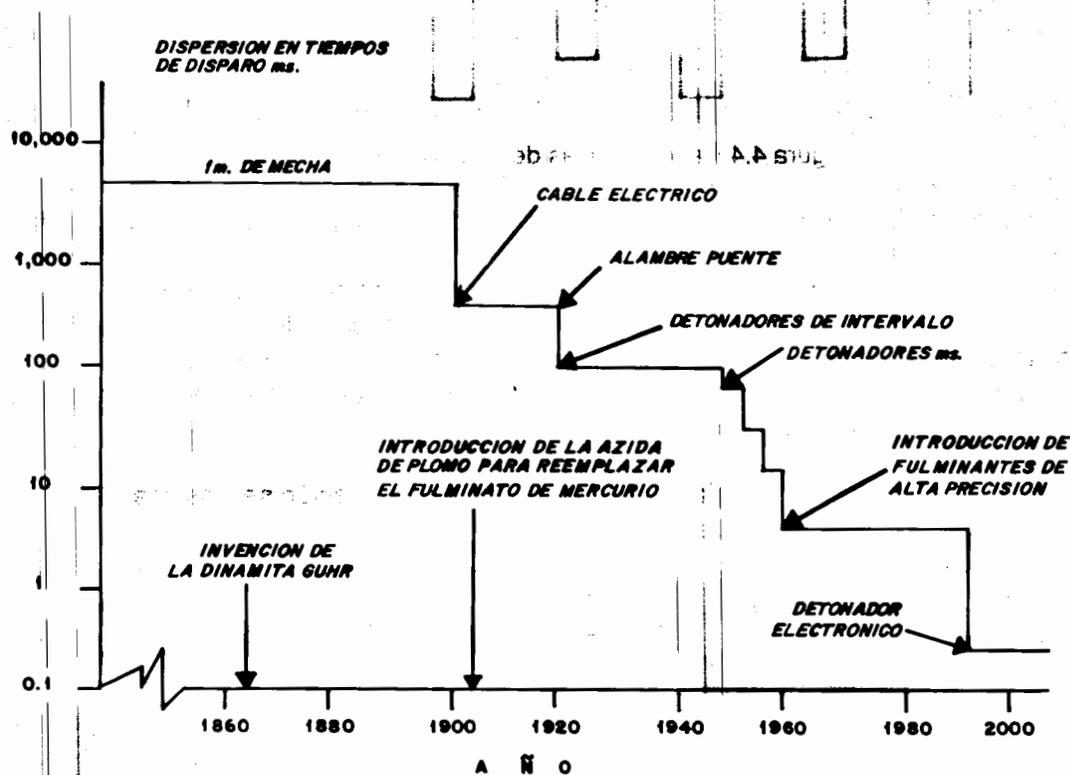


Figura 4.3 Dispersión histórica de los detonadores

4.1.3 Clasificación de los Sistemas de Iniciación

Un sistema de iniciación consiste de 3 partes básicas:

- 1.- Una fuente de energía inicial.
- 2.- Una red de distribución de energía hacia cada uno de los barrenos.
- 3.- Un componente dentro del barreno que usa la energía de distribuida por la red para iniciar un explosivo sensible al fulminante (Figura 4.4).

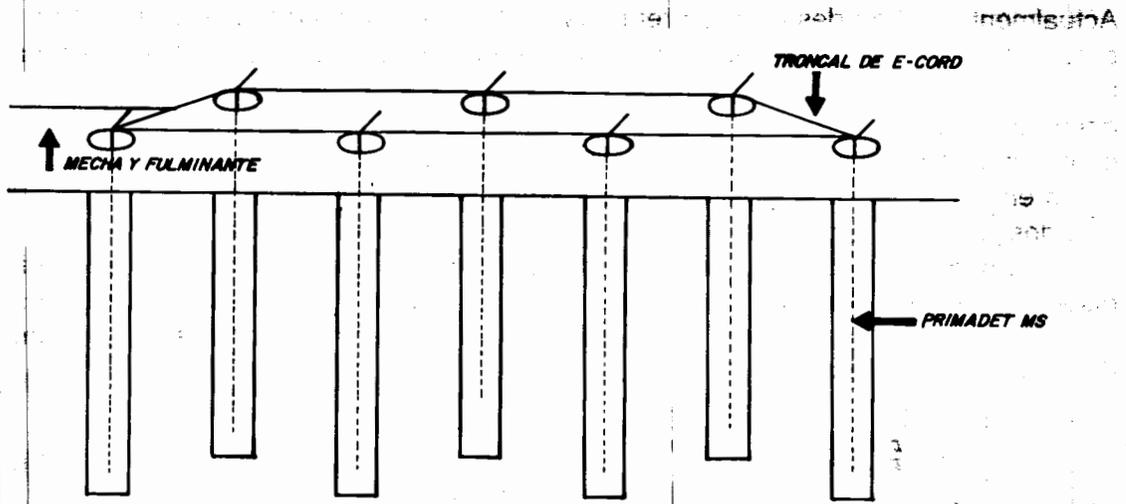


Figura 4.4 Partes básicas de un sistema de iniciación.

La fuente inicial de energía puede ser eléctrica, tal como un generador o condensador, asociado con circuitos de cables que llevan la energía a los detonadores. Los sistemas de iniciación no eléctricos utilizan varios tipos de reacciones químicas varando de la deflagración (mecha) a la detonación (cordón detonante), con detonación de baja energía de polvos (tubo de choque), como un medio para llevar el impulso a los detonadores, que son el componente dentro del barreno. Los detonadores comerciales disponibles son de potencia y se encuentran en los números 6, 8, 12.

Atendiendo a la fuente de energía inicial los sistemas de iniciación se clasifican en Eléctricos, No Eléctricos y Electrónicos (el sistema del futuro inmediato) Figura 4.5.

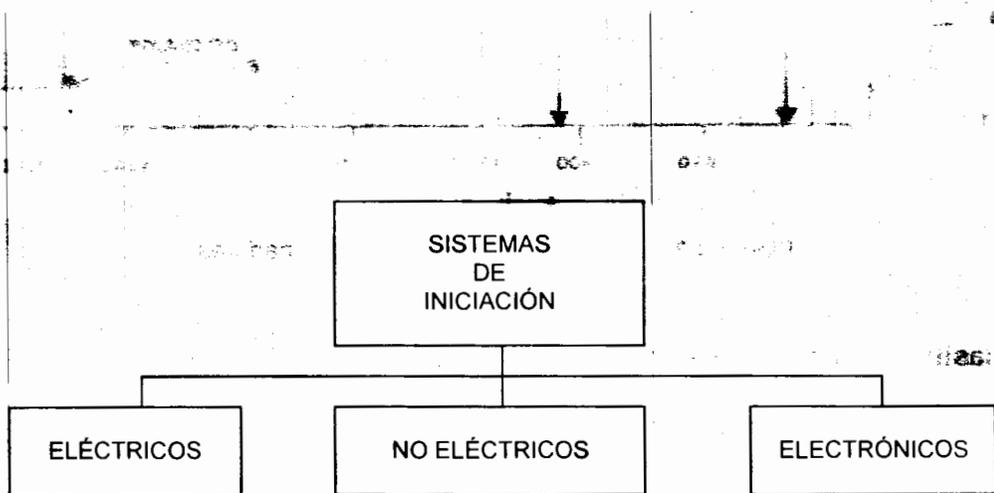


Figura 4.5 Clasificación de los sistemas de iniciación

Los sistemas de iniciación no eléctricos (tubo de choque principalmente) han desplazado, a través de los años, a los sistemas de iniciación eléctricos, de forma tal que su empleo es cada vez menor (Figura 4.6).

**EVOLUCIÓN DE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA
EN LOS SISTEMAS DE INICIACIÓN
(Ejemplo: Suecia)**

AÑO	CON MECHA	ELÉCTRICA	NO ELÉCTRICA
1944	95%	5%	
1954	77%	23%	
1970	17%	83%	
1974	11%	89%	
1985	6%	57%	37%
1990	3%	17%	80%
1995	1%	5%	94%

Figura 4.6 Evolución en la aplicación de los sistemas de iniciación.

4.1.4 Dispositivos de iniciación no eléctricos disponibles en México.

Existen muchas condiciones, tales como las que se describen a continuación, en una operación que influyen en la selección de un sistema de iniciación apropiado:

1. Tipo de explosivos usados. Los sistemas de iniciación que utilicen líneas descendentes de cordón detonante pueden iniciar altos explosivos o causar deflagración de explosivos menos sensitivos.

2. Temperatura de barreno. Las temperaturas superiores a 65 °C pueden requerir productos especiales.

3. Geología. El sistema de iniciación deberá estar totalmente activado antes que comience el movimiento de roca y ocasione cortes o fallas.

4. Presión Hidrostática. Las presiones muy altas pueden requerir productos especiales.

5. Restricciones ambientales. El sistema, y la secuencia de retardo deben ser escogidos de acuerdo a las limitaciones de vibraciones, ruido, etc.

6. Electricidad externa. Los detonadores eléctricos son susceptibles de detonar accidentalmente debido a corrientes externas (electricidad estática, tormentas eléctricas, líneas de alto voltaje, ondas de radio de alta frecuencia, etc).

Actualmente los dispositivos de iniciación no eléctricos disponibles en México son los mostrados en la figura 4.7.

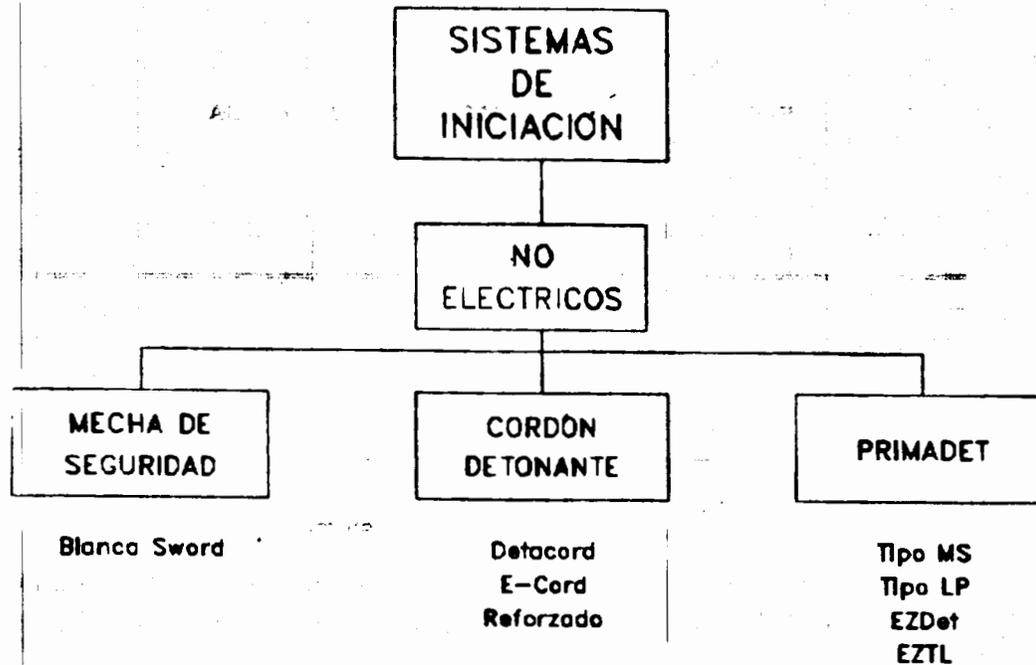


Figura 4.7 Sistemas de iniciación disponibles en México.

4.2 Mecha de seguridad

La mecha de seguridad "sword" es un medio para transmitir el fuego a un fulminante o detonador a una velocidad continua y uniforme.

4.2.1 Características

Por su construcción la mecha está protegida contra la abrasión, el maltrato y la humedad. Consiste de un núcleo de pólvora negra, rodeado de fibras textiles y materiales impermeabilizantes contenidos en una cubierta de plástico extraído para evitar la penetración lateral del agua.

El tiempo de combustión de un metro de mecha, en la planta, es de 135 segundos con una variación de más o menos 10%. Debido a que son muchos los factores que pueden afectar la velocidad de combustión de la mecha después que sale de la fábrica, tales como su edad, las condiciones de almacenamiento, las diferencias de altura sobre el nivel del mar, el grado de confinamiento dentro de los barrenos, etc., se recomienda al usuario verificar en cada rollo el tiempo de combustión por metro de mecha en su localidad.

4.2.2. Corte y engargolado

La preparación del ensamble mecha-fulminante es una de las tareas más importantes para lograr una iniciación exitosa. Debe encomendarse únicamente a personas responsables y debidamente entrenadas, que apliquen fielmente las siguientes instrucciones:

1. Evite que la mecha y los fulminantes estén expuestos en forma prolongada a un ambiente húmedo, ya sea durante su almacenamiento, transporte o preparación. La humedad puede introducirse dentro del núcleo de pólvora por los extremos descubiertos de la mecha, haciendo difícil o imposible encender la mecha o que emita el flamazo final. Con la humedad los fulminantes pueden fallar.
2. Examine la mecha para comprobar si no se ha dañado su impermeabilidad antes de usarla.
3. Siempre que use un carrete nuevo o inicie la operación de corte y engargolado, corte dos pulgadas de los extremos de la mecha para asegurarse de que éstos se encuentren completamente secos.
4. La herramienta con que se corte la mecha deberá estar limpia y filosa.
5. Haga todos los cortes en escuadra e inserte la mecha en el fulminante inmediatamente después de haberla cortado, asegurándose que haga buen contacto con la carga de éste antes de engargolarlo (Figura 4.8). Un corte en escuadra o transversal asegura el contacto de la pólvora de la mecha con el explosivo primario del fulminante.

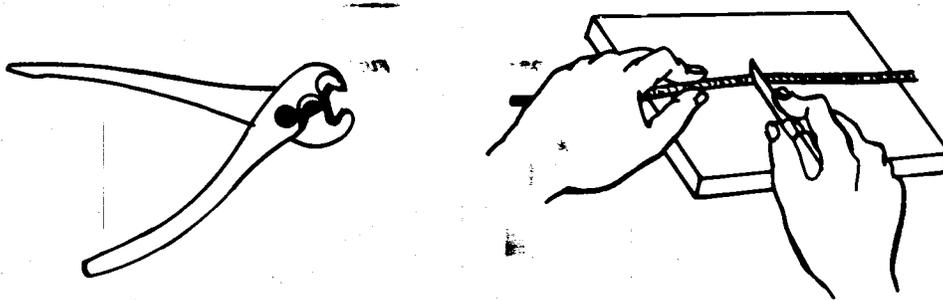


Figura 4.8 Corte en escuadra de la mecha "sword".

Si no se corta la mecha en escuadra o se inserta hasta el fondo, habrá fallas en la iniciación por cualquiera de las razones siguientes:

- a) El corte diagonal impedirá el contacto entre el núcleo de pólvora y la carga iniciadora del fulminante cubriendo la carga iniciadora del mismo.

b) El corte diagonal (o hecho con una herramienta sin filo) puede doblarse al insertar la mecha dentro del fulminante cubriendo la carga iniciadora del mismo.

c) Al no introducir la mecha hasta el fondo del fulminante, se deja un hueco que impedirá que el flamazo final de la mecha haga contacto con la carga de éste. La figura 4.9 ilustra las incorrecciones y el método correcto de corte y engargolado.

6. El engargolado deberá realizarse con la herramienta apropiada como son las pinzas manuales de corte-engargolado o la máquina cortadora-engargoladora. Jamás use pinzas normales, navajas o sus dientes para engargolar.

7. Siempre utilizar doble mecha con fulminante para asegurar la iniciación y a longitud de las mechas empleadas deberá ser suficiente para que proporcione al personal el tiempo necesario para desplazarse a un lugar seguro antes que destone.

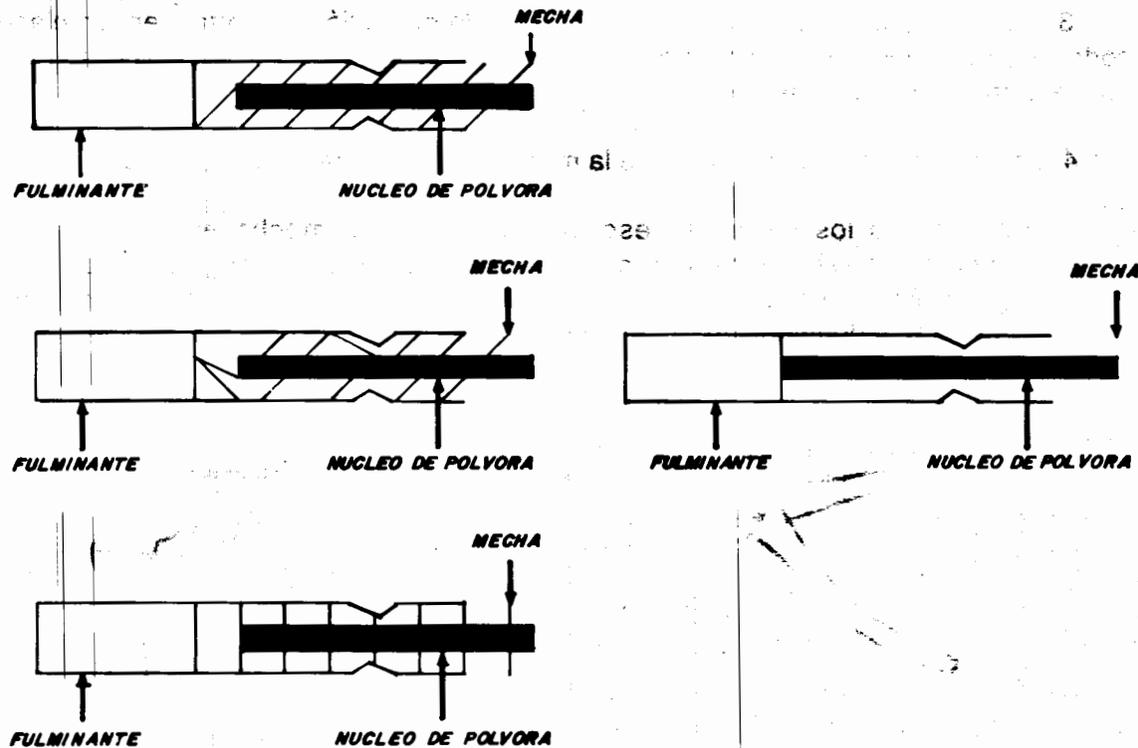


Figura 4.9 Incorrecciones y método correcto en el corte y engargolado de la mecha

4.2.3 Cebado

El fulminante debe insertarse sin esfuerzo en el interior del cartucho. El fulminante deberá estar centrado dentro del cartucho y completamente rodeado de la masa explosiva (Figura 4.10); evite insertar el fulminante en diagonal o pegado al empaque del cartucho, debido al efecto direccional del fulminante.

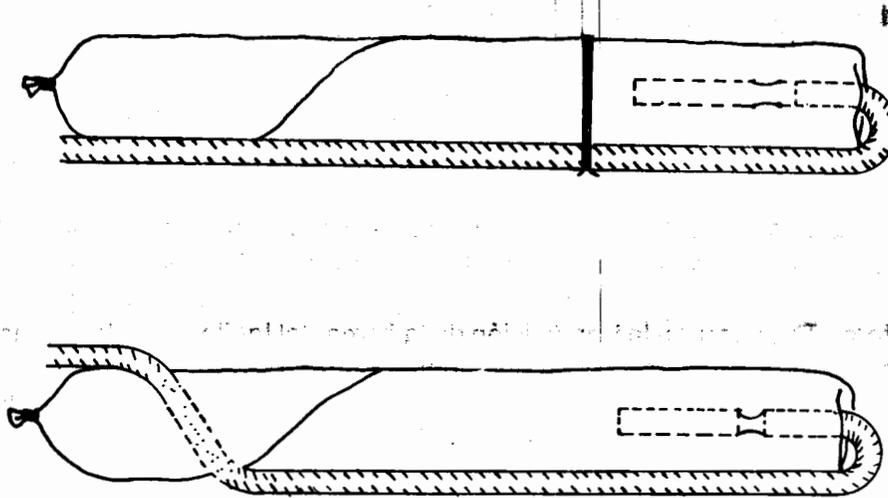


Figura 4.10 Cebado recomendado.

4.2.4 Encendido

Cuando arde la mecha, el fuego queda encerrado dentro de la estructura de la misma y sólo emerge en cada extremo con pequeños chorros de flama; el flamazo inicial y final. El flamazo inicial es muy importante, pues comprueba al usuario que el núcleo de pólvora ha sido encendido y que la mecha está ardiendo. No se debe intentar el uso de la mecha a menos que el operario haya sido entrenado debidamente y por experiencia propia sepa encender la mecha o identificar el flamazo inicial bajo cualquier circunstancia.

Cerillo

La figura 4.11 ilustra un método para encender una mecha que consiste en realizar un corte al extremo de la mecha a iniciar, posteriormente cortar la cabeza de un cerillo colocándola dentro de la hendidura y por último encenderla con otro cerillo. Se recomienda practicar el encendido de la mecha, cualquiera que sea el método utilizado con tramos cortos de mecha desprovista de fulminantes y aprender a identificar el flamazo inicial.

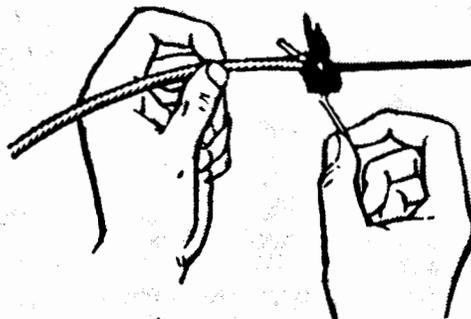


Figura 4.11 La cabeza de cerillo, colocada en la hendidura, será encendida con otro cerillo, encendiéndose de esta manera el núcleo de pólvora.

Ignitacord

El Ignitacord es a la vez un mecanismo de ignición y de retardo. Está constituido por alambre flexible recubierto con un compuesto inflamable que arde a una velocidad uniforme, produciendo una flama vigorosa y con intensidad más que suficiente para encender los conectores Th engargolados a la mechas. Permite encender todas las mechas de una barrenación en un orden determinado, eliminando el encendido individual; se deberá abandonar el área de la voladura tan pronto como el circuito ha sido encendido. El Ignitacord Tipo "A", color verde, arde a una velocidad aproximada de 25 m/s.

Los conectores Th aseguran la transmisión de la flama del Ignitacord a la mecha. El conector es un casquillo de aleación de cobre que contiene en su base una mezcla de ignición. La ranura cercana a su base (extremo cerrado) permite asegurar y colocar el Ignitacord en contacto con la mezcla de ignición (Figura 4.12). Los conectores son resistentes al agua y una vez engargolados a la mecha la protegen contra la humedad.

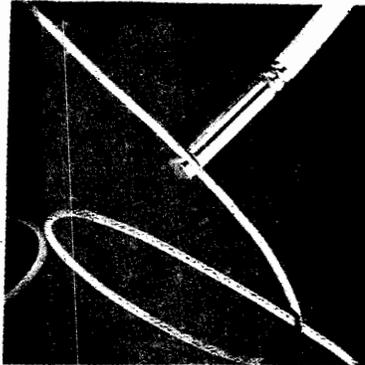


Figura 4.12 Ignitacord y conectores Th

Distancia Máxima

Para prevenir daños al Ignitacord antes que haya ardido completamente y a la porción de mechas fuera de los barrenos, todas las mechas deberán estar iniciadas y ardiendo dentro de los barrenos antes que el primero detone.

Existe una relación entre la velocidad de combustión de la mecha y la del ignitacord, que puede ser utilizada para calcular la máxima longitud de ignitacord, que satisficará la condición de que las mechas ardan dentro de los barrenos antes de la primera detonación.

La velocidad de combustión del Ignitacord puede ser expresada como múltiplo o "factor de velocidad" de la mecha, es decir: el Ignitacord tipo "A" arde aproximadamente 5 veces más rápido que la mecha Sword.

Regla

La distancia máxima de Ignitacord es la longitud de mecha dentro del barreno multiplicada por el "factor de velocidad" del ignitacord utilizado.

Esta distancia máxima no representa la longitud máxima de recorrido que tiene que seguir la combustión, a lo largo del circuito de ignitacord para encender la mecha del último barreno.

4.2.5 Conexiones con Ignitacord

La flama del Ignitacord es tan intensa que se transmite fácilmente entre líneas que estén en contacto. Sin embargo, para asegurar la transmisión del fuego de un lado a otro, aún en las condiciones más adversas, las conexiones deben tener longitudes de contacto adecuadas. Háganse las conexiones cuando menos con cinco vueltas completas, tanto en tramos rectos como en ramales (Figura 4.13)

El ignitacord no se debe cortar utilizando métodos que puedan causar calor friccionar suficiente para encenderlo prematuramente. Para seccionarlo se debe usar una navaja con buen filo o pinzas para cortar alambre que estén en buen estado.

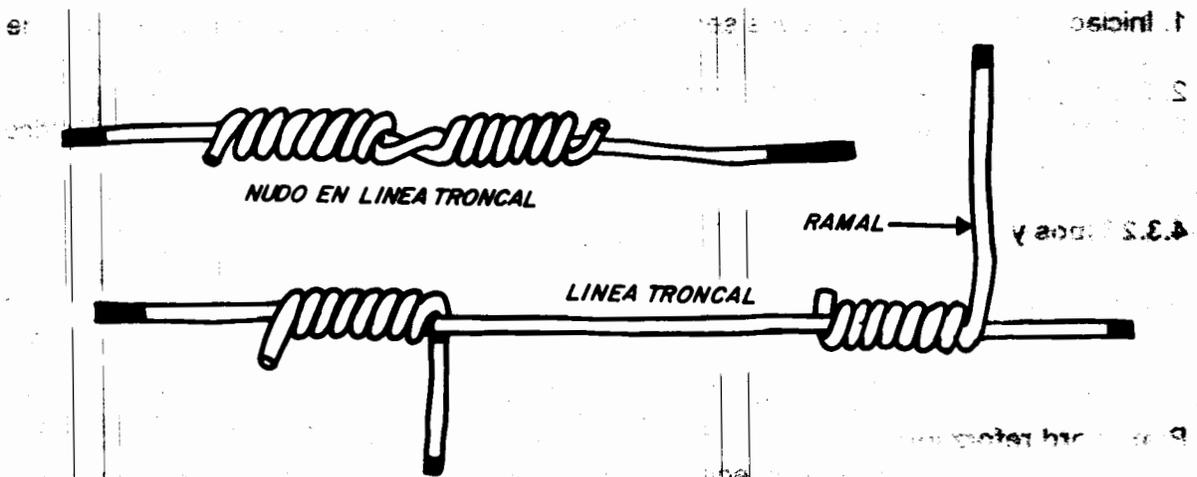


Figura 4.13 Conexiones con Ignitacord

4.2.6. Red de Ignitacord

Para conectar barrenaciones en túneles se recomienda el circuito de Ignitacord en "X", consistente en dos tramos unidos frente a la cuña, como se muestra en la figura 4.14.

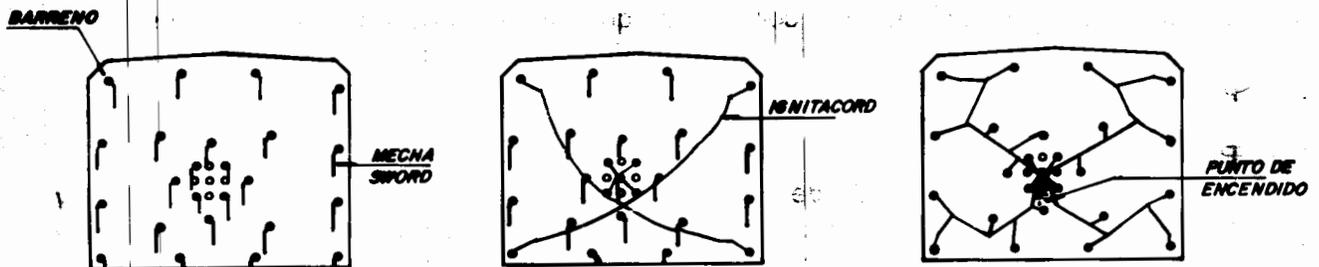


Figura 4.14 Red de Ignitacord en "x"

4.3 Cordón detonante

El Primacord es un cordón detonante (explosivo) redondo, flexible y muy resistente, contiene un núcleo de alto explosivo PETN (Tetranitrato de Pentaeritrilo) dentro de una chaqueta plástica rodeada de fibras textiles por lo que es impermeable. Su velocidad de detonación es de 7000 m/s.

4.3.1 Función

Cuando detona, el Primacord tiene en toda su extensión la energía iniciadora de un fulminante ordinario, por lo tanto puede utilizarse para cualquiera de los siguientes propósitos:

1. Iniciación directa de explosivos sensibles al fulminante, en cualquier punto a lo largo de su longitud.
2. Propagación de la onda de detonación de un cordón detonante a otro.
3. Transmisión de la onda de detonación del cordón detonante a un iniciador no eléctrico de retardo, como el Primadet.

4.3.2 Tipos y características

Actualmente son tres los tipos de cordón detonante utilizados en México y sus principales características se ilustran en la figura 4.15. Las aplicaciones más usuales son descritas a continuación:

Primacord reforzado

Es un producto de uso general, puede utilizarse como línea troncal y descendente en severas condiciones de aplicación. Puede iniciar a cualquier explosivo sensible al fulminante 6 con el que esté en contacto adecuado. Acepta detonación de otros cordones y transmite de manera similar utilizando nudos estándar.

Primacord E-Cord

Se distingue del cordón reforzado por su menor contenido de explosivo, pero tiene todas las características básicas de seguridad y funcionamiento de éste, puede utilizarse para plasteos y moneos, como línea troncal descendente y como troncal para iniciar Primadets. Recibe y transmite la onda de detonación de otros cordones. En condiciones críticas, como barrenos llenos de agua u otras condiciones que afectarán adversamente la sensibilidad del cebo o que impidiesen el contacto necesario del E-Cord al cebo, la energía iniciadora pudiera no ser suficiente por lo que sería conveniente usar reforzado.

Primacord Detacord

Debido a su menor contenido de PETN en el núcleo tiene menor poder de iniciación y produce menos ruido que los otros cordones. No se recomienda para iniciar directamente explosivos. Puede ser utilizado como línea descendente y troncal para iniciar Primadets. Recibe y transmite la onda de detonación del cordón reforzado y del E-Cord a través de los nudos recomendados.

TIPOS DE PRIMACORD

PETN - TETRANITRATO DE PENTAERITRITOL

REFORZADO



NUCLEO	GRANOS POR P.	GRAMOS POR m.	RESISTENCIA EN TENSION	PRESENTACION
PETN	50	10.6	90 Kls.	500 m.

E - CORD



NUCLEO	GRANOS POR P.	GRAMOS POR m.	RESISTENCIA EN TENSION	PRESENTACION
PETN	25	5.3	68 Kls.	700 m.

DETACORD



NUCLEO	GRANOS POR P.	GRAMOS POR m.	RESISTENCIA EN TENSION	PRESENTACION
PETN	18	3.8	63 Kls.	800 m.

Figura 4.15 Tipos de cordón detonante Primacord

4.3.3 Principios básicos para su uso

En esta sección se describen los principios fundamentales de la forma como se deben fijar los detonadores al cordón, para hacer conexiones en líneas descendentes y troncales, etc.

Corte del cordón

Los cortes del cordón detonante deben realizarse con una navaja filosa. Nunca debe realizarse un corte con un golpe de navaja o cualquier objeto romo, tal como un hacha, piedra, etc., tampoco se debe aserrar ya que puede explotar prematuramente.

Iniciación

El cordón detonante ha sido diseñado para ser iniciado con un detonador Primadet, un estopín eléctrico o un doble ensamble de mecha y fulminantes ordinarios. El método más sencillo para el detonador es colocarlo a un lado del cordón en el lugar deseado y sujetarlo firmemente con cinta de aislar. Se deberá tener cuidado para que el extremo del fulminante donde está la carga explosiva, apunte en la dirección en que se desea se transmita la onda

de detonación. Recuerde que el efecto del fulminante es direccional y el cordón pudiera no iniciarse en la dirección contraria. Para mayor seguridad, los fulminantes se fijan a tramos cortos de cordón, los cuales pueden anudarse posteriormente a la red de cordón detonante muy poco tiempo antes del disparo; este sistema permite además la detonación de la línea troncal en ambos sentidos cuando así se desea. Es igualmente importante que el núcleo explosivo esté seco en el lugar en donde se fije el fulminante.

Efecto del agua sobre el cordón

El Primacord es mucho menos sensitivo cuando está mojado que cuando está seco. Sin embargo, una vez que ha sido iniciado, la detonación se propaga normalmente en tramos continuos de cordón, ya sea que esté seco o mojado. Si el PETN llega a mojarse, ya sea debido a daños en las cubiertas impermeabilizantes o penetración capilar por un extremo, no se puede iniciar con seguridad usando el cebado lateral. Además, el cordón mojado no puede ser iniciado con conexiones de nudos, ni se puede asegurar que el cordón se propague a través de dichas conexiones. (Figura 4.16)

Los extremos de cordón que están en contacto con el agua absorben humedad por acción capilar y deben cortarse si es posible. El iniciado del extremo mojado del cordón se asegura únicamente usando el llamado "cebado terminal", el cual exige que el extremo mojado esté cortado en escuadra y que la base del detonador esté en contacto con la pentrita mojada. El fulminante y el cordón se encintan fuertemente en esa posición, figura 4.17.

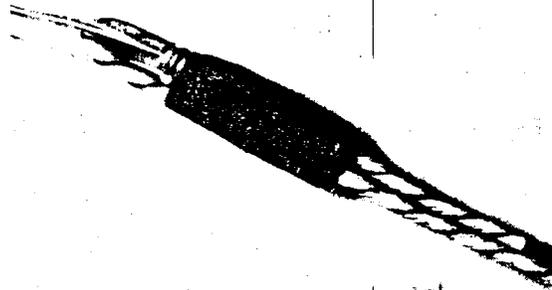


Figura 4.16 (a) Iniciación del cordón detonante.

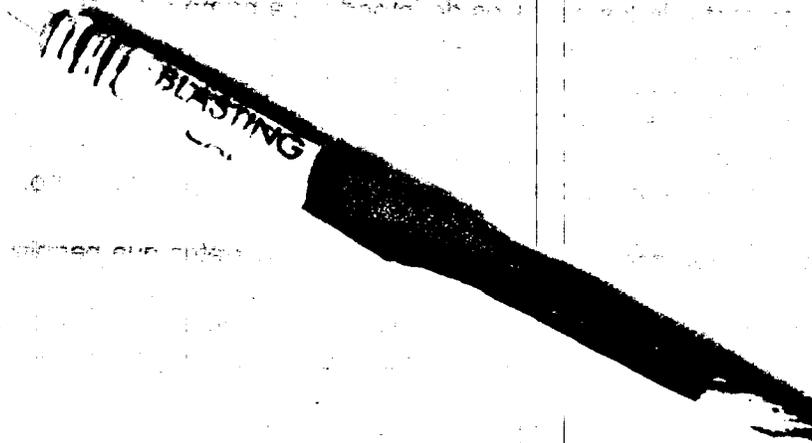


Figura 4.16 (b) Cuñas piramidales.

Conexiones

La experiencia a través de muchos años ha demostrado claramente que el uso de conexiones adecuada y comprobadas es esencial para un funcionamiento seguro. Las conexiones del cordón generalmente se hacen con nudos.

El nudo "cuadrado" se recomienda para unir líneas continuas de cordón tal como las líneas troncales. El nudo deberá ser hecho varios centímetros atrás de "las colas". (Figura 4.18) Para conectar descendentes a troncales se utiliza el nudo "de trébol" o el doble nudo de trébol. Figuras 4.18 y 4.19.

Todas las conexiones hechas con nudo deberán quedar bien apretadas. También, es importante que las líneas conectadas por medio del nudo formen un ángulo que se aproxime al recto hasta donde sea posible. Si la línea descendente forma un ángulo agudo con el lado de la línea troncal de donde procede la detonación, puede ser cortada la línea descendente sin ser detonada.

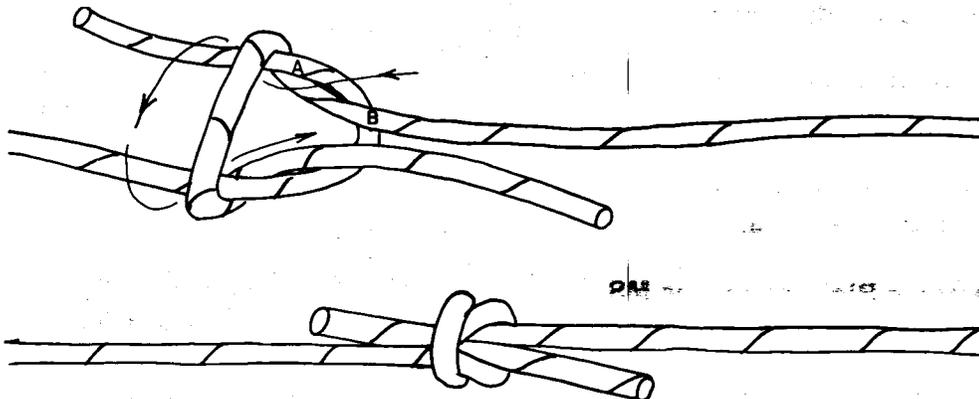


Figura 4.17 Nudo cuadrado.

4.3.4. Cebado, Cargado y Conexión.

Cebado

La preparación correcta de los cebos es de importancia primordial para el funcionamiento eficaz de una voladura. Lo anterior es esencial al ensamblar cebos cuando las cargas principales son de explosivos o de agentes explosivos no sensitivos a los fulminantes. Sea cual fuere el explosivo que se emplee, es conveniente que el cordón llegue al fondo del barreno. Por esta razón es necesario asegurarlo debidamente al primer cartucho o cebo mediante varias vueltas, con cordón bien apretado a lo largo del cartucho.

Se recomienda, para facilitar su manejo utilizar un portacarretes que permitirá desenrollar el cordón detonante sin que se formen "cocas" al bajarlo al interior del barreno. Antes de cortar la línea descendente del carrete, es necesario medirla para asegurarse de que el cartucho cebado efectivamente haya llegado al fondo del barreno y de que no se haya atorado en el camino.

Cargado

Después de que el cebo esté en su posición y antes de seguir adelante en el proceso de cargar el barreno, deberá cortarse del carrete la línea descendente del cordón. Cuando menos un tramo de cordón de 60 cm a un metro, que deberá quedar fuera de la boca del barreno, dicho tramo será de utilidad por si el barreno llega asentarse y para hacer conexiones a la troncal. El extremo de la línea descendente deberá asegurarse firmemente y conservarse tirante mediante una roca.

La carga de columna puede ahora bajarse al interior del barreno, si se utiliza anfo deberá tenerse en cuenta el efecto del cordón detonante sobre éste. Si toda la carga de la columna es de explosivo sensible al fulminante, puede asegurarse la detonación total de la carga introduciendo el cordón a través del eje longitudinal de cada cartucho, pero debe tenerse en cuenta que la iniciación será desde arriba y no del fondo.

En los casos en los que se utiliza uno o más tacos intermedios, pudiera ser necesario utilizar dos o más líneas descendentes. En estos casos las líneas descendentes se conservarán separadas colocarlas en lugares opuestos del barreno, para que cada una de ellas funcione independientemente.

Conexión de la voladura

Después que los barrenos hayan sido cargado y atacados, deberá desalojarse del área de trabajo de todo el equipo, cajas vacías y todo material sobrante antes de empezar a conectar el sistema. Una vez que se haya iniciado este trabajo, solamente personal autorizado deberá permanecer en el área.

Conectores Bidireccionales MS

Las técnicas de disparo con retardos cortos permiten retrasar las detonaciones de los barrenos una fracción de segundo. Este método ofrece varias ventajas sobre los disparos instantáneos, tales como la reducción de la vibración del terreno, mejor fragmentación, desplazamiento, disminución del sobre-rompimiento, etc.

Los Primadet MS, conectores Bidireccionales, son utilizados conectándose en líneas troncales, en donde el cordón detonante se sujeta a ambos extremos del retardo. Por precaución los conectores no deberán sujetarse al sistema troncal salvo inmediatamente antes del disparo. También deberán protegerse de impactos accidentales como caída de piedra u otros objetos pesados y evitarse el contacto con flamas, calor excesivo, etc.

Los Primadet MS (Conectores Bidireccionales) consisten de un tubo conductor de 18 pulgadas de longitud (45,67 cm), con dos blocks conectores en cada extremo y contienen retardos idénticos dentro de ambos fulminantes (Figura 4.19). El cordón se sujeta a cada extremo y el ensamble funcionará en cualquier dirección. En la figura 4.20 se aprecia el método sugerido para sujetar las líneas troncales a los blocks del conector MS.

Es recomendable diseñar la voladura de forma tal que la línea troncal forme un circuito cerrado y proporcione dos rutas de iniciación para cada uno de los barrenos en caso que ocurra un rompimiento en la línea. (Figura 4.21)

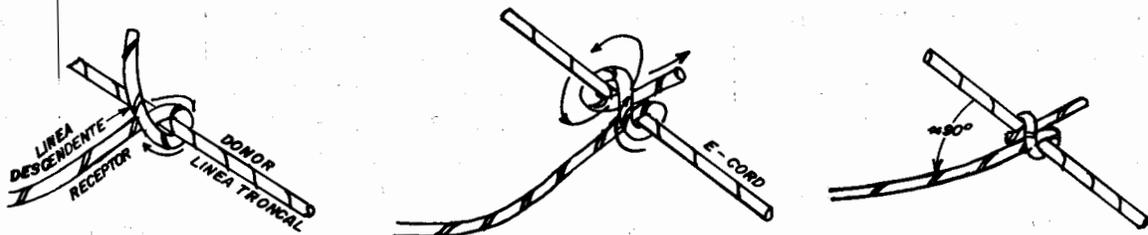


Figura 4.18 Nudo de "trébol"

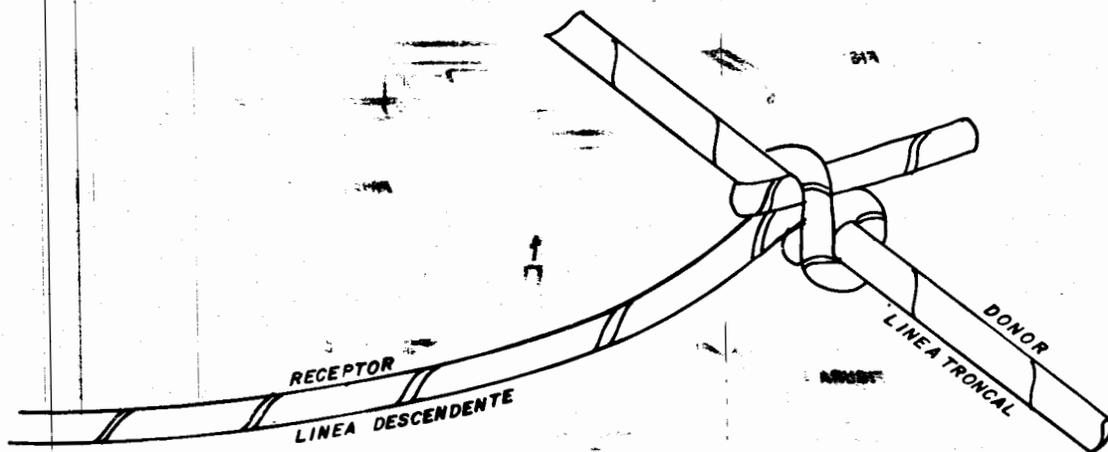


Figura 4.19 Doble nudo de trébol



Figura 4.20 Conector MS Primadets (Bidireccional)

4.3.5 Efectos de la energía liberada por el cordón detonante

Todos los explosivos sensitivos al fulminante 6 son iniciados por el cordón detonante. Los explosivos no sensitivos, como pueden ser el anfo, la emulsión y los hidrogeles, pueden afectarse de diferentes maneras por el cordón detonante que pasa a través de la columna del explosivo. Dependiendo de la energía que posea el cordón, el explosivo puede detonar o deflagrar. Una deflagración libera solamente una fracción de la energía disponible del explosivo. La voladura es subcargada debido a la poca energía liberada.

Si el cordón detonante no es de suficiente tamaño para causar una reacción en el explosivo, éste puede ser dañado. El cordón puede estar colocado en el centro o al lado y su localización controlará la severidad de los efectos. El daño resultante es llamado "muerte por presión" o "pre-compresión". La muerte por presión incrementa la densidad del explosivo y no detonará. Cuando el explosivo es parcialmente comprimido o dañado por pre-compresión, puede detonar o deflagrar liberando solamente una fracción de la energía disponible. Este efecto puede confundirse debido a que el explosivo podría consumirse totalmente generando un pequeño rompimiento de la roca. La figura 4.22 muestra la pérdida de energía en el anfo, dependiendo del diámetro de carga y del tipo de cordón detonante utilizado.

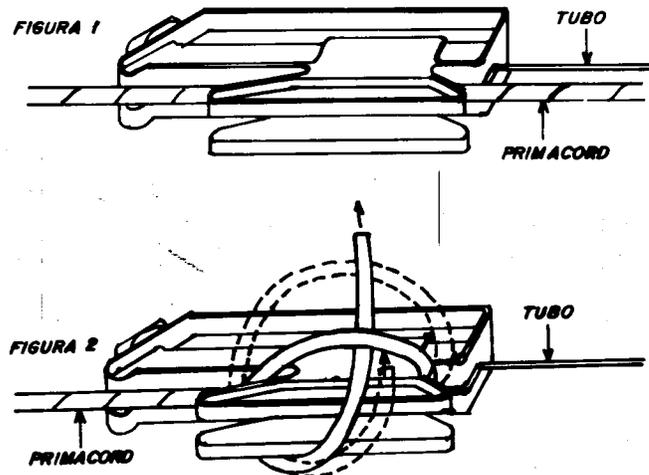


Figura 4.21 Método para sujetar la línea troncal de cordón detonante a los conectores MS

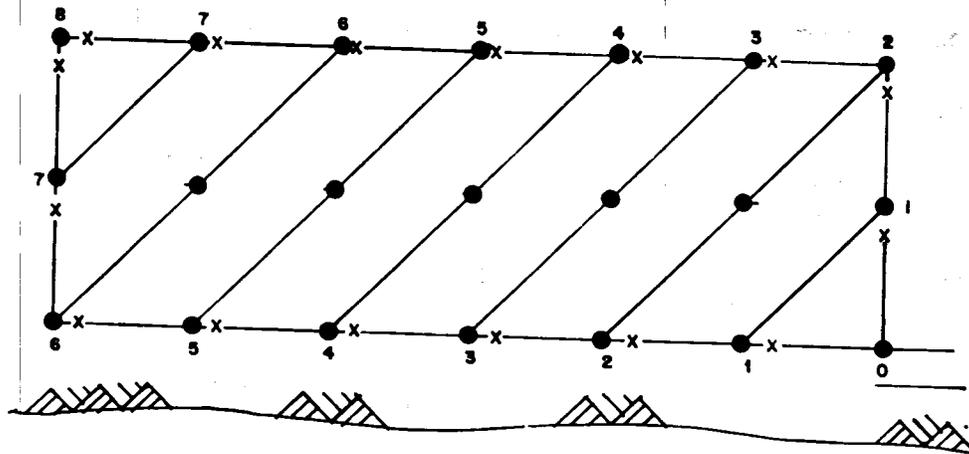


Figura 4.22 Voladura utilizando conectores ms y cordón detonante formando un circuito cerrado. Los barrenos detonarán en diagonal con retardo progresivo

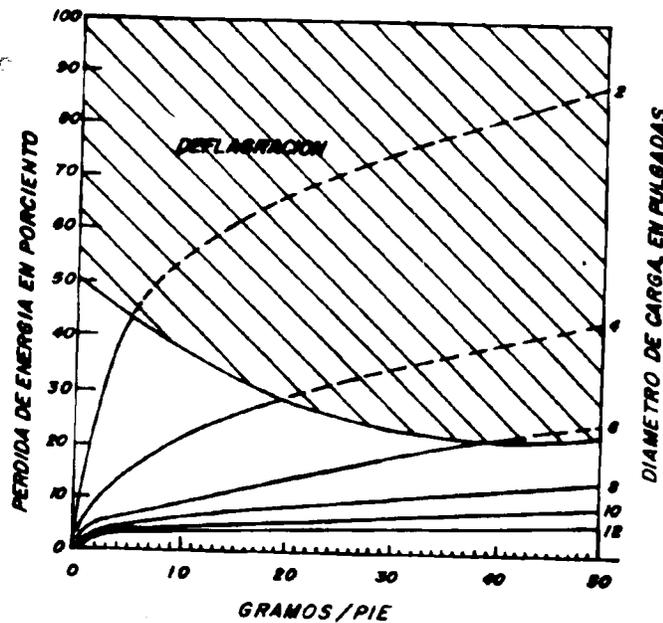


Figura 4.23 Pérdida de energía en el anfo causada por el cordón detonante.

4.4. Primadets

La utilidad del cordón detonante, en la actualidad, está limitada debido al efecto negativo que tiene sobre algunos explosivos, al ruido indeseable que produce, etc. Cuando se usan detonadores eléctricos, se debe tener mucho cuidado para asegurar el buen contacto eléctrico con los cables del detonador. El riesgo de detonación accidental prematura de una voladura por corrientes dispersas, señales intensas de radio o radar, o relámpagos o rayos es siempre posible.

En las operaciones de minado es cada vez más común utilizar el equipo electro-hidráulico para barrenación, equipo eléctrico de carga y acarreo, etc. Como consecuencia de lo anterior la demanda de iniciadores no eléctricos también se ha incrementado.

Primadet es un sistema de iniciación no eléctrico, silencioso, que transmite confiablemente la señal de iniciación a través de un tubo conductor, sin afectar al explosivo con el que esté en contacto en el barreno -hasta el fulminante con un preciso retardo pirotécnico integrado. El sistema Primadet puede ser iniciado por un "detonador de impacto", cordón detonante o mecha y fulminante ordinario.

4.4.1 Tipos

Existen, actualmente en México, cinco tipos de Primadets:

- 1.- Primadet MS con retardos en fracciones de milisegundo. Se utiliza, por lo general, en dónde existen dos caras libres como rebajes, bancos, etc. El color del tubo conductor es naranja (Tabla 4.1).
- 2.- Primadet LP con retardos en fracciones de segundo. Se utilizan, por lo general, en minería subterránea, en dónde existe una cara libre como frente, contrapozos, etc. El color del tubo conductor es amarillo (Tabla 4.1).
- 3.- Conectores MS Bidireccionales, para proporcionar tiempos de retardo del orden de milisegundos entre barrenos conectados con cordón detonante (Tabla 4.1).
- 4.- Primadet EZDet es una unidad, con retardo de fondo y superficie en milisegundos, diseñada para utilizarse en voladuras en la construcción tanto de, superficie como subterráneas. Son especialmente adecuados para emplearse en lugares en dónde se requiere disminuir los niveles de vibración y ruido ya que no se requiere utilizar cordón detonante (Tabla 4.2).
- 5.- Primadet EZTL es una línea de retardo troncal que es el complemento ideal de los EZDet, debido a que tampoco requieren el empleo del cordón detonante. Sus retardos son en milisegundos (Tabla 4.2).

Los iniciadores con retardo tipo MS y LP constan de cuatro componentes principales que son:

- Una etiqueta de color codificada que indica el número del período de que se trata, así como su tiempo nominal de detonación.
- Un gancho "J" de plástico inerte que facilita la conexión del tubo conductor con la línea troncal de cordón detonante.
- Un tubo conductor.
- Un fulminante o detonador con retardo integrado.

Estos dos últimos componentes serán descritos en las secciones siguientes.

Tabla 4.1 Periodos y tiempos nominales de disparo. Primadet tipos MS, LP y conectores MS

SUPERFICIE	EZDet	FONDO (ms)	EZTL
			RETARDO (ms)
9		350	9
17		350	17
25		350	25
33		350	33
42		350	42
25		375	100
9		700	200
17		700	
25		700	
33		700	
42		700	
200		5000	

Tabla 4.2 Tiempos de retardo disponibles. Primadet tipos EZDet y EZTL

SERIE MS		SERIE LP		CONECTORES MS	
PERIODO	RETARDO (ms)	PERIODO	RETARDO (s)	TIEMPO (ms)	
1	25	1	0,2	9	
2	50	2	0,4	17	
3	75	3	0,6	35	
4	100	4	1,0	42	
5	125	5	1,4	50	
6	150	6	1,8	65	
7	175	7	2,4	100	
8	200	8	3,0		
9	250	9	3,8		
10	300	10	4,6		
11	350	11	5,5		
12	400	12	6,4		
13	450	13	7,4		
14	500	14	8,5		
15	600	15	9,6		

4.4.2 Tubo Conductor

El tubo conductor es de diámetro pequeño, de plástico laminado, cubierto por una pequeña capa de material reactivo, se utiliza únicamente 454 gr por cada 30,48 m de tubo. Cuando éste es iniciado, transmite una señal de baja energía a una velocidad de 2000 m/s. Esta señal es en forma de ondas de choque a través del aire, en el interior del tubo, soportada por la reacción química del material reactivo mediante calentamiento y la expansión de los productos gaseosos de la reacción. Esta reacción se propaga a través de dobleces agudos, nudos o torceduras en el tubo conductor, dejando intacta la superficie exterior del tubo, por lo que no deflagrará ni detonará ningún tipo de explosivo comercialmente disponible con el que esté en contacto. La señal es silenciosa.

El diámetro exterior del tubo es de 0,30 cm y tiene una resistencia mínima a la tensión de 20 kg y una elongación mínima de 300%.

El tubo no puede ser iniciado por transmisiones de radio de alta frecuencia, energía estática o errática, flama, calor o impacto generado en las operaciones NORMALES de minado. Sin embargo, el detonador es por mucho más sensitivo a esas condiciones. El tubo conductor requiere de una mezcla de calor e impacto para ser iniciado, que puede proporcionarse por cualquier detonador comercial disponible. Se utiliza el cordón detonante Primario tipos E-Cord o Detacord para iniciar los tubos conductores debido a que poseen en toda su longitud energía iniciadora que actúa como un fulminante continuo y debido a su alta velocidad se considera, para propósitos prácticos, como un iniciador instantáneo de los tubos (Figura 4.24).

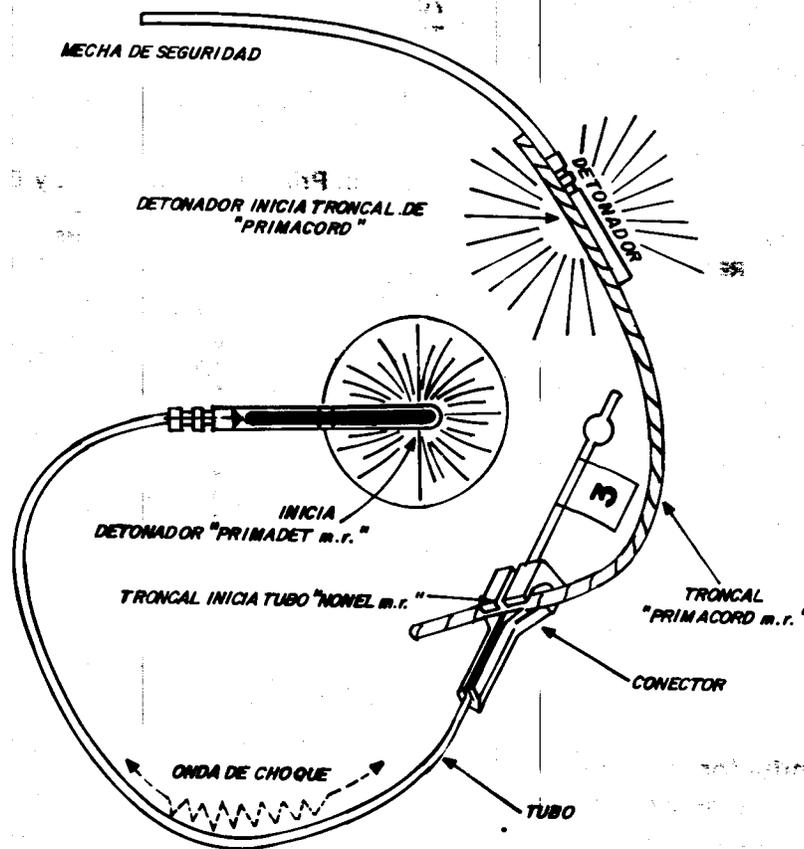
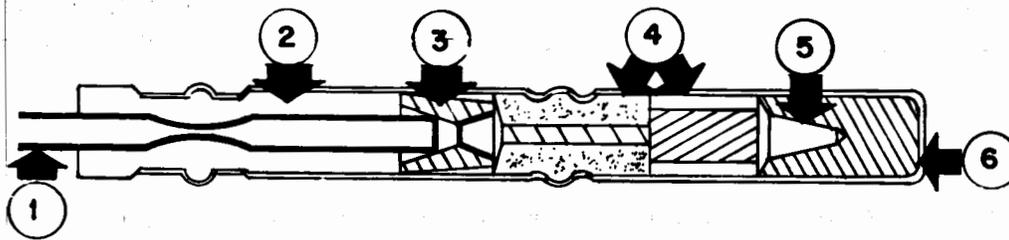


Figura 4.24 Iniciación del sistema Primadet

4.4.3 Fulminante de retardo

Los componentes de un fulminante Primat se muestran en la figura 4.25. Donde se observa que la onda de choque que viaja a través del tubo conductor perfora el tazón antiestático, iniciando a los compuestos pirotécnicos que conforman el tren de retardo, posteriormente inicia a la carga primaria que es azida de plomo y esta a su vez detona la carga secundaria, PETN, que continúa con la cadena de iniciación, el iniciar al explosivo con que está en contacto.



- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1.- TUBO CONDUCTOR | 4.- TREN DE RETARDO |
| 2.- BUSHING | 5.- AZIDA DE Pb. |
| 3.- TAZON | 6.- PETN |

Fig. 4.25 Fulminante Primadet.

Los fulminante de los Primadet tipos MS, EZDet y conectores MS tienen una potencia 8 y el tipo LP tiene una potencia 12. Es importante recordar que los fulminantes son sensibles al calor, fricción o impacto, por lo que deberá evitarse su maltrato.

4.4.4 conector plástico de retardo

Las unidades Primadet EZDet y EZTL tienen componentes comunes, que ya se describieron, como son la etiqueta de retardo, el gancho "J", el tubo conductor y el fulminante. El componente común de ambas unidades y que aún no se ha descrito, es un preciso retardo de superficie alojado en un conector plástico que es capaz de iniciar de 1 a 6 tubos conductores, propiamente conectados, en ambas direcciones (Figura 4.26).

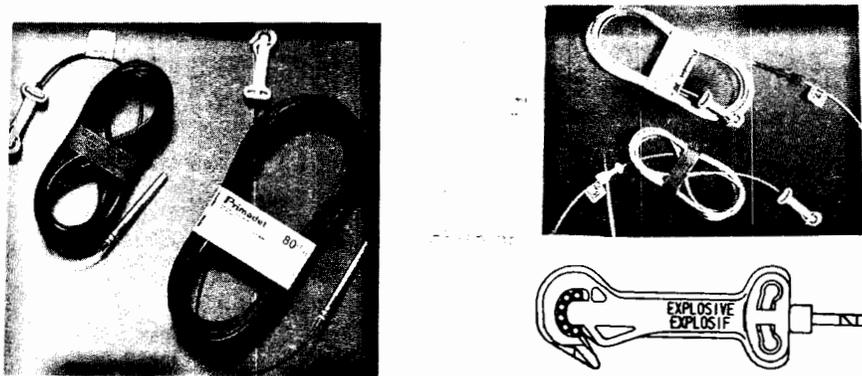


Figura 4.26 Primadets EZDet y EZTL

4.4.5 APLICACIONES

A continuación se describen las operaciones básicas para trabajos subterráneos y de superficie.

4.4.5.1 Subterráneos

Cargado

Inserte el fulminante Primadet MS o LP, con el período de retardo seleccionado, dentro del cebo por el orificio hecho con un punzón de material antichispa. Como el efecto del fulminante es direccional se deberá apuntar en la dirección de la carga principal, centrado y rodeado de la masa explosiva en el interior del cebo (Figura 4.27).

Conexión

La conexión a la línea troncal de cordón detonante -Detacord o E-Cord- se realiza mediante el gancho "J", que permite una conexión rápida y ayuda a formar un ángulo recto entre el tubo conductor y la línea troncal, lo que impedirá la posibilidad de un corte ocasionado por la potencia del cordón detonante (Figura 4.28).

La figura 4.29 (a) muestra una plantilla en un túnel. La línea troncal de cordón detonante está sujeta con el gancho "J" a la boca de varios barrenos alrededor de la cara en convenientes localizaciones (Figura 29(b), de manera que los tubos restantes pueden ser sujetos fácilmente (Figura 4.29(c))

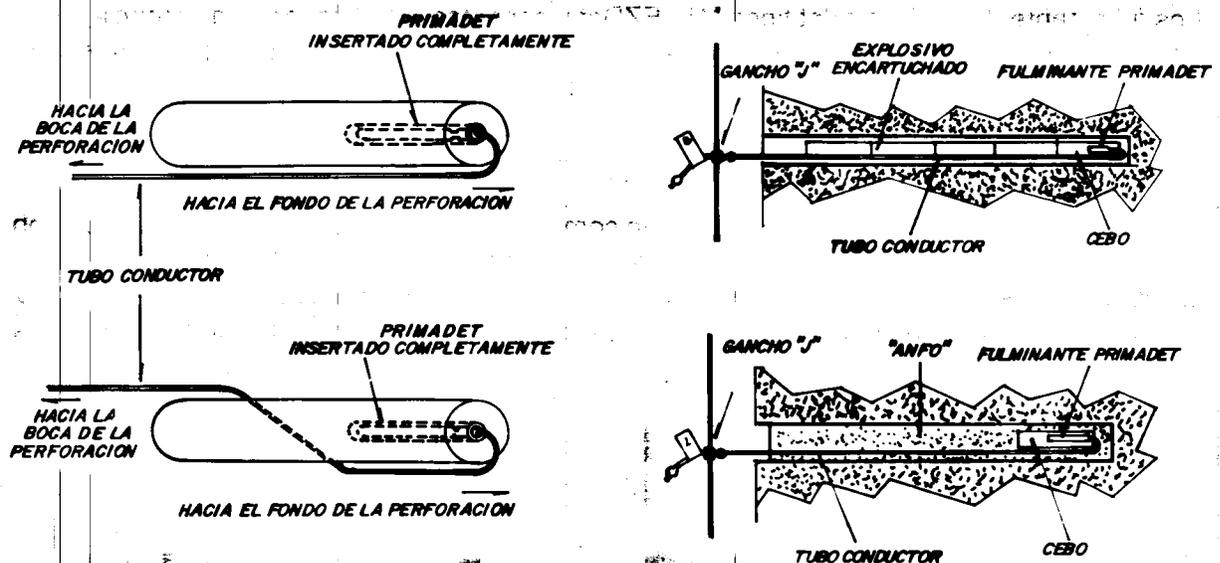


Figura 4.27 Cebado recomendado en aplicaciones subterráneas.

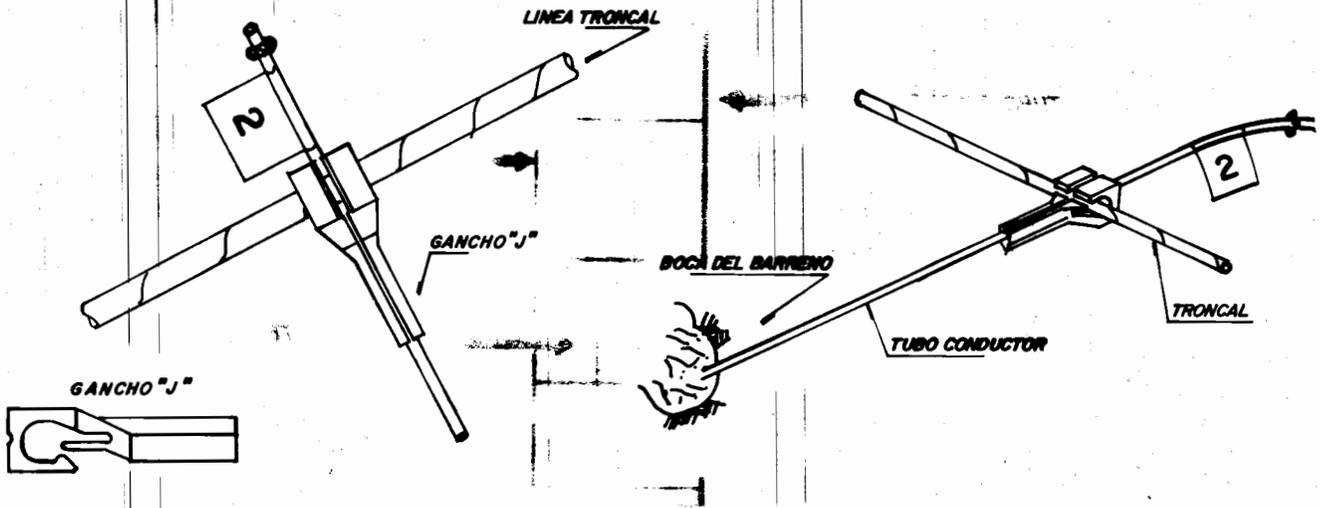


Figura 4.28 Conexión del Primadet MS a la línea troncal utilizando el gancho "J"

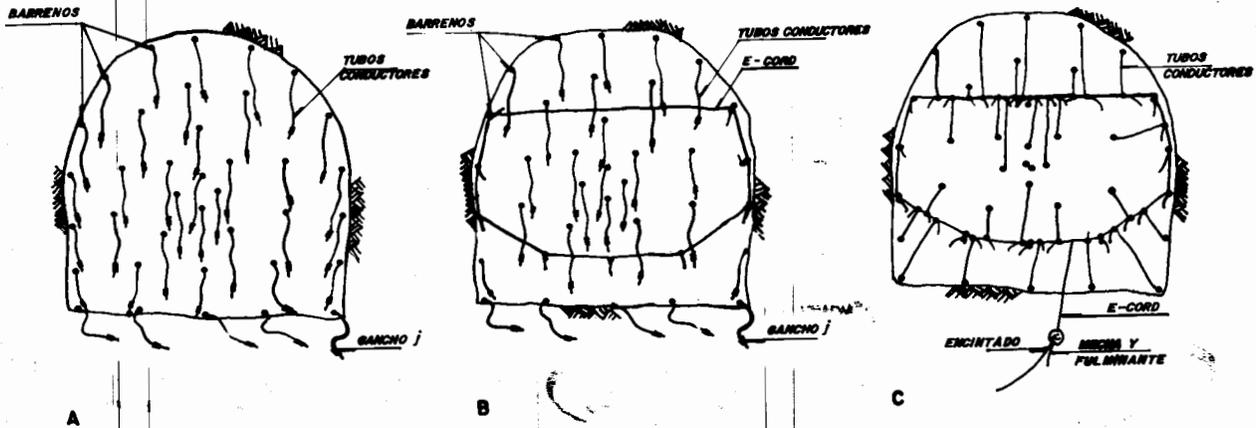


Figura 4.29 Conexión de Primadets a la línea troncal en túneles.

4.4.5.2 Superficie

Cargado

El cebado recomendado se ilustra en la figura 4.30. Asegure la posición del fulminante dentro del cebo dando alrededor de éste dos o más vueltas con el tubo conductor.

Conexión

Nunca conecte un gancho "J" a una distancia menor a 10 cm de un nudo del cordón detonante, con objeto de evitar un corte accidental (Figura 4.31).

La línea troncal de cordón detonante debe formar un circuito cerrado, siempre que sea posible, con objeto de proporcionar a cada barreno dos vías distintas de iniciación. La elección de los tiempos de retardo en el fondo y superficie de los barrenos deberá programarse de tal forma, que la línea troncal sea totalmente activada antes que detonen las cargas. De esta manera se eliminan los riesgos de líneas cortadas por efecto de proyección en superficie y desplazamiento de terreno por la onda sísmica (Figura 4.32.)

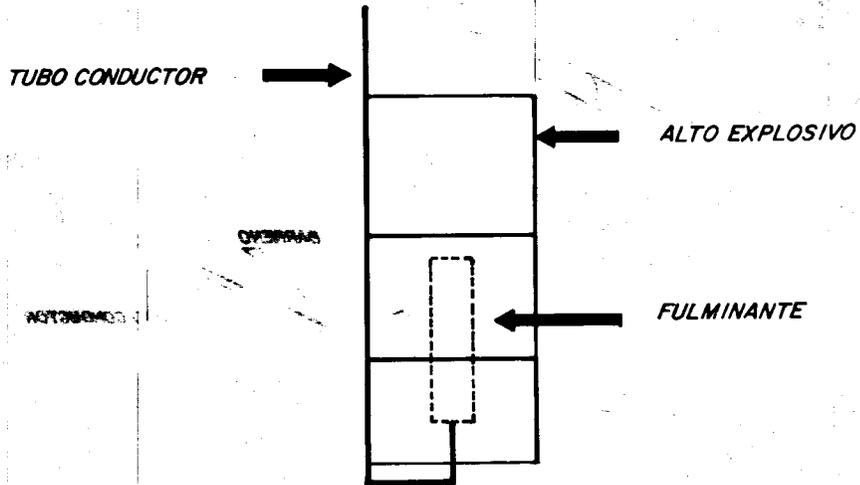


Figura 4.30 Cebado recomendado en aplicaciones superficiales.

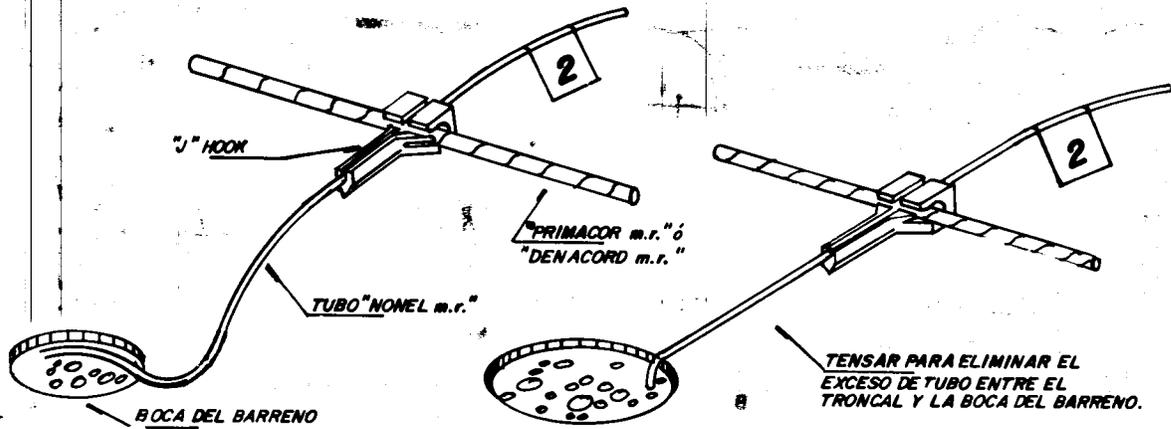


Figura 4.31 Conexiones de Primadets a la línea troncal en aplicaciones superficiales.

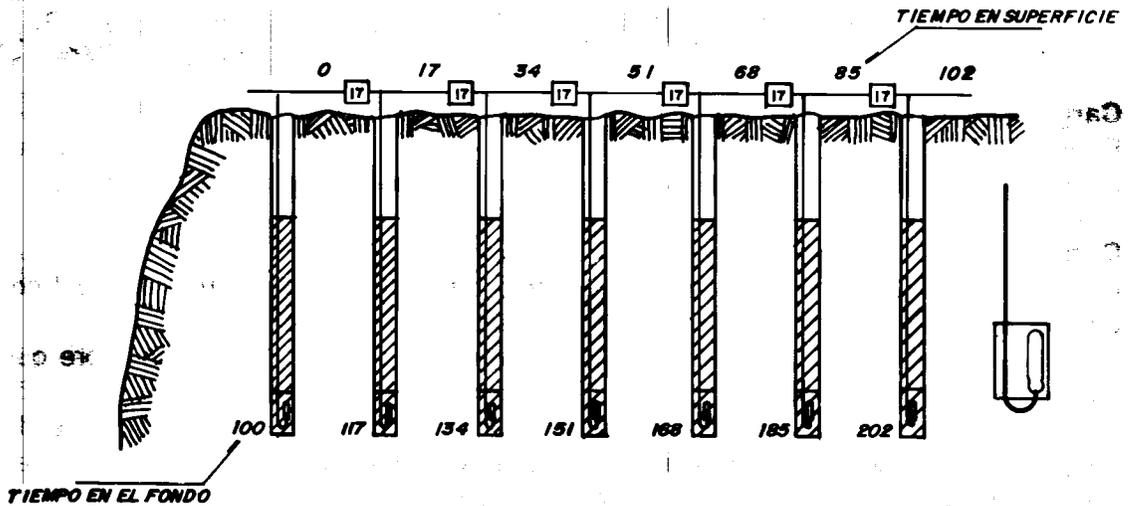


Figura 4.32 Tiempos de retardo en superficie y fondo del barreno.

EZDet y EZTL

Una vez que los barrenos han sido cebados y cargados en la forma convencional, utilizando el fulminante de fondo con retardo integrado del EZDet, se sujeta al conector de superficie que viene del primer barreno a ser disparado a el tubo conductor del EZDet del segundo barreno. Es importante que el conector de superficie se sujete bien al o a los tubos conductores; a continuación se desliza el conector a lo largo del tubo conductor hasta la boca del barreno estableciendo contacto con el taco. Este proceso se repite hasta que todos los barrenos han sido conectados (Figura 4.33).

Los retardos de superficie EZTL son utilizados para dar el tiempo de disparo entre filas estos se logra conectado el extremo del tubo conductor, cercano al gancho "J", del EZTL, que dentro del conector de superficie del EZDet del barreno seleccionado -depende de la secuencia de retardo a seguir (Figura 4.33, barreno 3). Ahora el conector de superficie del EZTL se conecta al tubo conductor del EZDet del primer barreno de la segunda fila de manera que pueda iniciar el tubo en ambas direcciones (Figura 4.33, barreno 4). El procedimiento se repite cuantas veces sea necesario.

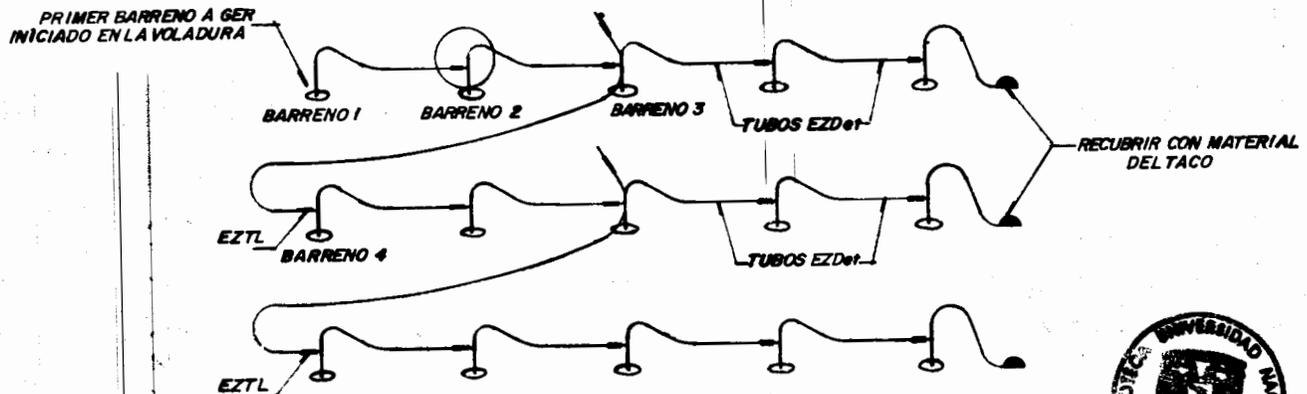


Figura 4.33 Conexión con EZDet y EZTL



4.4.6 Ejemplo de plantillas

El sistema Primadet es lo más apropiado para aquellas aplicaciones en las que se requiere incrementar fragmentación y reducir niveles de vibración y golpe de aire. El diseño de la voladura deberá hacerse de manera que los barrenos disparen en la secuencia apropiada con respecto a la cara libre.

Las figuras 4.34, 4.35 y 4.36 son ejemplos de voladuras utilizando Primadets con retardos en milisegundos. La forma más sencilla de uso es dar la secuencia de salida utilizando únicamente los Primadets MS en el fondo del barreno. También pueden emplearse como un retardo común para todos los barrenos de una voladura dada, combinándose con los conectores MS en superficie para dar la secuencia de salida (Figura 4.29). Dependiendo de la secuencia diseñada en la línea troncal de cordón detonante podrá formar un circuito

cerrado, o bien, la troncal deberá ser abierta. En la figura 4.30 se ejemplifica el uso del puenteo con Primadet MS; cuando se utiliza este método no se puede formar un circuito cerrado con la línea troncal del cordón detonante, por lo que se debe asumir un riesgo.

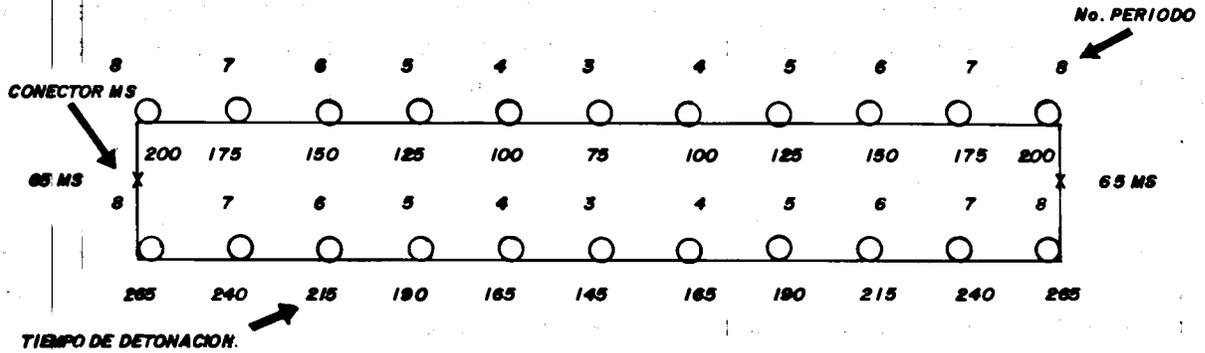


Figura 4.34 Voladura utilizando primadets MS periodos 3 al 8 dentro del barreno y conectores de 65 ms en superficie.

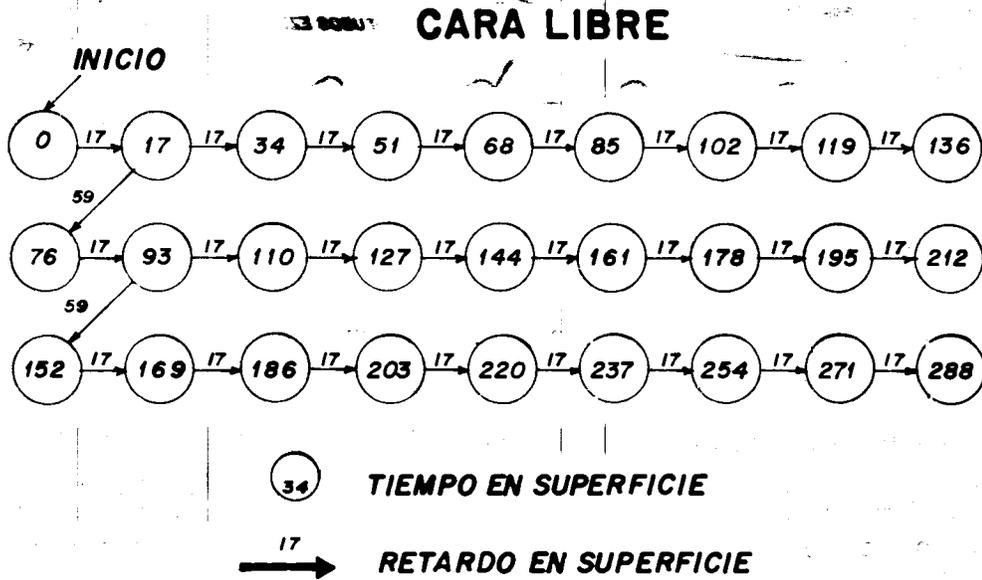


Figura 4.35 Voladura utilizando retardos de superficie de 17 ms y 59 ms (Conectores de 42 ms + 17ms)

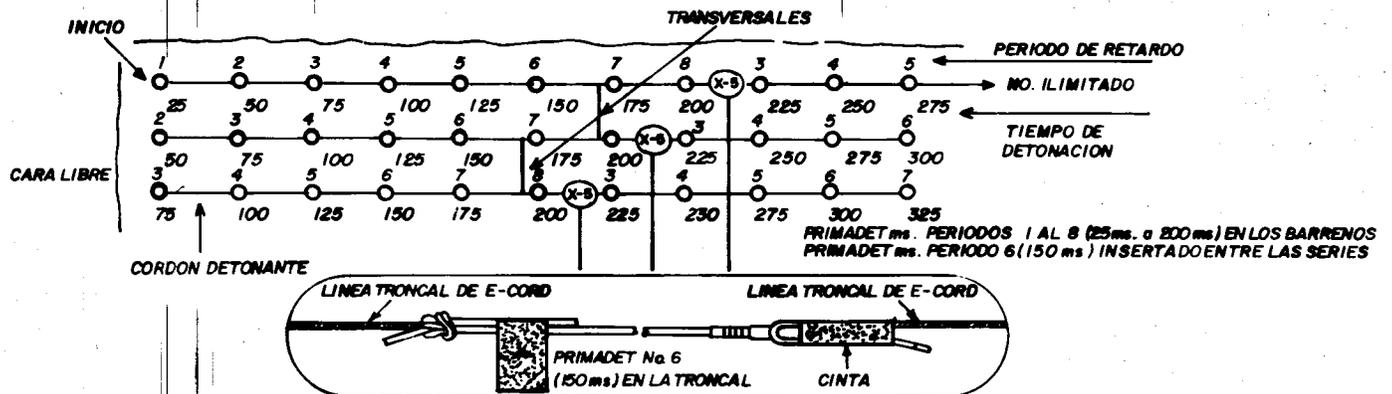


Figura 4.36 Puenteo con primadets MS. Se puede utilizar para plantillas muy grandes. El puenteo es unidireccional.

AVISO

La información y las recomendaciones descritas en este capítulo están basadas en la investigación y los experimentos efectuados por The Ensign Bickford Company, bajo cuya licencia se fabrican los productos respectivos.

El fabricante no puede referirse a todas las posibles aplicaciones de sus productos, ni tampoco puede anticipar todas las posibles variaciones en el uso de los mismos.

REFERENCIAS

Blast Design, Calvin Konya

La Mecha para Minas. Qué es y como se usa, Cía. Mex. De Mecha Para Minas

El Cordón Detonante Primacord Que Es y Como Se Usa, Cía. Mex. De Mecha Para Minas

Primacord Handbook, The Ensign Bickford Co.

Technical Bulletins for Pimadets, Primacord and Related Products. The Ensign Bickford Co.

Rock Blasting and Explosives Engineering. Person, Hølemberg And Lee.

Manual para Explosivos. Dupont

Explosives end Rock Blasting. Atlas Powder Company.

5.- MANEJO Y USO DE EXPLOSIVOS

5.1 Transporte de materiales explosivos

La transportación de explosivos en México está regulada por la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); a nivel mundial un comité de expertos es el que se encarga de normatizar las regulaciones, estandarizando la clasificación, el etiquetado, la colocación de carteles y la descripción de documentos. La organización intergubernamental de consulta marítima (IMCO) cubre la transportación en mar para el sistema de las Naciones Unidas en el código de productos peligrosos. Los vehículos de motor son los más comúnmente utilizados para el transporte de explosivos, aún cuando embarques por barco o avión se utilizan en algunas ocasiones. Todo embarque de explosivos debe efectuarse en un vehículo que tenga las siguientes características:

- Mantenimiento óptimo
- Piso firme que no produzca chispas
- Todas las partes en contacto con el explosivo deberán ser recubiertas con material antichispa.
- Deben mostrar cartelones y señalización de acuerdo al reglamento.
- Estar equipado con dos o más extinguidores.
- Permiso de SEDENA Y SCT

Antes de transportar materiales explosivos, el vehículo debe inspeccionarse cuidadosamente, con objeto de asegurar que funcione correctamente y debe presentar todas las características antes descritas. Algunas de las medidas principales que se deben adoptar durante el transporte en vehículo de motor son las siguientes:

- No permitir fumar dentro o alrededor del vehículo.
- No abastecerse de combustible con el vehículo cargado dentro de la ruta.
- No llevar metales o herramientas que produzcan chispas tales como cerillos, armas de fuego, sustancias inflamables, ácidos o materiales oxidantes.
- Apegarse a las medidas de compatibilidad de los explosivos.
- Excepto en emergencias, ningún vehículo cargado deberá estacionarse en calles públicas adyacentes o cercanas a un puente, túnel, vivienda o lugar donde se reúna la gente.
- Deberá evitar la circulación por zonas congestionadas.

Para el transporte interno de la obra, ya sea de construcción o minera, se deberá apegar a los lineamientos anteriormente descritos, ya que es frecuente observar que el personal encargado de esta actividad los omite o no cuentan con los recursos materiales necesarios para realizar un trabajo seguro. En la tabla 5.1 se muestra la compatibilidad para el transporte de los materiales explosivos.

Tabla 5.1 Compatibilidad para el transporte de los materiales explosivos.

	tovex	super mexamon * d	mexamon*	iniciador de alta presion	fulminates regulares	estopines electricos	detonadores o iniciadores no electrico	mecha de seguridad	cordón detonante	ignitacord (cordón encendedor)	conectores ignitacord	conector p/cordón detonantes
tovex	x	x	x	x		.	.	x	x	.	.	.
super mexamon*d	x	x	x	x		.	.	x	x	.	.	.
mexamon	x	x	x	x		.	.	x	x	.	.	.
iniciador de alta presion	x	x	x	x		.	.	x	x	.	.	.
fulminantes regulares					x	x	x			x	x	x
estopines no eléctricos	.	.	.	.	x	x	x	.	.	x	x	x
detonadores o iniciadores no electricos	.	.	.	.	x	x	x	.	.	x	x	x
mecha de seguridad	x	x	x	x		.	.	x	x	x	x	x
cordón de tonante	x	x	x	x		.	.	x	x	.	.	.
ignitacord (cordón encendedor)	.	.	.	.	x	x	x	x	.	.	.	.
conectores ignitacord	.	.	.	.	x	x	x	x	.	.	.	.
conector p/cordón detonante ms	.	.	.	.	x	x	x	x	.	.	.	.

5.2 Almacenamiento de explosivos

Las condiciones de almacenamiento de los explosivos tienen una relación con la seguridad en su uso mucho más profunda de lo que se piensa. Un almacenamiento inadecuado de los explosivos, de las mechas y de los demás artificios puede conducir a fallas tales como barrenos sin detonar y a explosivos en la rezaga. El manejo de barrenos quedados y la existencia de barrenos sin detectar, constituyen dos de las fuentes principales de accidentes con los explosivos. Por lo tanto, las medidas que se tomen para evitar barrenos quedados son fundamentales para la seguridad del trabajador.

Una ventilación inadecuada en los polvorines puede conducir, de modo indirecto, a accidentes, a menos que el aire circule libremente por todo el polvorín. Las variaciones extremas de temperatura pueden generar una rápida descomposición y deterioro de los explosivos y accesorios.

Para controlar un poco los factores ambientales es recomendable proporcionar la ventilación adecuada y pintar el exterior con colores blanco o gris y el techo con material reflejante.

5.2.1 Tipos de polvorines

- Tipo 1.-** Es un edificio permanente para materiales sensibles al disparo de una bala, que pueden detonar en masa. Es a prueba de balas y robo. Además es resistente a las condiciones climatológicas.
- Tipo 2.-** Es un polvorín portátil o móvil usado interior o exteriormente para almacenar materiales explosivos sensibles al disparo de una bala, que puedan detonar en masa. Esta construido de la misma forma que el tipo 1, con la excepción de que el polvorín interno no requiere ser resistente a balas.
- Tipo 3.-** Es un polvorín portátil para almacenar explosivos que estén siendo manejados, tales como las cajas de carga a los sitios de voladura. Es a prueba de balas, resistente al fuego, al robo y a las condiciones climatológicas.
- Tipo 4.-** Es un polvorín portátil, móvil o permanente para almacenar materiales no sensibles al impacto de bala y que no detonarán en forma masiva. Es resistente al fuego, al robo y a las condiciones climatológicas.
- Tipo 5.-** Es un polvorín permanente, portátil o móvil, y sirve para almacenar materiales explosivos que no son sensibles al disparo de una bala, es a prueba de robo y resistente a las condiciones climatológicas. Este tipo puede ser un edificio, un tanque, trailers, camiones o tolvas utilizadas para almacenar altos explosivos y agentes explosivos.

5.2.2 Localización de un polvorín.

Al seleccionar la localización de un polvorín se debe considerar la seguridad pública, la del acceso al sitio de trabajo o de las áreas donde va a utilizarse el explosivo.

La tabla de distancia-cantidad contenida en la ley federal de armas de fuego y explosivos, especifica las distancias mínimas de acuerdo a los volúmenes de almacenamiento con respecto a diferentes estructuras como son: edificios habitados, carreteras, vías de ferrocarril, polvorines, líneas eléctricas, etc.

La capacidad total de explosivos que pudiera resguardarse en cada uno de los polvorines, se determina de acuerdo a sus dimensiones interiores y exteriores. A estas últimas deben descontarse los pasillos de tránsito y las capacidades se indican en kilogramos.

Los productos del mismo tipo y clase deberán almacenarse juntos, de tal manera que sea fácil identificarlos. Esto simplificará el conteo y la revisión de la antigüedad de los productos que se tengan almacenados.

Si requiere iluminación artificial, utilice exclusivamente una linterna de seguridad. Nunca deberá entrar en el polvorín con cerillos, encendedores o cualquier otra fuente de ignición. El interior del polvorín deberá mantenerse limpio, así como el área que lo rodea, la cual deberá estar libre de hojas, pasto, maleza seca, basura o cualquier tipo de desperdicio, esto para prevenir incendios.

Se debe dar un mantenimiento regular a los polvorines, con el fin de evitar goteras y daños en las paredes o muros. Se debe mantener el color de las paredes y puertas. Nunca se deberá permitir a personas no autorizadas el acceso o cercanía al polvorín. La puerta del polvorín deberá permanecer siempre cerrada, excepto cuando se realicen movimientos de materiales.

Debe tenerse muy en cuenta los materiales que se almacenan en cada uno de los polvorines, ya que una omisión en el cuidado puede ocasionar un accidente.

En el polvorín de explosivos sólo se almacenarán altos explosivos, agentes explosivos y cordones detonantes (estas indicaciones vienen especificadas en el permiso general que extiende la Secretaría de la Defensa Nacional, así como en la tabla de compatibilidad contenida en la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos).

En el polvorín de artificios debe almacenarse únicamente accesorios de voladuras tales como: fulminantes, estopines eléctricos, mechas de seguridad y demás accesorios de iniciación. No deberán almacenarse herramientas o implementos metálicos que pudieran producir chispas. Los polvorines de accesorios son de mínimas dimensiones.

A continuación se describirá una serie de condiciones de seguridad conocidas como «siempre y nunca» que han sido editadas en Estados Unidos de América por el USBM Y MSHA:

Siempre:

Siempre deberán almacenarse los explosivos de acuerdo con las disposiciones de la Secretaría de la Defensa Nacional.

Siempre deberán ubicarse los polvorines en los lugares más aislados y estratégicos, respetando las cantidades y las distancias del reglamento de la Secretaría de la Defensa Nacional.

Siempre deberán manejarse con cuidado las cajas que contengan accesorios, evitando dejarlas caer o aventarlas, así como evitar hacerlas deslizar sobre el piso o sobre otras cajas.

Siempre se observarán las leyes y reglamentos federales, estatales o municipales para el almacenamiento de los explosivos.

Siempre se guardarán los explosivos en lugares limpios, secos y frescos, bien ventilados y debidamente ubicados, además deberá ser sólida la construcción, resistente a balas y fuego, y deberá contener cerraduras adecuadas.

Siempre se manejarán los explosivos con la debida precaución dada su naturaleza.

Siempre verifique el sistema o las condiciones de ventilación.

Siempre utilice los explosivos que tengan más tiempo de fabricación y almacenaje.

Siempre tenga mucho cuidado al abrir y cerrar las cajas de fulminantes e iniciadores.

Nuncas:

Nunca deberán emplearse herramientas metálicas capaces de producir chispas para abrir o cerrar cajas de accesorios. Se pueden utilizar navajas para abrir cajas de cartón, siempre y cuando estas navajas no entren en contacto con los sujetadores metálicos de las cajas. Tampoco deben tenerse fulminantes o estopines eléctricos sueltos dentro del polvorín.

Nunca se almacenarán fulminantes comunes, iniciadores o cebos con otros explosivos en la misma caja, receptáculo o polvorín. El cordón detonante nunca deberá ser almacenado juntamente con fulminantes o iniciadores.

Nunca se almacenarán explosivos, mechas o encendedores de mecha en lugares húmedos o mojados, ni cerca de aceites, gasolinas o fluidos para limpiar, calentadores, tubería de vapor, estufas u otra fuente de calor.

Nunca se almacenará en un polvorín ningún metal que produzca chispa, ni herramientas hechas de tales metales.

Nunca se deberá fumar, ni llevar fósforos, luces descubiertas u otra forma de fuego o llama dentro de un polvorín, ni cerca de él.

Nunca se permitirá la acumulación de hojas, hierbas, matorrales o basura en un radio de 7,5 m alrededor del polvorín.

Nunca se dispararán armas de fuego hacia los polvorines o explosivos, ni tampoco en las cercanías de éstos.

Nunca se colocarán los explosivos en lugares donde estén expuestos a llamas, calor excesivo, a las chispas o a los golpes.

Nunca deberán llevarse explosivos en los bolsillos de la ropa ni en otra parte del cuerpo.

Nunca se permitirá la presencia de niños, de personas no autorizadas o innecesarias en el área donde se manejen explosivos.

5.2.3 Materiales y dimensiones de construcción

Para la construcción de polvorines es muy recomendable edificar muros de materiales como el adobe, tabique de barro, tabicón, etc. así como columnas de concreto, en el caso de los pisos se recomienda una plantilla de cemento de 10 cm de espesor, los techos deben ser ligeros, de material reflejante o pintados con colores muy reflejantes, ya sea de lámina de asbesto o madera. Se recomienda que sean a dos aguas, con altura al centro de 4 metros y en los extremos alturas inferiores a 2,70 m, dejando respiraderos entre muro y techo de 0,20 m. Las puertas deberán ser de madera, con recubrimiento exterior de lámina de acero y porta candados cubierto.

Los polvorines deben cumplir con los requisitos de impermeabilidad a fin de mantener los productos en perfecto estado.

Los muros deben estar reforzados a cada 6 m con castillos de 0,45 m x 0,45 m, con alma de 4 varillas de 2,54 cm de diámetro. Las puertas deben ser de madera de 10,16 cm de grueso, con bastidor de metal y deberán tener cerradura de seguridad con doble pasador de 15 ó 20 cm. Los cimientos debe ser de mampostería. El objetivo esencial de esta construcción es que en caso de explosión no se fragmente en bloques grandes, sino que el material prácticamente se pulverice. La altura mínima del polvorín debe ser de 2,50 m. Los respiraderos o ventanillas para ventilación deben tener una cubierta de malla de acero resistente a los roedores.

El polvorín debe estar resguardado con malla ciclónica ubicada a 3 m de distancia de las paredes con altura mínima de 3,0 m.

La capacidad será de acuerdo con las necesidades del usuario y la autorización de la Secretaría de la Defensa Nacional.

La seguridad de los polvorines involucra la colocación, cerca a la puerta de cada polvorín, de cuando menos un extinguidor tipo ABC (mismo que sólo se utilizará para casos de incendios fuera de polvorines), y en la colocación, en zonas de fácil acceso, de tambos de 200 litros, unos conteniendo agua y otros arena. Además es necesario colocar palas, zapapicos en caso de siniestro y cubetas, para utilizarse de ser necesario, para manipular la arena y el agua de los tambos en caso de siniestro.

Se debe colocar letreros de advertencia, los cuales contendrán mensajes como: no fumar, estrictamente prohibida la entrada, peligro explosivos, etc.

Se debe instalar en cada polvorín un pararrayos, que servirá para protegerlos de corrientes eléctricas naturales, y una placa aterrizada mediante una barra de cobre para evitar corrientes estáticas, misma que debe ser tocada por el personal que ingrese a polvorines.

Los polvorines deberán estar permanentemente vigilados por personal capacitado, dado que las disposiciones de la Secretaría de la Defensa Nacional exigen dos vigilantes por turno las 24 hrs.

Es recomendable efectuar revisiones periódicas de las condiciones de los polvorines (independientemente de las realizadas por la SEDENA.), a fin de solucionar oportunamente cualquier anomalía que se detecte. Se sugiere proporcionar al personal responsable del almacenamiento las reglas correspondientes a los procedimientos de seguridad, para que sean del dominio completo en caso de contingencias.

Por último y antes de iniciar cualquier construcción, recomendamos solicitar la asesoría de la zona militar correspondiente en cuestiones de explosivos, con el fin de cumplir con todos los requisitos que marca la ley (Figura 5.2)

5.3 Seguridad en el uso y manejo de explosivos

5.3.1 Personal responsable

Cada persona involucrada en la aplicación de explosivos tiene responsabilidad consigo mismo y con los demás, por eso cuando alguien dentro de un equipo de trabajo, deja de observar las medidas de seguridad, ya sea por negligencia, o descuido, los demás deberán recordarle la importancia del hecho y si esto persiste, la persona deberá ser removida de los lugares donde se manejen explosivos, ya que cuando alguien le ha perdido el respeto a los explosivos es tiempo de cambiar de actividad.

Con respecto al personal involucrado en la aplicación de los explosivos, se recomienda que cuando se introduzca personal nuevo se tome en cuenta lo siguiente:

- Capacitarlo y adiestrarlo en el manejo y uso de los explosivos.
- Este personal deberá tener una clara conciencia de lo que debe y no debe hacer con el explosivo.
- Que se encuentre física y mentalmente preparado para el manejo de explosivos.
- Que obedezca las normas de seguridad establecidas.
- Deberá ser personal con sentido común, que reconozca que la seguridad de él y de sus compañeros de trabajo es su responsabilidad.

Dentro de cada operación existen diferentes estructuras organizacionales, donde cada uno de los involucrados tiene su propia responsabilidad dentro de un equipo o grupo de trabajo, para la prevención de accidentes.

A continuación se mencionan algunas de las principales responsabilidades, de varios puestos involucrados, en operaciones de minería, obras de ingeniería civil, canteras, etc., en donde se utilizan explosivos:

Tabla 5.2 Distancia-Cantidad tomada de la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos.

DESCRIPCION DEL MATERIAL	Distancias en metros						
	Para Polvorines con Protección						
	Kilogramos		Edificios	Vías	Caminos	Líneas de	Entre
-DE	A	Habitados	Férreas	Carreteros	Alta Tensión	Polvorines	
1.- Altos Explosivos, Agentes Explosivos, Polvara Negra	0	500	126	100	100	100	11
	500	750	146	100	100	100	13
	750	1000	160	100	100	100	14
	1000	1250	170	100	100	100	15
	1250	1500	180	100	100	100	17
	1500	2000	200	100	100	100	18
	2000	3000	230	100	100	100	20
	3000	4000	250	100	100	100	23
	4000	5000	260	100	100	100	25
	5000	6000	270	117	100	100	26
2.- Artificios (Capsúl 6, iniciadores Eléctricos y No Eléctricos, conectores, Cordones Encendedores, etc.	6000	7000	275	122	100	100	27
	7000	8000	285	127	100	100	28
	8000	9000	295	132	100	100	30
	9000	10000	305	137	100	100	31
	10000	12000	330	146	100	100	33
	12000	14000	350	154	105	103	35
	14000	16000	370	160	110	105	36
	16000	18000	390	168	116	112	38
	18000	20000	405	173	121	118	39
	20000	25000	445	185	135	130	43
Por lo que respecta a Artificios únicamente se autoriza el almacenamiento en cada polvarin del equivalente a 4 ton.	25000	30000	480	200	145	140	46
	30000	35000	510	208	155	150	49
	35000	40000	535	218	160	155	53
	40000	45000	550	226	166	162	56
	45000	50000	565	240	169	166	63
	50000	60000	575	250	171	168	66
	60000	70000	585	262	175	172	73
	70000	80000	605	274	182	178	80
	80000	90000	620	284	186	183	86
	90000	100000	635	294	191	188	93
100000	125000	675	378	210	208	117	

5.3.2 Superintendente o responsable de la operación

Es su responsabilidad que exista un reglamento de seguridad y de que sean perfectamente bien observadas las medidas de seguridad para la prevención de accidentes.

5.3.3 Supervisor de producción / Supervisor de obra

- De común acuerdo con el supervisor de voladuras, deberá calcular la carga explosiva para las voladuras en función de la perforación existente.
- Deberá revisar y autorizar el vale de salida de los explosivos.
- Verificar los movimientos de entrada y salida de los explosivos, así como su uso correcto y asegurarse que los consumos estén contenidos en los límites establecidos, dentro del plan de uso de explosivos.
- Pasar diariamente los vales definitivos para la autorización por el responsable del área.
- Llevar al día las hojas del control mensual de consumo de explosivos y artificios.
- Asegurar que las voladuras se efectúen dentro del tiempo programado.
- Supervisar que se realice oportunamente la devolución de los explosivos y artificios sobrantes a los polvorines.

5.3.4 Supervisor de voladuras

- Debe asegurarse que el personal a su cargo tenga una clara conciencia de la seguridad, para garantizar una operación sin riesgos innecesarios.
- Es responsable de la seguridad de su personal y de las áreas circunvecinas.
- Debe calcular las cargas explosivas por barreno de acuerdo al diseño y circunstancias de la perforación, hacer el vale por los explosivos y solicitar el producto al almacén.
- Es responsable de que el personal nuevo en el área de carga de los explosivos reciba la inducción adecuada, además de ponerlos bajo la supervisión directa del personal con mayor experiencia, pero asegurándose que sólo realicen tareas donde no se corra ningún riesgo.
- Es el responsable de realizar las voladuras bajo las reglas de seguridad establecidas.
- Debe hacer las devoluciones de explosivos y artificios sobrantes al polvorín por conducto del almacenista.

5.4 Aspectos recomendados en el manejo de explosivos

Consideraciones en el manejo de los productos explosivos y accesorios de la voladura.

5.4.1 Altos explosivos

- A) Aun cuando los altos explosivos sean cada día más seguros, se deberá evitar forzar la entrada de los fulminantes en el cartucho. Los productos explosivos deberán tratarse con cuidado para evitar daños en el empaque o al producto.
- B) Evitar llevar cantidades excesivas de productos explosivos a los lugares de trabajo.
- C) Jamás se debe transportar explosivos y sistemas de iniciación en el mismo vehículo.
- D) Evitar golpear el cartucho cebado, este debe ser deslizado o empujado suavemente a través de un barreno.
- E) Antes de que el explosivo sea cargado en los barrenos, deben revisarse para prevenir cargar explosivos en barrenos obstruidos o con cavernas.
- F) En la preparación del cebo se requiere hacer un orificio en el cartucho con un material que no produzca chispa y que sea de dimensión suficiente para albergar la cápsula o fulminante, sin tener que presionar para insertarlo por la fuerza.

En los barrenos verticales, cuando se va a cargar con cebos menores de 5 kg, los cartuchos pueden deslizarse suavemente por la línea descendente. En barrenos de diámetro grande y usando cartuchos pesados, se recomienda bajar el primero con un cable de carga para prevenir un rompimiento de la línea descendente. Cuando se usan cebos muy pequeños, de 0,15 a 2,5 kg, en barrenos de diámetro grande, se recomienda meter primero un cartucho grande de explosivo o una cantidad razonable de anfo en el barreno, para evitar que el cebo sea sepultado en lodo, que su posición sea contaminada con roca del recorte y pueda ser separado de la carga principal. En barrenos verticales los cebos deben protegerse, evitando dejar caer cartuchos de explosivos directamente sobre el mismo, esto se logra colocando explosivo en pequeñas cantidades sobre el cebo, antes de dejar caer un cartucho completo.

Los barrenos horizontales deben ser sopleteados para limpiarlos de posibles fragmentos de roca y lodos, que pudieran taparlos o acortarlos. El siguiente paso es empujar el cartucho cebado hasta el fondo del barreno con un fainero de madera, esta operación se debe hacer con mucho cuidado para evitar que la línea de encendido pueda romperse. No es recomendable meter cartuchos como colchón antes del cebo. Una regla de seguridad muy importante es que el cartucho cebado nunca debe ser golpeado, ni tratar de empujarlo o deformarlo, si el explosivo se tiene que retacar para confinarlo en el barreno, se debe poner uno o dos cartuchos después del cebo para amortiguar esta acción, además se deberá hacer con mucho cuidado para evitar el rompimiento de la línea de encendido.

Después que el cartucho cebo ha sido cargado, la línea descendente debe asegurarse con una estaca de madera en la boca del barreno, permitiendo una tensión adecuada, y así asegurarse que la línea se ubica cerca de una de las paredes del barreno. Cuando se usa cordón detonante, la línea descendente debe cortarse del carrete y asegurarse con una estaca de madera fuera del barreno, retirándola del resto de cualquier material explosivo, esta práctica es para evitar detonaciones prematuras en el barreno, al propagarse por la línea descendente del cordón detonante e iniciar los materiales explosivos en la superficie.

Durante la operación de carga, la columna de explosivos deberá revisarse periódicamente con una cinta, para estar seguros que el explosivo esté siendo cargado de acuerdo a lo planeado, esto es importante para evitar que pudiera haber concentraciones de explosivo en pequeñas o grandes cavernas y/o fisuras en la roca y que pudieran provocar excesivo lanzamiento de material desde la voladura conocida como roca en vuelo.

Con las actuales perforadoras rotarias normalmente los barrenos se realizan con paredes bien definidas, que permiten bajar los cartuchos de alto explosivo y los agentes explosivos sin ningún problema. Sin embargo, muchas veces la perforación se hace a través de rocas fracturadas, o a través de algunos estratos de arcilla, los cuales tienden a forzar y a reducir el diámetro del barreno. Cuando esto sucede se recomienda utilizar cable para bajar los cartuchos de alto explosivo y así evitar el taponamiento. Cuando hay taponamiento se debe empujar con faineros telescópicos que se utilizan especialmente para estos casos.

Bajo ninguna circunstancia se deberá utilizar el equipo de perforación para empujar un cartucho atorado o rebarrenar sobre el mismo. Por ningún motivo deberán utilizarse piezas de acero o pieza pesadas de algún otro material para tratar de empujar los cartucho atorados.

En algunos casos donde hay estratos de arcilla u los cartuchos se llegan a atorar, es muy común descargar agua sobre el cartucho atorado, para que la arcilla se reblandezca y con el peso que adquiera empuje al cartucho a través del barreno constreñido.

Cuando se dejan caer cartuchos de emulsión hidrogel a través de barrenos con agua, desde cierta altura, es muy común que los cartuchos tomen la apariencia de un hongo y pueden bloquear el barreno cuando golpean con el agua. En este caso se recomienda bajarlos suavemente con un cable y gancho apropiados, y esperar el tiempo suficiente para permitir que bajen por si mismos, también se recomienda que el explosivo tenga una densidad que le ayude a bajar más rápidamente.

En ciertas ocasiones, debido a la falta de bordo, material débil, cavernas, estratos arcillosos, la carga completa de toda la columna con explosivos puede resultar en una sobrecarga que produzca roca en vuelo y golpe de aire. Para estos casos se recomienda el uso de tacos intermedios colocados en los puntos de mayor debilidad en las cavernas o fisuras, que pudieran concentrar una mayor cantidad de explosivo. Cuando se colocan los tacos intermedios es necesario cebar adecuadamente cada carga por separado y de acuerdo al diseño de la voladura.

5.4.2 Agente explosivo (Anfo)

Se menciona algunas reglas recomendadas para la utilización del Anfo:

- Requiere de un cebo para ser iniciado.
- No introducir Anfo en el agua o barrenos húmedos, debido a que es un producto que se disuelve fácilmente en el agua y pierde sus características explosivas.
- No quemar, friccionar o golpear objetos que produzcan chispas en los lugares donde se almacena o maneja este producto.

5.4.3 Contenido de gases nocivos

- El contenido de gases nocivos no debe rebasar los límites permitidos, que están estipulados en el Código Nacional.
- De acuerdo a la Ley en México, para considerar un explosivo como clase I no debe exceder en los siguientes contenidos de gases tóxicos en el aire del ambiente:

Co	-	100 ppm
No	-	5 ppm
So	-	5 ppm

5.4.4 Seguridad con los iniciadores

Los iniciadores modernos están diseñados bajo las más estrictas especificaciones de seguridad y son fabricados con las normas más rígidas de calidad. Aun cuando los detonadores disfrutan de un excelente récord de seguridad, debemos recordar siempre que estos contienen explosivos primarios y pirotécnicos sumamente sensibles. Todos los tipos de detonadores son sensibles a iniciaciones accidentales causadas por calor fricción o impacto. Es por lo tanto imperativo que los iniciadores sean protegidos de estos riesgos. Todas las operaciones de voladura deberán suspenderse cuando exista alguna tormenta eléctrica y el personal deberá trasladarse a un lugar seguro.

Los iniciadores que han sido llevados al área de la voladura deberán mantenerse en su empaque original o colocarse en un contenedor específicamente diseñado para este fin, manteniéndolos alejados de los explosivos. De preferencia los iniciadores deben transportarse al lugar de la voladura hasta el momento en que serán utilizados.

Los patrones de retardo y la forma en que los circuitos de voladura serán conectados son parte del diseño de la voladura.

El responsable de la voladura debe conocer todos los aspectos de seguridad y precauciones a tomar con respecto a los detonadores y los componentes de los sistemas de iniciación asociados, antes de iniciar la carga. Todos los sistemas de iniciación deben usarse de acuerdo con los métodos y recomendaciones de los fabricantes.

Para prevenir posibles cortes en los barrenos y evitar explosivos sin detonar, debido a los movimientos de la roca, es una práctica muy común que en barrenos de cierta profundidad se utilicen dos detonadores. Comúnmente un detonador es colocado al fondo del barreno para proporcionar la detonación al fondo. El otro detonador deberá colocarse en la parte media superior del barreno con un período de retardo mayor.

5.4.5 Seguridad con detonadores eléctricos (Estopines eléctricos)

Los detonadores eléctricos deberán revisarse con un instrumento apropiado antes de que se inserten en los cartuchos cebo. Para asegurar que los detonadores no fueron dañados durante la carga, deberán inspeccionarse antes de la colocación del taco.

Si durante la carga existe la sospecha de que los cables del detonador fueron dañados, los procedimientos de seguridad recomiendan que el detonador debe volver a verificarse, de tal manera que se pueda utilizar otro detonador de reemplazo si es necesario.

Los detonadores eléctricos, desde que son diseñados para ser iniciados con un impulso de energía eléctrica, son susceptibles de una iniciación accidental por una corriente extraña de electricidad, electricidad estática, energía de radio frecuencia, tormentas eléctricas, líneas de alto voltaje, etc. Como resultado, se deben hacer consideraciones muy importantes debido al riesgo potencial que existe por corrientes extrañas cuando se utilizan estopines eléctricos, algunas de éstas son las siguientes:

- No utilizar estopines eléctricos cerca de lugares que contengan electricidad estática.
- No utilizar estopines en las cercanías de transmisores de radiofrecuencia.
- El circuito de disparo debe estar aislado de alambres descubiertos, rieles, tuberías.
- No colocar alambres o cables eléctricos cerca de fulminantes eléctricos u otros explosivos, sino hasta el momento de preparar el disparo.
- Mantener en corto circuito los alambres de los estopines hasta que la voladura esté lista y sea necesario hacer las conexiones.

5.4.6 Seguridad con detonadores no eléctricos

Los sistemas no eléctricos deben usarse con los métodos recomendados por los fabricantes. El supervisor de voladuras es el responsable de todos los aspectos de seguridad y del uso de sistemas no eléctricos de disparo, además deberá estar familiarizado con todos los componentes y su compatibilidad con los explosivos y otros sistemas de iniciación.

Los sistemas no eléctricos de disparo son por lo general menos susceptibles a una detonación prematura, ocasionada por corrientes extrañas o energía de radio frecuencia, que los sistemas eléctricos; todos los iniciadores tienen cargas primarias de explosivos pirotécnicos,

por lo que es posible que pudiera ocurrir una iniciación accidental por un rayo, electricidad estática o campos eléctricos. Debido a la fuerte energía liberada por los rayos, durante una tormenta eléctrica, se recomienda suspender la carga de explosivos y retirar al personal a un lugar seguro, bloqueando los accesos a la zona de trabajo hasta que la tormenta pase y el riesgo desaparezca, sin importar el sistema de iniciación utilizado.

5.4.7 Mechas de seguridad

Precauciones

La mecha para minas deberá usarse con explosivos comerciales, únicamente por, o bajo la dirección de una persona con experiencia en el manejo y uso de explosivos. La mecha para minas se conoce también como mecha de seguridad, pero ambos nombres son sólo genéricos, y quien la use deberá comprender que todo trabajo donde se requiera el uso de explosivos es peligroso. Es necesario tener siempre la certeza que, en condiciones específicas de cada trabajo, las mechas empleadas sean de la longitud adecuada y le proporcionen al trabajador todo el tiempo necesario para llegar a un lugar seguro después de haberlas encendido; en caso de duda, deberán usarse mechas más largas para proporcionar un margen adicional de seguridad.

5.5 Reglas y precauciones para encender mechas de seguridad

Ya sea que la voladura consista de uno o muchos barrenos, y si se enciende a mano o con ignitacord, invariablemente se deberán observar las reglas y precauciones siguientes:

No intente usar mecha, a menos que usted sea un operario conocedor y experimentado, o que lo haga bajo la supervisión directa de una persona con conocimientos y experiencia. Un operario con experiencia es aquel que ha sido responsable de trabajos de explosivo día tras día y ha empleado la mecha por un período de cuando menos un mes. Además debe conocer y entender todas las recomendaciones y precauciones enumeradas en este capítulo.

Cuando falte poco tiempo para encender una o más mechas, se deberá establecer comunicación positiva con todas las personas que pudieran estar presentes en el lugar de la voladura o cerca de él. Los mineros y demás operarios, ubicados en lugares cercanos o intercomunicados, deberán ser protegidos por algún sistema eficaz de señales o comunicaciones, para eliminar la posibilidad de que cualquiera de ellos llegue a exponerse a una voladura a cargo de uno de sus compañeros de trabajo. Además, toda persona que no esté participando directa y personalmente en las voladuras, deberá ser retirada a un lugar seguro, incluyendo el público, en su caso.

Las cuadrillas deben consistir de dos hombres, y deberán planearse y discutirse con anticipación todos los detalles relacionados con cada voladura, incluyendo la preparación de las mechas para facilitar su encendido, así como el tiempo necesario para encenderlas.

Si la mecha se enciende a mano, un operario deberá encenderla y el otro llevará la cuenta del tiempo transcurrido, desde el momento en que inicio el encendido de la primera mecha. De preferencia, deberá usarse una mecha de control de tiempo en la forma descrita anteriormente.

Si el encendido es con ignitacord, el minero lo encenderá en un lugar adecuado y deberá retirarse inmediatamente. **No hay razón** para observar como progresa el encendido del cordón.

5.5.1 Seguridad en el uso de la mechas de seguridad o cañuela negra

Causas de accidentes en el uso de explosivos.

La mecha para minas tiene un historial comprobado de funcionamiento seguro y confiable y proporciona el método más económico para disparar voladuras en túneles y socavones con profundidades de hasta 4 metros.

Han ocurrido accidentes al usar cualquiera de los dispositivos y métodos existentes diseñados para iniciar voladuras en minas subterráneas. Al investigar el origen de los accidentes se comprobó que invariablemente ocurrieron por una o más de las siguientes causas básicas:

1) Falta de experiencia del operario

El operario no tenía la preparación necesaria ni entendía los principios de la técnica del uso de la mecha, y violó una o más reglas fundamentales de dicha técnica.

2) Las comunicaciones inadecuadas

La exposición de una o más personas a las consecuencias de una voladura, debido a comunicación inadecuada entre mineros en lugares de trabajo vecinos y cercanos, o entre el pegador y otras personas, dando lugar a la presencia inadvertida e inoportuna de personas extrañas a la voladura en la zona de peligro.

3) La presencia prolongada en el lugar de trabajo.

Recuerde que una vez encendida una mecha cebada, inicia una serie de sucesos que culminarán con la detonación de la carga explosiva de un barreno. El tiempo perdido en la frente (o la planificación defectuosa de la tarea) durante la operación de encendido, así como la falta de preparación de las mechas antes de empezar a encenderlas, multiplica la posibilidad de que el operario se exponga a ser lastimado seria o fatalmente por el primer barreno que detone.

La persona que maneja explosivos deberá conocer y observar todas las reglas de seguridad correspondientes. A continuación damos algunas de estas reglas respecto al uso de mecha.

NUNCA almacene explosivos, mecha o encendedores de mecha en un lugar o ambiente húmedo, ni cerca de petróleo, aceite, gasolina o disolventes, ni cerca de radiadores, caiefactores, líneas de vapor, estufa u otras fuentes de calor.

NUNCA se usa explosivo o accesorios que obviamente estén deteriorados o dañados.

NUNCA intente recuperar o usar mecha, fulminantes, estopines, o cualquier otro explosivo que se haya empapado, aún después de haberse secado, consulte usted al fabricante.

SIEMPRE maneje la mecha con cuidado, evitando maltratar su cubierta. En lugares fríos, caliéntela ligeramente antes de usarla para evitar agrietar las capas impermeabilizantes.

NUNCA use tramos cortos de mecha. Conozca usted la velocidad de su mecha y asegúrese de tener el tiempo necesario para llegar a un lugar seguro. Nunca use menos de un metro.

SIEMPRE corte la mecha inmediatamente antes de insertarla en un fulminante. Corte de 3 a 5 centímetros para asegurarse que el extremo esté seco. Córtela con herramienta cuya hoja esté limpia y filosa. Asegúrese que el extremo quede en contacto con el explosivo del fulminante, pero no la haga girar cuando ya esté en su lugar.

SIEMPRE encienda la mecha con un dispositivo especial diseñado para este fin. Si se usan cerillos hay que hundir el extremo de la mecha, sostener la cabeza del cerillo dentro de la hendidura y en contacto con la pólvora de la misma y tallar la cabeza del cerillo con la superficie abrasiva de la caja para encender la mecha.

NUNCA retenga el explosivo en la mano al estar encendida la mecha.

Sí después de leer todas las instrucciones y advertencias tiene usted alguna duda sobre la forma correcta de usar la mecha para minas con toda seguridad, solicite de inmediato el consejo de una persona calificada y con experiencia en el uso de la misma. Desde luego que cuando se están usando explosivos, es necesario tener la certeza de que conoce, comprende y observa todas las medidas de seguridad correspondientes, y no únicamente las que se refieren a la mecha. Recuerde también que no debe usarse la mecha para minas en dispositivos pirotécnicos, ni en contravención con los ordenamientos oficiales.

5.5.2 Cordón detonante primacord tipo reforzado, tipo E-Cord

Advertencias

SIEMPRE transporte el cordón detonante de acuerdo con todas las leyes y reglamento federales, estatales y municipales correspondientes.

SIEMPRE haga que los demás explosivos, incluyendo el cordón detonante, se separen de los fulminantes, y/o los estopines eléctricos cuando sea permitido su transporte en el mismo vehículo.

SIEMPRE almacene el cordón detonante de acuerdo con las leyes y reglamentos federales, estatales y municipales.

NUNCA almacene el cordón detonante con fulminantes eléctricos.

SIEMPRE almacene el cordón detonante en un polvorín que esté limpio, seco, bien ventilado, razonablemente fresco, debidamente ubicado, de construcción bien sólida, resistente a las balas y al fuego, cerrado y con seguridad.

SIEMPRE use y maneje cordón detonante con el mismo respeto y cuidado que se le dan a otros productos explosivos.

SIEMPRE prepare cebos efectivos de acuerdo con los métodos recomendados y comprobados.

SIEMPRE corra del carrete la línea descendente, colocada en un barreno, antes de cargar éste con explosivos.

SIEMPRE maneje y use el cordón detonante con cuidado para evitar cortarlo o dañarlo durante la carga de los barrenos o al hacer las conexiones.

SIEMPRE haga conexiones positivas y apretadas usando exclusivamente los métodos recomendados y comprobados. Los nudos u otras conexiones de un tramo a otro deben hacerse solamente cuando el núcleo explosivo está seco. Cuando el explosivo del cordón detonante esté húmedo solamente debe detonarse con intensificadores especiales, usando cebado terminal. Consulte al fabricante o a su proveedor.

SIEMPRE evite vueltas y rocas pronunciadas o dobleces en ángulo que dirijan el cordón detonante hacia atrás o hacia el punto original de detonación.

SIEMPRE conecte los fulminantes a los estopines eléctricos empleando únicamente los métodos recomendados por el fabricante. Los fulminantes o estopines deberán apuntar en la dirección deseada de detonación.

NUNCA deje por el suelo el cordón detonante o pedazos del mismo, al alcance de niños o personas no autorizadas.

SIEMPRE destruya sobrantes de cordón detonante siguiendo rigurosamente los procedimientos aprobados. En caso de duda consulte al fabricante o a su proveedor.

5.3 Seguridad en el área de voladuras

5.3.1 Personal responsable

Existen dos versiones acerca de seguridad y voladuras: (1) La responsabilidad más grande del encargado de la voladura es la seguridad; y (2) la seguridad de toda las voladuras depende de que cada persona maneje sus propias responsabilidades en forma profesional.

Reglas, regulaciones y aun el cuidado en la seguridad por parte del encargado de voladuras, no pueden prevenir accidentes, cada persona es responsable por su seguridad personal y la de sus compañeros de trabajo.

5.3.2 Antes de la voladura

Los planes predeterminados deben ser completamente coordinados entre las personas encargadas de las voladuras, empleados, dueños o gerentes de proyecto, así como asegurar que todos los señalamientos y la comunicación sean completamente claros para todos los involucrados. El primer paso para desarrollar un plan de seguridad en voladuras, es observar todo tipo sujeto a posible exposición alrededor del área de voladuras. El área de voladura se define como "el área en donde el golpe de aire, roca en vuelo o gases ocasionados por una detonación de explosivos pueden causar lesiones a personas o dañar propiedades", áreas públicas, carreteras, estructuras u otras construcciones en el área y carreteras de transporte de particular importancia.

Una vez analizadas las explosiones circundantes, se debe determinar los requerimientos de seguridad de una área de voladuras. Posteriormente las personas responsables especificarán que tipo de señalamientos y procedimientos se deben seguir. Si es usted nuevo en un área, asegúrese de conocer todos los requerimientos de seguridad.

5.3.3 Señales de precaución o advertencia

Se debe colocar barras o señales de precaución o advertencia, mostrando que es zona de voladuras, en todos los lugares circundantes al área afectada. Estas señales indicarán peligro donde se encuentren los barrenos con explosivos, deben ser claras y se colocarán en lugares visibles.

5.3.4 Evacuando el área

Se debe elaborar un plan estratégico para evacuar, del área de voladuras, a la gente y equipo. Es responsabilidad del encargado de voladuras, programar el horario de detonación y de comunicarlo a todos los empleados y a los residentes locales para asegurar la operación. Ninguna maniobra como carga y acarreo debe permitirse en el área donde los explosivos están siendo cargados. Los equipos y herramientas deben despejarse por lo menos a 15,23 m (50 pies) de la distancia de las operaciones de cargado. Se debe dar atención especial a todo el equipo, el cual deberá alejarse del área de voladura antes del disparo.

La seguridad se deber reforzar especialmente para la protección del personal involucrado en voladuras y en general de todas las personas. Nunca debe suponerse que el área de voladuras es totalmente segura. Será necesario asegurar completamente, que el área esté totalmente despejada en todas direcciones. La mayoría de las lesiones provocadas por los explosivos se ocasionan por que la zona de voladuras no fue despejada apropiadamente del área de rocas en vuelo.

5.3.5 Señales auditivas de advertencia (Sirena de alarma)

La señal de advertencia deberá escucharse en por lo menos 1 kilómetro de distancia, como condición obligatoria. El procedimiento de advertencia debe ser reconocido por todo el personal que trabaja en la voladura y el ubicado en áreas circunvecinas de la misma, además se deben colocar señales notorias alrededor del área. Esta señal debe dar un margen de tiempo entre el inicio del sonido y el punto de disparo.

5.3.6 Custodiando el área de voladura

Personal responsable deberá bloquear todos los accesos al área de la voladura. Asegurándose que se haya dejado suficiente distancia del área de voladura, para estar afuera de la zona de roca en vuelo. Los guardias deberán estar completamente informados del momento en que deben detener el tráfico sin ninguna excepción. Los salvaguardias deben tener un medio de comunicación con el coordinador de la voladura.

5.3.7 Refugios

Se deberá estar seguro de que la persona que realiza el disparo, está en un lugar seguro y alejado de la voladura. La persona(s) no sólo debe estar protegida de la roca en vuelo, sino también de las rebotadas, desprendimientos y piedras rodadas. Jamás se debe permitir que alguien se encuentre frente a la voladura. Las rutinas de voladura que se consideran seguras, son conocidas por estar alejadas de la zona de disparo, varias veces la distancia normal conocida de alcance de roca en vuelo.

5.3.8 Regresando al área de la voladura

En cada operación el responsable de voladuras debe asegurarse que el disparo no produjo algún peligro imprevisto. Una inspección del área y del material de rezaga se debe realizar por personal calificado o por el supervisor para determinar si las cargas han sido totalmente detonadas. Después del disparo todo el personal debe mantenerse en sus posiciones hasta que toda el área sea revisada y autorizada para que equipo y personal regresen al área recién detonada.

5.3.9 Fallas

Si se encuentra algún problema, por fallas, el supervisor de las voladuras debe proporcionar personal capacitado para alejar a los empleados de área de peligro. Ningún otro trabajo deberá ser realizado excepto el de eliminar el peligro y las fallas, y sólo los empleados necesarios para el trabajo podrán permanecer en el área de peligro.

Cuando existen barrenos quedados se deben hacer las siguientes acciones:

- Identifique la cantidad y localización de los barrenos quedados.
- Lave con agua sus barrenos y saque con cuidado el cebo, con extrema precaución.
- Si no lo puede sacar, detónelo con otro cebo, tomando las precauciones necesarias.
- No barre nunca en chicolones o barrenos quedados.

5.6 Destrucción de explosivos y dispositivos de disparo

Dentro de las operaciones mineras o de construcción es necesario destruir explosivos, agentes explosivos y sus dispositivos de disparo, que estén deteriorados por varias razones como:

- A) Exceso de humedad y temperatura
- B) Caducidad
- C) Recipiente o empaque roto.
- D) Barrenos sin detonar o quedados.

Los explosivos dañados, deflagrados o deteriorados en ocasiones pueden ser más peligrosos que aquellos que conservan sus características de fabricación, por tanto requieren del manejo de una persona capacitada, para que su destrucción sea lo más segura posible y evitar daños a terceros.

5.6.1 Altos explosivos

Los altos explosivos como gelatinas, emulsiones encartuchadas e hidrogeles, pueden destruirse por quema abierta, aunque tardan más por su consistencia líquida, las emulsiones también las consideramos dentro de este método.

Para su quema no deben mezclarse dinamitas, hidrogeles o emulsiones, ya que estos productos tienen diferente sensibilidad y diferente característica al quemarse.

Primero, buscamos un macizo rocoso o terreno compacto, que esté libre de piedras sueltas y material que pueda arder como pasto o ramas, y debe ubicarse lo suficientemente lejos de las áreas habitadas.

Debemos determinar y remarcar el área para que ningún curioso o personal ajeno al manejo de este tipo de material ingrese al área, evitándole así un posible accidente. Estos sitios deben tener las siguientes características:

- A) Guardias en caminos de acceso.
- B) Banderolas y señalamientos preventivos.
- C) Vallas o barricadas.
- D) En la entrada, pizarrón con horario de la quema.

No se deben quemar más de 5 kg por ocasión, cuando se deban quemar más, debe consultarse a la fábrica de explosivo correspondiente, para informarse de probables riesgos, o en su caso recibir el apoyo técnico que se requiera.

Debemos sacar el explosivo fuera de su caja o empaque, es decir, no debe estar confinado. Se extiende sobre una cama de papel o viruta de madera, se le vierte encima diesel o diáfano sobre la cama con el explosivo.

Se debe revisar bien el explosivo a quemar para comprobar que no lleve fulminantes, o cápsula de nonel o estopin eléctrico.

Para encender el montículo o cama ya preparada, colocamos como mínimo un metro de mecha de seguridad (Figura 5.1), efectivamente sin fulminante, después de iniciada la mecha nos alejamos a un lugar protegido y seguro hasta que se haya quemado en su totalidad.

Se revisan las cenizas para verificar que no existan remanentes de explosivos, y en caso de que existan, se repite el procedimiento.

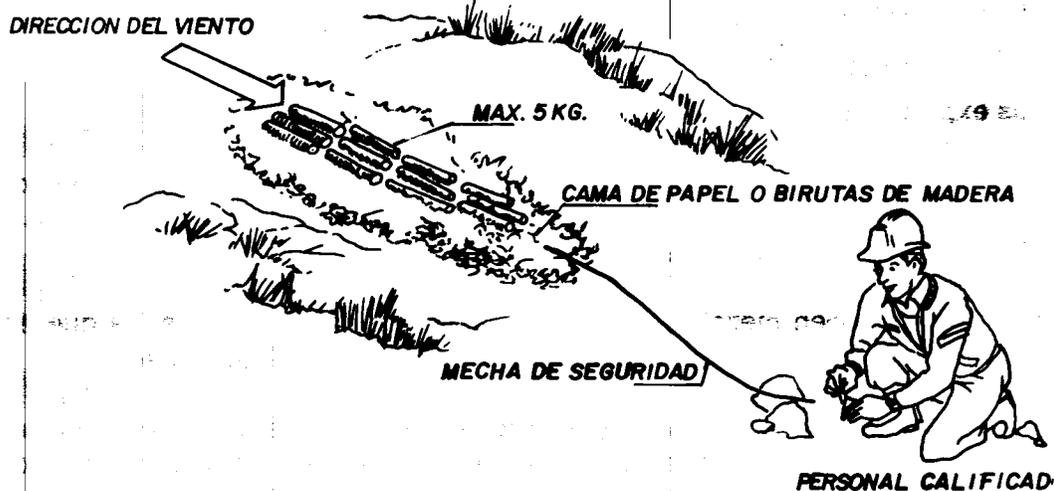


Figura 5.1 Destrucción de explosivos a quema abierta.

5.6.2 Cordón detonante y mecha de seguridad

La destrucción del cordón detonante, mecha de seguridad e ignitacord, se efectúa con el mismo método que para el alto explosivo, por quema abierta; aunque cuando se presente la ocasión de quemar alto explosivo y este tipo de cordones, debe siempre hacerse por separado.

5.6.3 Fulminantes, cápsul nonel, cápsul estopín eléctrico

La destrucción de estos detonadores se lleva a cabo, primero cortando el tubo nonel o los alambres del estopín eléctrico y posteriormente bajarlos a un barreno echándoles una estopa prendida con diesel.

Dicho barreno debe ubicarse alejado de zonas habitadas e instalaciones de cualquier tipo. Los fulminantes sencillos sin engargolar no deben dejarse caer en barrenos con arena u otras impurezas que puedan introducirse dentro de ellos y evite su detonación.

La mejor manera para su destrucción es introducirlos en un cebo ya elaborado con un buen iniciador, y bajarlo en un barreno. (Figura 5.2)

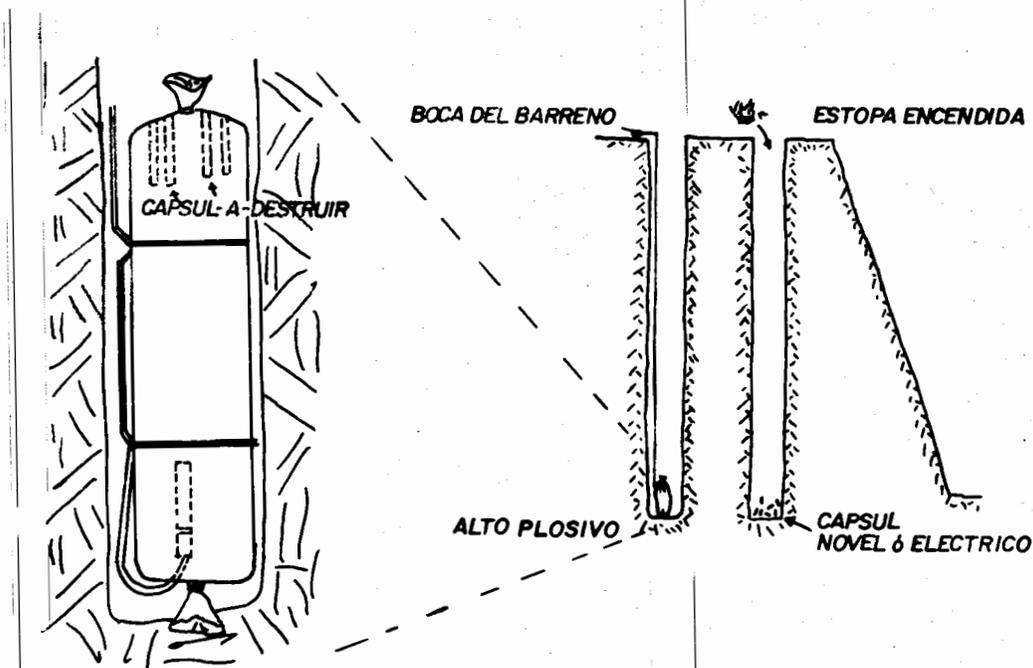


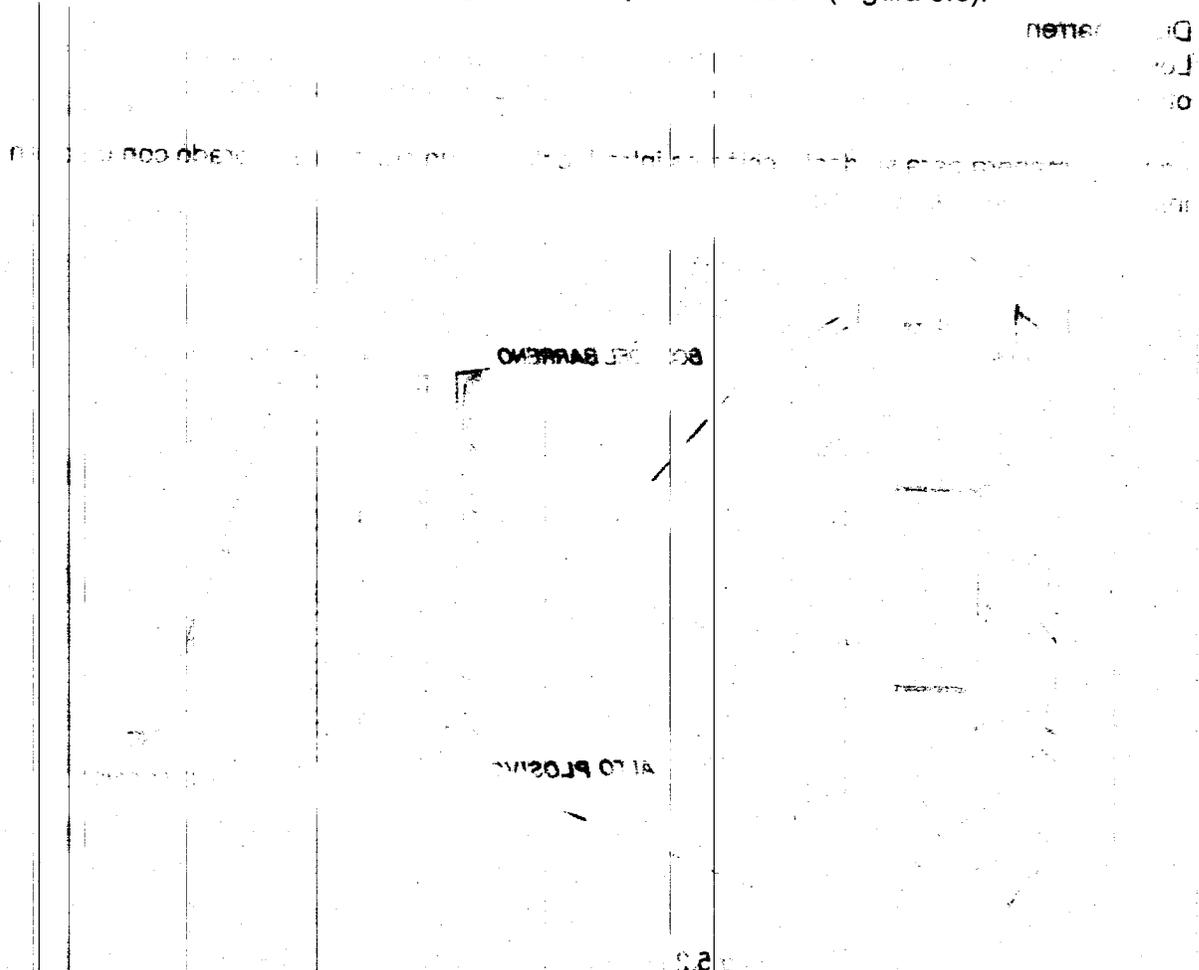
Figura 5.2 Destrucción en barreno.

5.6.4 Agentes explosivos pulvurentos

Este tipo de explosivo por lo general está elaborado con nitrato de amonio y diesel, y su relación en peso es de 94,3% y 5,7%, y las características particulares del nitrato de amonio es de ser hidrocópico o sea, absorbe muy fácilmente el agua diluyéndolo.

Los sacos rotos y nitratos a granel sucio o contaminado, para su destrucción se recomienda introducirlo en tambos con agua y agitar hasta ver diluido el granulado o prill, efectuado esto se desecha el agua.

Para barrenos quedados recomendamos "lavar" el barreno tratando de que esté en contacto con el agente explosivo una gran cantidad de agua, inundando totalmente el barreno, permitiendo que fluya y circule el agua para su pronta dilución (Figura 5.3).



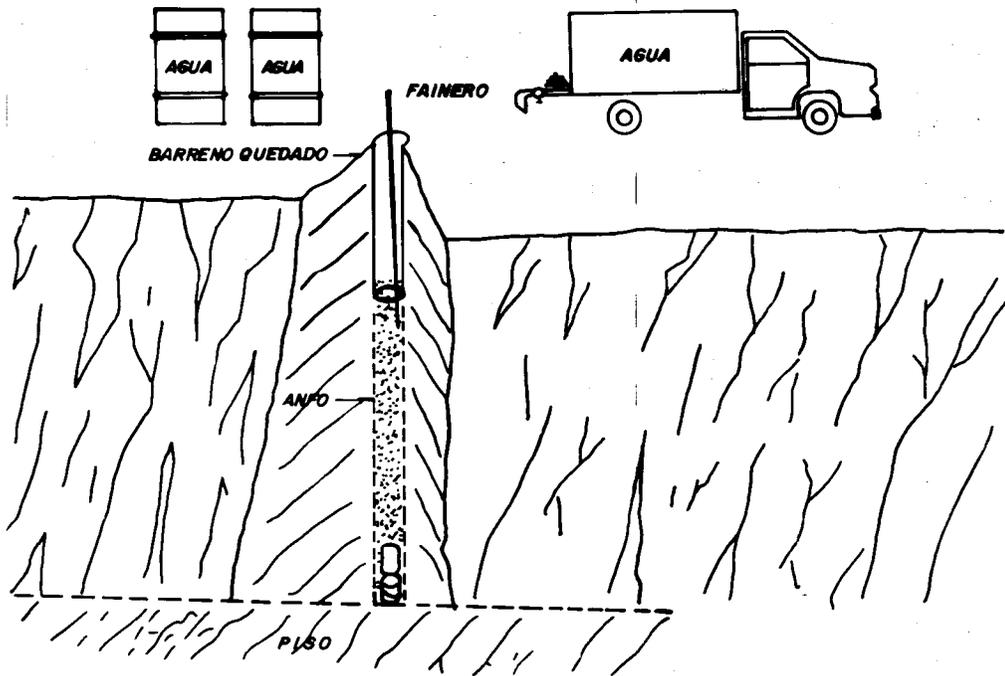


Figura 5.3 Destrucción de los agentes explosivos pulverulentos.

6. DISEÑO DE VOLADURAS

6.1 A cielo abierto

6.1.1 Bancos de roca

La técnica de voladura de rocas se ha desarrollado enormemente en los últimos años, y de una mera ocupación manual en la que fueron fundamentales la experiencia, la habilidad personal y la intuición, se ha pasado a la creación de una tecnología en la que los conceptos básicos, aunque más desarrollados, pueden fácilmente transmitirse a los pobladores e ingenieros.

Las canteras y bancos a cielo abierto producen la mayor parte de la roca requerida para la construcción e industrias del país. El término «tajo abierto» generalmente se refiere a una operación de minado de un material específico, que es extraído de una formación donadora, de donde (con excepción de empaques de material ajeno al requerido) se aprovecha la totalidad del producto. Dependiendo de la topografía del área, una cantera se desarrollará como una ladera de montaña o como un tajo.

En donde el área es montañosa y la roca sobresale, la cantera se desarrollará abriendo una cara en uno de los lados de la montaña. El punto de entrada es generalmente en el fondo del yacimiento. Un punto conveniente se escoge para proporcionar un nivel casi al ras del piso con tan solo el suficiente desnivel para el drenaje natural.

Cuando el terreno es casi plano, es necesario crear rampas hacia abajo, hasta llegar al yacimiento, formando un tajo que estará totalmente por debajo de la superficie del terreno circundante. Es de suma importancia al planear la explotación de un banco de material tomar en cuenta los factores siguientes :

- 1 Tipo de roca.-** El comportamiento de las ondas provocadas por la detonación de un explosivo en un barreno es diferente para cada tipo de roca. La propagación de la onda es más rápida en una roca dura que en una roca blanda. La composición de la roca tiene gran influencia en la fragmentación de la misma y muchas rocas duras se rompen con mayor facilidad que una roca suave.
- 2 Tipo de explosivo.-** Cada explosivo cuenta con características propias como son: densidad, velocidad de detonación, resistencia al agua, energía disponible, etc. Que son de suma importancia para decidir el material explosivo a elegir.
- 3 Factor de carga.-** Se define como la cantidad de explosivo utilizado para fragmentar un metro cúbico de roca y se expresa en gr/m^3 .
El factor de carga a utilizar varía de acuerdo al tipo de roca, pero aún en casos donde se explota un mismo tipo de roca dicho factor puede cambiar, dependiendo del grado de intemperismo, la geología del yacimiento o la capacidad del equipo de acarreo y trituración con que se cuente. Al inicio de una operación es recomendable utilizar un factor más bien alto, que corresponda al tipo de roca y se

deberá de ajustar conforme se observen los resultados, ya que como se mencionó, con anterioridad, un mismo tipo de roca puede responder de manera diferente, aunque dentro de un intervalo determinado.

4 Geología estructural.- La geología del material a fragmentar es el factor más importante al determinarse el diseño total de una voladura. Hay muchas teorías que relacionan la velocidad sónica y la dureza de la roca, utilizadas para determinar la cantidad de explosivo requerida para quebrar el material.

Para determinar estos factores es necesario efectuar pruebas de campo. En la mayoría de los casos, los resultados obtenidos se basan en la suposición que el material a quebrar es homogéneo y los resultados de estas pruebas pueden servir de parámetro para ayudar a determinar la plantilla de barrenación a seleccionar, la cantidad y el tipo de explosivo a utilizar; pero la experiencia es la mejor pauta para determinar el factor adecuado.

Las estructuras geológicas tales como las fisuras, oquedades, fallas y posición de los estratos juegan un factor muy importante en los resultados de una voladura, por lo tanto se deben tomar las precauciones pertinentes para optimizar los resultados.

En rocas fisuradas las voladuras deben ser planeadas cuidadosamente, tomando en cuenta la magnitud de las fisuras; normalmente los patrones de barrenación no deben ser muy amplios y se deberá usar explosivos de baja velocidad de detonación y de alta producción de gases, como es el caso de los agentes explosivos. Cuando se utilizan diferentes tipos de explosivos conviene señalar que las unidades de energía por unidades de peso se deben considerar para comparar sus efectos.

En rocas estratificadas las voladuras deben planearse tomando en cuenta la dirección de la estratificación, esto se logra atravesando con la barrenación los planos de contacto de los estratos, para optimizar así el funcionamiento de los explosivos.

5 Barrenación.- Dentro de este renglón los factores a considerar son el diámetro, la profundidad, el paralelismo, las plantillas de barrenación y la sub-barrenación.

La selección del diámetro de barrenación está estrechamente ligada al tamaño de la fragmentación requerida, la altura del banco de material y las economías en conjunto, como la inversión inicial y los costos de operación, aunque es común el uso de diámetros entre 6,35 y 8,89 cm para frentes de explotaciones no mayores a 12 m de altura y de 10,16 a 30,48 cm de diámetro para explotaciones mayores y de volúmenes muy grandes de extracción. Para determinar la altura del banco hay que tomar en cuenta el equipo de rezagado disponible, ya que las voladuras deberán contemplar el mayor ahorro posible de trabajo en todos los aspectos, aunque la altura del banco puede determinarse también por el espesor de la formación; sin embargo, dado que la mayoría de las formaciones exceden los límites prácticos de espesor operable, el factor determinante en la selección de la altura de los bancos generalmente esta basado en la seguridad.

La estabilidad inherente de la formación es el factor controlante de seguridad en la selección de la altura de los bancos, es decir, que no se debe de operar a mayor altura que la permisible por los intervalos de estabilidad del material a explotar.

El paralelismo entre barrenos, así como la simetría del patrón de barrenación, son factores que intervienen en la homogeneidad de la fragmentación de una voladura. Cuando no se tiene en cuenta este factor los resultados obtenidos no son homogéneos, pudiéndose presentar en algunos lugares como excelentes y en otros malos dentro de una misma voladura, debido a concentraciones diferentes de carga explosiva provocadas por la desviación de los barrenos.

De la plantilla de barrenación depende el buen resultado de una voladura, ya que la distribución de los barrenos dentro del área a volar es fundamental para lograr que la roca se fragmente adecuadamente y la distribución del explosivo en toda la voladura sea el pertinente. Las plantillas de barrenación más comunes son tres; cuadrada o reticular, rectangular y en tresbolillo.

La plantilla cuadrada tiene igual bordo y espaciamiento y los barrenos en cada fila están directamente alineados detrás de los barrenos de la línea del frente (Figura 6.1).

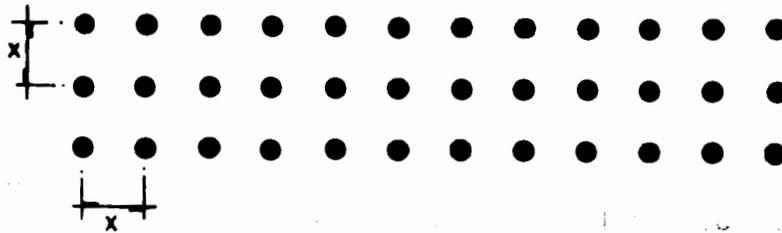


Figura 6.1 Arreglo de la plantilla cuadrada.

La plantilla rectangular tiene bordo menor que el espaciamiento. Y como en la cuadrada, también los barrenos están alineados detrás de los de la línea del frente (Figura 6.2).

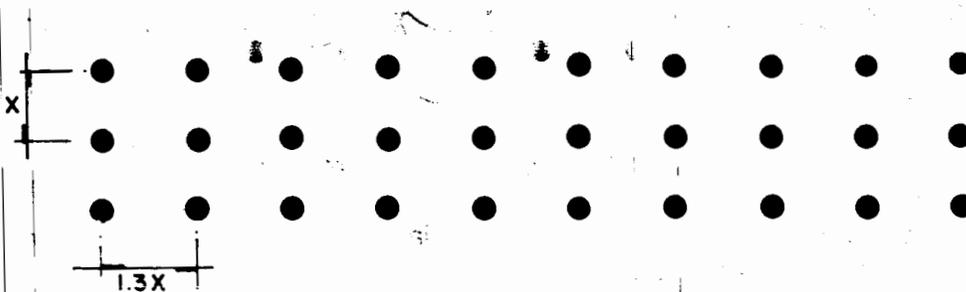


Figura 6.2 Arreglo de la plantilla rectangular.

La plantilla en tresbolillo puede tener la misma distancia de bordo y espaciamento, pero es más común encontrar mayor distancia en el espaciamento que en el bordo; un intervalo confiable de espaciamento es de 1,3 a 1,5 veces el bordo (Figura 6.3).

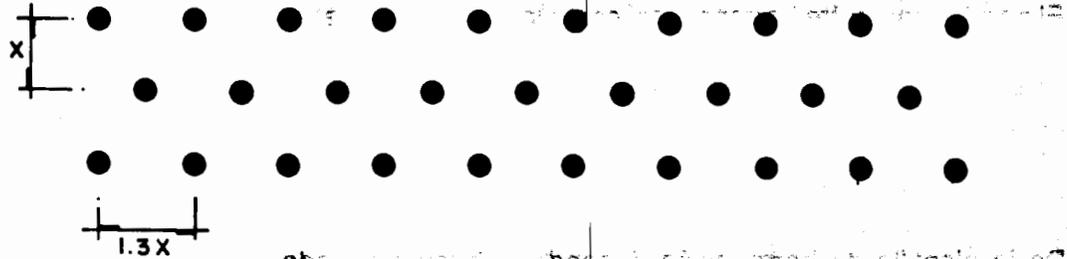


Figura 6.3 Arreglo de la plantilla en tresbolillo.

Sobre la superficie del banco las áreas fracturadas alrededor de los barrenos pueden representarse como círculos. Es lógico asumir, que todos los puntos superficiales deben caer dentro de uno de los círculos para que ocurra una fragmentación efectiva. En la figura 6.4 se muestra lo que sucede cuando la plantilla es rectangular y los barrenos están dispuestos uno detrás del otro, la relación bordo espaciamento es de 1:1,25, comparado con lo que sucede en una plantilla de barrenación con los barrenos dispuestos en tresbolillo.

Este tipo de plantilla produce una mejor distribución del círculo de fracturas, por lo tanto habrá mayor fragmentación en la rezaga utilizando un mismo factor de carga. Teóricamente el punto optimo se obtiene cuando los barrenos forman un triángulo equilátero.

En este patrón de barrenación reticular se notan áreas entre los círculos de influencia del explosivo que no se cubren y otras con sobrerompimiento.

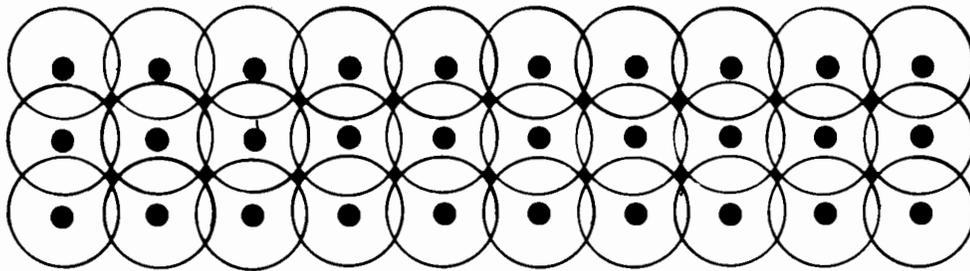


Figura 6.4 Patrón de barrenación reticular.

En el patrón de barrenación en tresbolillo se aprecia una cobertura más homogénea de la influencia del explosivo (Figura 6.5).

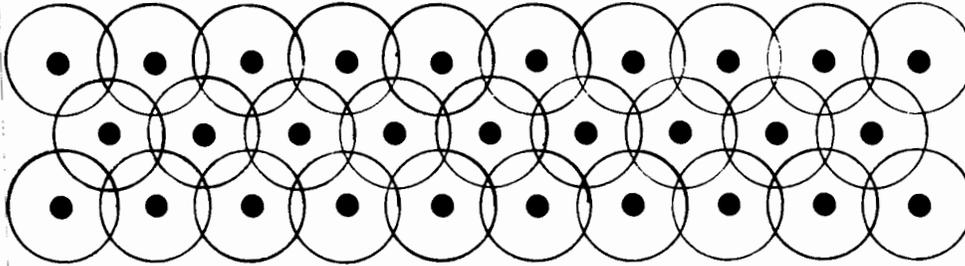


Figura 6.5 Patrón de barrenación en tresbolillo.

Como en lo anteriormente expuesto, la sub-barrenación se determinará de acuerdo a la geología del terreno, la plantilla de barrenación y el número de hileras que se pretendan disparar; esta consiste en darle a la longitud de la barrenación una sobrelongitud que no deberá ser menor a un tercio del bordo y a medida que las hileras se incrementen, se deberá aumentar esta sobre-longitud (comúnmente llamada sub-barrenación). Esto es necesario dado que el área reducida para el movimiento de roca opone mayor resistencia conforme a la longitud hacia el bordo.

6 Distribución de los explosivos en el barreno.- Este es generalmente el factor más importante para la fragmentación adecuada del material, está controlado por el diámetro de los barrenos y por la plantilla de barrenación utilizada; sin embargo, la distribución individual del explosivo en el barreno es otro factor importante.

En la mayoría de las formaciones, el fondo del barreno presenta la mayor resistencia en el movimiento del material a explotar, por lo tanto se utiliza una regla de campo que muchos pobladores o personas encargadas de colocar explosivos conocen, y consiste en diseñar la carga dentro del barreno de tal forma que la mitad del total del alto explosivo se encuentre localizada en el primer tercio del barreno. Esta es tan sólo una regla empírica y la distribución del explosivo debe determinarse de acuerdo a las condiciones geológicas y a la dureza del material que se esté explotando.

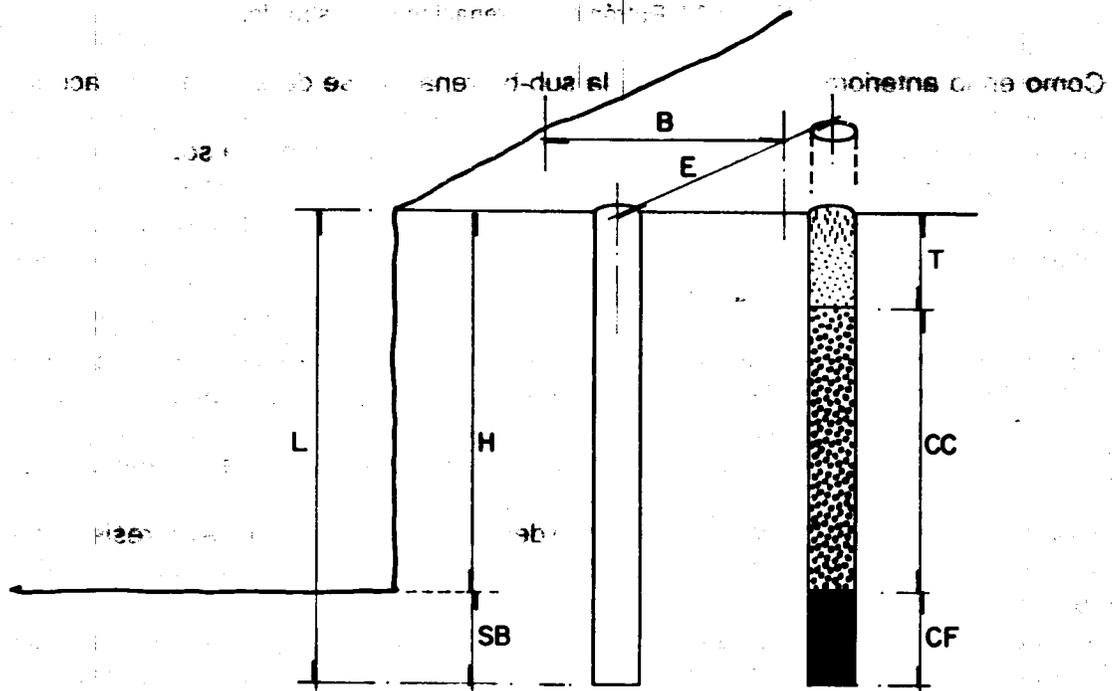
Debe tomarse en cuenta que la máxima energía deberá localizarse en el fondo del barreno, decreciendo gradualmente a medida que la columna de explosivo se eleve hasta una profundidad preestablecida para el taco.

El cebado adecuado es de vital importancia para obtener una reacción completa del explosivo que se está detonando, esto es tanto en cantidad como en calidad del producto cebante. Se debe considerar que la presión de detonación del cebo deberá ser superior a la presión de detonación del producto cebado, con el fin de obtener un iniciado eficaz.

Los cebos son más efectivos cuando se colocan de tal manera que la onda de detonación de los iniciadores y de la carga cebo, viajen hacia el explosivo a cebar y en dirección hacia donde se desplazará la onda de detonación.

7 Relación de explosivos.- La relación de explosivos se determina de acuerdo a las condiciones del banco como son: geología estructural, humedad, dureza, etc; pero puede variar en condiciones normales en una relación de alto explosivo-agente explosivo dentro de un intervalos de 30-70 hasta 10-90 de porcentaje en peso. Es decir, que si en un barreno el total de explosivo a cargar es de 10 kg, tomando la primera relación, 3 kg correspondería al alto explosivo y 7 kg al agente explosivo.

8 Parámetros de voladuras.- Es importante para adentrarse en el manejo y cálculo de una voladura conocer los parámetros que intervienen en ella (Figura 6.6).



- B = BORDO (MTS)
- E = ESPACIAMIENTO (MTS)
- L = LONGITUD DEL BARRENO (MTS)
- H = ALTURA DEL BANCO (MTS)
- T = LONGITU DEL TAQUEO (MTS)
- SB= SUB - BARRENACION (MTS)
- CC=CARGA DE COLUMNA (KG)
- CF=CARGA DE FONDO (KG)

Figura 6.6 Parámetros que intervienen en una voladura.

9 Taco.- El taco se define como la longitud que hay entre la terminación de la carga explosiva dentro de un barreno y el borde de éste, longitud que está cubierta por material (de preferencia gravilla) con el propósito de evitar el escape de energía y la presión del explosivo al momento de la detonación. La distancia entre la columna de explosivo y la boca del barreno (este tramo relleno con material de atacamiento) es un factor primordial para el control de roca en vuelo.

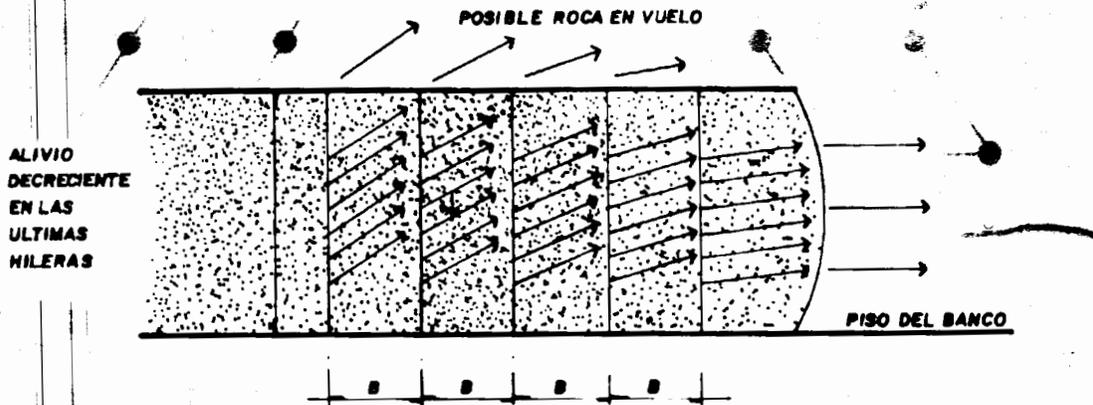
Podría, hasta cierto punto, ser riesgoso sugerir la longitud del taco para determinada longitud de barrenación, este taco se selecciona tomando en cuenta la cantidad de explosivo a utilizar, la dureza del material a explotar y la cantidad de roca en vuelo que pueda tolerarse, además de buen juicio y experiencia.

El «taqueo» deberá efectuarse con el mismo cuidado como el que se realiza en el cargado de explosivo del barreno, teniéndose especial cuidado para no dañar los dispositivos de iniciación. El posible daño que pudiera causarse al sistema de iniciación al intentar retacar de sobremanera el barreno, es demasiado grande para justificar la ligera ventaja que se puede lograr con la compactación.

10 Retardos en voladuras.- Aunque se cuente con dos vías de desalojo del material en una explotación de tajo (el frente y la parte superior), la velocidad de la roca al volarse con explosivos es un factor muy importante a considerar. Esto es más importante en voladuras de varias hileras de barrenos. Para una cantera típica, con espaciamentos de 3,00 m, el movimiento inicial en la cara libre ocurre de 10 a 12 milisegundos, pero el bordo únicamente se mueve como 15 cm en 10 milisegundos, esto da como resultado que conforme se detonen las líneas posteriores el vuelo de las rocas, producto de estas líneas, tenderá a la vertical (Fotografía 6.7).

Esto es causado por la baja velocidad de la roca quebrada, reduciendo consecuentemente el alivio hacia la cara del banco. Y puede contribuir a producir un fondo apretado así como bastante roca en vuelo.

AL AUMENTAR EL NUMERO DE HILERAS, EL MOVIMIENTO DE LA ROCA TIENDE A LA VERTICAL, DEBIDO A LA BAJA VELOCIDAD DE LA ROCA QUEBRADA, REDUCIENDO SUCESSIVAMENTE EL ALIVIO HACIA LA FRENTE DE LA CANTERA.



H = ALTURA DE BANCO

B = BORDO O DISTANCIA ENTRE LINEAS DE BARRENOS

Figura 6.7 Retardos en voladuras.

Al aumentar el número de hileras, el movimiento de la roca tiende a la vertical, debido a la baja velocidad de la roca quebrada, reduciendo sucesivamente el alivio hacia la frente de la cantera.

Dos hileras de barrenos conectados en un sistema troncal de primacord y líneas transversales con retardadores MS en tres lugares. La primera hilera de barrenos es disparada instantáneamente y la segunda se retarda un periodo. La letra X indica la colocación de los retardadores MS. La voladura puede iniciarse en cualquiera de los barrenos del frente utilizándose generalmente mecha y fulminante (Figura 6.8).

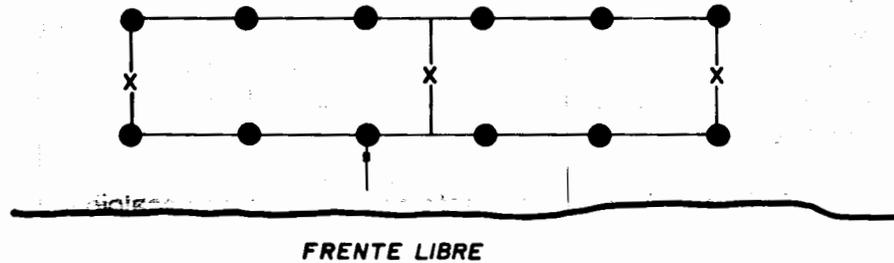


Figura 6.8 Colocación de los retardadores en dos hileras de barrenos conectados en un sistema troncal

Tres hileras de barrenos conectados por medio de un sistema múltiple de líneas troncales; el barreno del centro en la primera línea troncal disparará instantáneamente y los demás serán retardados progresivamente de acuerdo con los tiempos escogidos, representados en la figura por medio de la letra X, nótese que en este dibujo como el anterior cada barreno tiene dos rutas por donde puede llegar la onda explosiva retardada, para mayor seguridad (Figura 6.9).

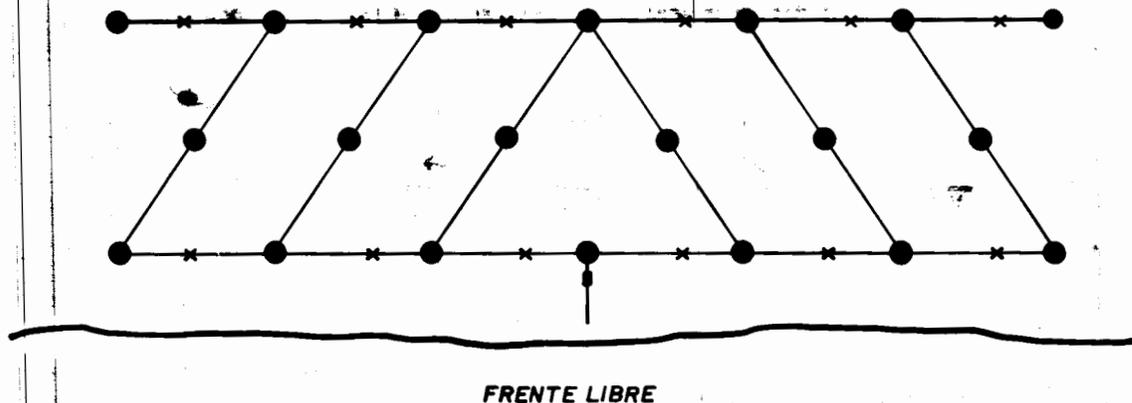


Figura 6.9 Colocación de los retardadores en tres hileras de barrenos conectados en un sistema múltiple.

La utilización de retardos entre línea y línea de barrenos da la oportunidad de provocar el desahogo necesario y la roca presenta dos ventajas; la primera, se reduce la roca en vuelo hasta niveles mínimos y la segunda, se tiene el control de la roca al rezagar, ya que con una adecuada distribución de los tiempos, se puede dirigir la voladura de tal manera que se apile hacia el centro del frente de la voladura o en todo el ancho del mismo.

La práctica más común en la actualidad para el retardo de las voladuras se realiza con conectores MS (retardos de superficie) y/o primadet (retardos de fondo), mismos que se utilizan conjuntamente con cordón detonante.

En los casos donde se utilizan retardos de superficie, se puede elegir entre usar retardos de un mismo tiempo o combinar dos o más. Muchos pobladores utilizan un tiempo más largo en la última línea de barrenos, con el propósito de incrementar el alivio en esta hilera, ya que así se evita el agrietamiento de la nueva cara del banco al momento de la voladura.

La secuencia de tiempos con este tipo de retardos de superficie es prácticamente ilimitada, ya que el retardo es acumulativo de línea a línea.

Como ya se mencionó, en su oportunidad, estos retardos se comercializan en tiempos que van desde 9, 17, 25, 35 y 65 milisegundos.

En el caso de los iniciadores no-eléctricos o primadet, por sus características, proporcionan resultados impresionantemente buenos, ya que permite retardar cada uno de los barrenos con bastante seguridad y diseñar la voladura para salidas alternativas a la misma, pudiendo superar la limitante de los tiempos disponibles (de 0 al 14) con la combinación de conectores MS de superficie, traduciéndose a una infinita posibilidad de tiempos.

Otra ventaja para el mejor aprovechamiento de los retardos lo representa la forma de amarre del cordón detonante con respecto a los barrenos, y el método más usado es el de echelon abierto o cerrado. Las figuras 6.11 y 6.12 representan dos diferentes aplicaciones.

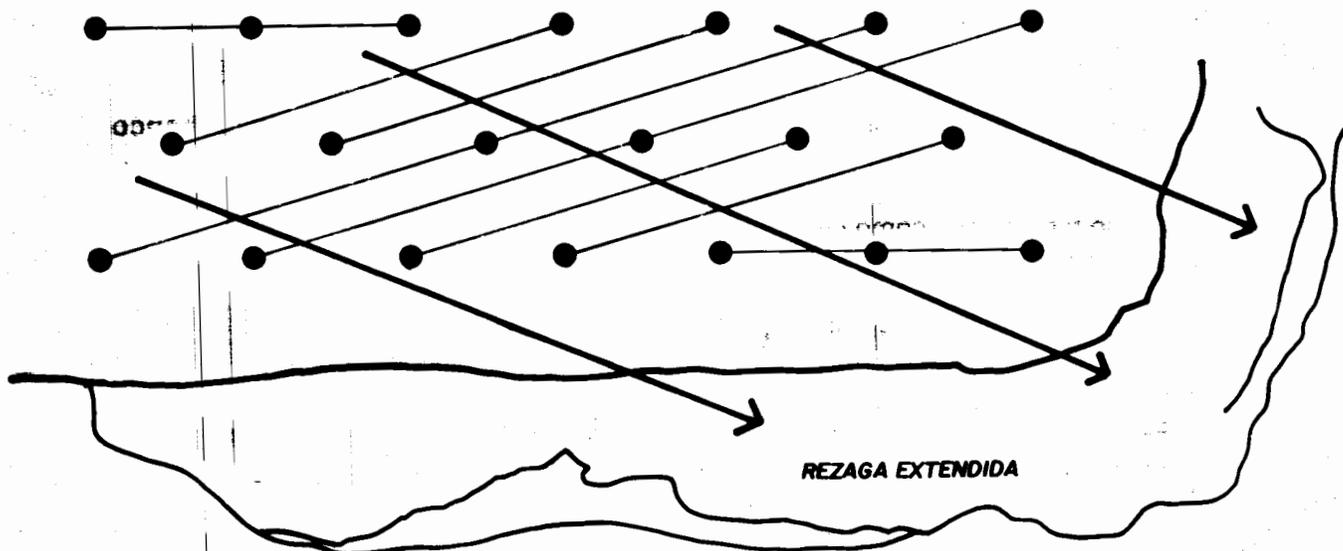
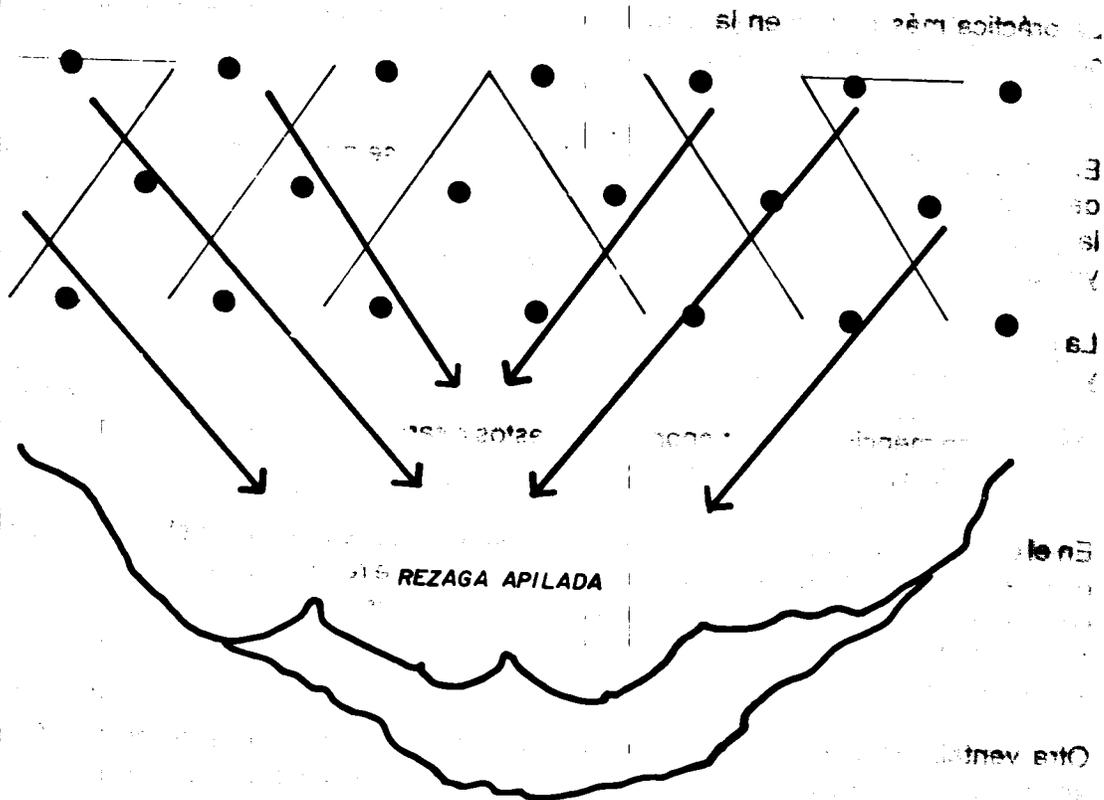


Figura 6.10 Amarre del cordón detonante con el método de echelon abierto.



Figuras 6.11 Amarre del cordón detonante con el método de echelon cerrado.

Cálculo de plantilla de barrenación y explosivos para una voladura tipo en un banco de piedra o explotación de un tajo

Para el cálculo tomaremos como ejemplo el banco de roca riolítica, en el cual se utiliza un diámetro de barrenación de 7,62 cm (3") para producir agregados.

Tipo de roca a explotar: Riolita
 Densidad de la roca: 2,5 gr/cm³
 Velocidad sónica: 3,700 a 3,500 m/s
 Resistencia máxima a la compresión: 3,000 kg/cm²
 Resistencia máxima a la tensión: 300 kg/cm²
 Diámetro de barrenación disponible: 7,62 cm (3")
 Altura del banco: 8.00 m.

Es de uso generalizado en el diseño de una plantilla de barrenación, tomar como punto de partida las siguientes relaciones:

Bordo = 30 veces el diámetro de la barrenación, entonces:

Bordo = $30 \cdot (7,62 \text{ cm.})$

Bordo = 228 cm 2,30 m.

Espaciamiento = bordo $\cdot 1,2$

Espaciamiento = $2,30 \text{ m} \cdot 1,2$

Espaciamiento = 2,80 m

Sub-barrenación = bordo $\cdot 0,3$

Sub-barrenación = $2,3 \cdot 0,3$

Sub-barrenación = 0,69 0,70 m

Taco = bordo $\cdot 0,9 \text{ m}$

Taco = $2,3 \cdot 0,9 \text{ m}$

Taco = 2,07 2,10 m

Entonces la plantilla resultante será:

$2,30 \cdot 2,80$ (bordo/espaciamiento), con una profundidad de barrenación de 8,70 m, taco de 2,10 m. Y una sub-barrenación de 0,70 m.



PROFUNDIDAD DE BARRENACION Y SUB-BARRENACION

Figura 6.12 Profundidad de barrenación y sub-barrenación.

Para este tipo de explotación se usará una plantilla a tresbolillo, ya que se ha demostrado que es la más efectiva dentro de las actuales (Figura 6.13).

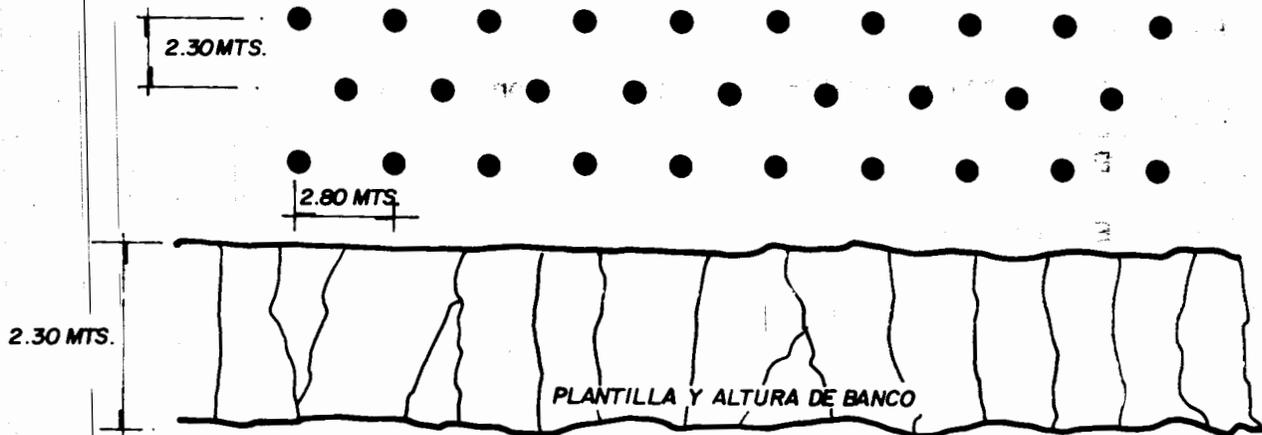


Figura 6.13 Plantilla a tresbolillo que muestra la altura del banco.

Ahora determinaremos el volumen de roca por barreno:

Vol= bordo * espaciamiento * altura de banco (no incluir sub-barrenación)

Vol= 2,30 * 2,80 * 8,00

Vol= 51,52 m³

Para el cálculo del factor de carga tenemos que determinar la longitud efectiva del barreno (LEC), que se puede cargar de explosivos y esto lo obtenemos restando la longitud del taco (T) de la profundidad de barrenación (PB, incluyendo la sub-barrenación).

LEC = PB - T

LEC = 8,70 m - 2,10 m

LEC = 6,60 m

Para un diámetro de 7,62 cm la carga de explosivo por metro (CE/m, en explosivos de densidad 1,0 gr/cm³) es de 3,55 kg/m. Para este caso los explosivos comerciales que se utilizarán son:

Alto explosivo : Emulgel 2000 (5,08 x 40,64 cm y densidad de 1,2 gr/cm³)

Agente explosivo : dinitramex (a granel y densidad de 0,85 gr/cm³)

Es necesario determinar la proporción del alto explosivo y el agente explosivo (anfo) que se usarán en este cálculo, que confiablemente serían de 20:80, respectivamente, con el propósito de eficientarlo después de observarse los primeros resultados. Para efectos de cálculo, es muy común utilizar el criterio del factor de densidad (FD), que nos proporciona un parámetro bastante confiable del promedio de las densidades de acuerdo a una relación de carga determinada. Es así como se obtiene la carga total de explosivo por barreno y las cargas correspondientes de alto explosivo y agente explosivo, el procedimiento es el siguiente:

Densidad () Emulgel 2000

1,20 gr/cm³

Densidad () Anfo Emulgel C 0,86 gr/cm³
 Relación de carga 20 % Alto Explosivo 80 % Agente Explosivo

Factor de densidad (FD)= (Emulgel 2000-20%)+(Dinitramex-80%)
 FD= 0,928 gr/cm³

Ahora obtendremos la carga de explosivo (CE) por m para un factor de densidad de 0,928 gr/cm³. Y un diámetro de barrenación de 7,62 cm (3"):

Carga de explosivo por m (CE/m)= $\pi \cdot r^2 \cdot 100 \cdot FD$
 $CE/m = 3,1416 \cdot (3,81)^2 \cdot 100 \cdot 0,928$
 $CE/m = 4,230 \text{ gr/m}$
 $CE/m = 4,230 \text{ kg/m}$

Para obtener la carga total de explosivo por barreno (TEB) y la correspondiente al alto explosivo (ALEB) y al agente explosivo (AGEB), procedemos de la siguiente manera:

Carga total de explosivo por barreno (TEB)= LEC-CE/m
 $TEB = 6,60m \cdot 4,230 \text{ kg/m}$
 $TEB = 27,91 \text{ kg.}$

Total de kg de alto explosivo por barreno (ALEB)= TEB* 20%
 $ALEB = 27,910 \cdot 0,20$
 $ALEB = 5,580 \text{ kg} = 5,500 \text{ kg.}$

Como los cartuchos de emulgel 2000 en medida de 5,08 x 40,64 cm tienen un peso de 1,000 kg, ajustaremos la cantidad a 5,500 kg para así utilizar 5,5 pzas. de cartuchos y facilitar la operación.

Total de kg de agente explosivo por barreno (AGEB)= TEB - ALEB
 $AGEB = 27,910 - 5,500$
 $AGEB = 22,410 \text{ kg}$

Después de haber obtenido tanto el volumen de roca a explotar por barreno (VOL), como el total de kilogramos de explosivos por barreno (TEB), podemos determinar el factor de carga FC que resulte para este caso.

Factor de carga (FC) = TEB / VOL
 $Fc = 27,91 \text{ kg} / 51,52 \text{ m}^3$
 $Fc = 0,541 \text{ kg/m}^3$

El factor de carga obtenido es bueno para iniciar la explotación del banco en cuestión, aunque la aplicación y los resultados obtenidos marcarán la pauta para aumentar o disminuir el factor, ya que como se ha venido insistiendo, cada explotación es un caso especial que se deberá considerar particularmente, para realizar las adecuaciones necesarias que generen los resultados más óptimos.

Distribución de la carga en el barreno.

Como se comentó con anterioridad, la mayor resistencia dentro de un barreno se encuentra al pie del mismo y por eso es recomendable que la carga del alto explosivo (comúnmente llamado «cebo») deba situarse en esta zona con un doble propósito; el primero consiste en iniciar confiablemente la columna de explosivo y el segundo en abatir la resistencia que se tiene al pie del barreno, en algunos casos especiales se utilizan cargas intermedias de alto explosivo, pero un porcentaje aproximado de alto explosivo a utilizar como cebo será del 40 al 50% del total y el demás explosivo se distribuirá a distancias iguales entre la carga del agente explosivo (Figura 6.14).

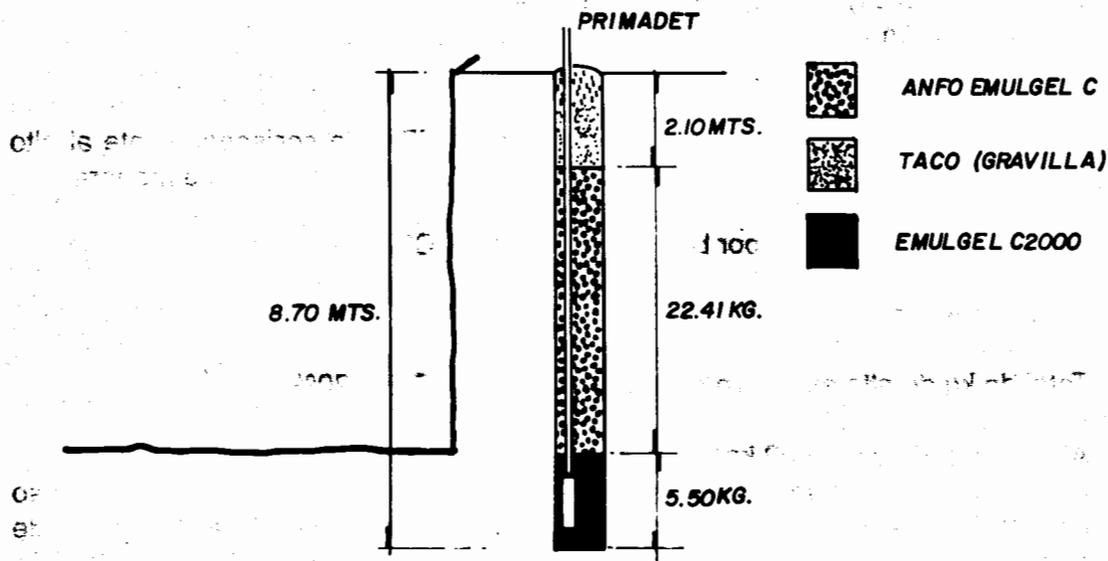


Figura 6.14 Distribución de la carga explosiva en el barreno.

Forma de cargado; es muy importante mencionar la forma de cargado de los barrenos para lograr el máximo resultado deseado, aunque en el párrafo anterior se describió la distribución de las cargas es preciso mencionar los siguientes pasos:

- 1) En el primer bombillo que se introduce en el barreno como carga de fondo, deberá insertarse el cápsul del primadet correspondiente a cada barreno (según diseño de retardos) y con el tubo de choque se efectuarán dos nudos perimetrales en el bombillo a manera de sujeción, después se hará llegar al fondo del barreno el bombillo de manera suave, para evitar cualquier golpe al iniciador. El tubo de choque del primadet deberá salir hasta el exterior del barreno, con el propósito de que pueda ser insertado el gancho «j» al cordón detonante y éste conduzca desde la superficie al primadet, la onda detonante que iniciará en el retardo correspondiente, iniciará a la carga de fondo y a su vez a la carga de la columna del barreno.

- 2) Todos los bombillos introducidos en el barreno se deberán «rajar», es decir, se les hará una incisión a lo largo del bombillo con el fin de lograr un buen confinamiento del explosivo.
- 3) Al momento de atacar el barreno, es decir de taponar el barreno con el material usado como taco, se deberá hacer con cuidado para no maltratar el tubo de choque del primadet y así evitar fallas (Figura 6.14).

Diseño de amarres y distribución de tiempos

Para formaciones como la que se presentan en este cálculo, se decidió utilizar el sistema de amarre de echelon cerrado. Porque se pretende que la carga quede apilada hacia el centro del banco y en lo que respecta al tiempo de retardo se utilizarán iniciadores no-eléctricos o primadets, debido a que es un banco de riolita muy consolidado y se pretende tener el menor grado de vibraciones. En la figura 6.15 se muestra el diseño.

La numeración, en la figura antes citada, de la parte inferior de cada línea corresponde a la nomenclatura adoptada por el fabricante y muestra la secuencia de detonación de cada barreno.

La numeración de la parte superior de cada línea corresponde al tiempo de retardo en la voladura de cada uno de los barrenos.

Para el cálculo del volumen de explosivo requerido en esta voladura, se efectuaron un total de 63 barrenos, con los cuales se procedió a calcular el material necesario para este propósito:

La numeración de la parte inferior de cada línea corresponde a la nomenclatura adoptada por el fabricante y muestra la secuencia de detonación de cada barreno. La otra numeración significa el tiempo de retardo en la voladura de cada uno de los barrenos.

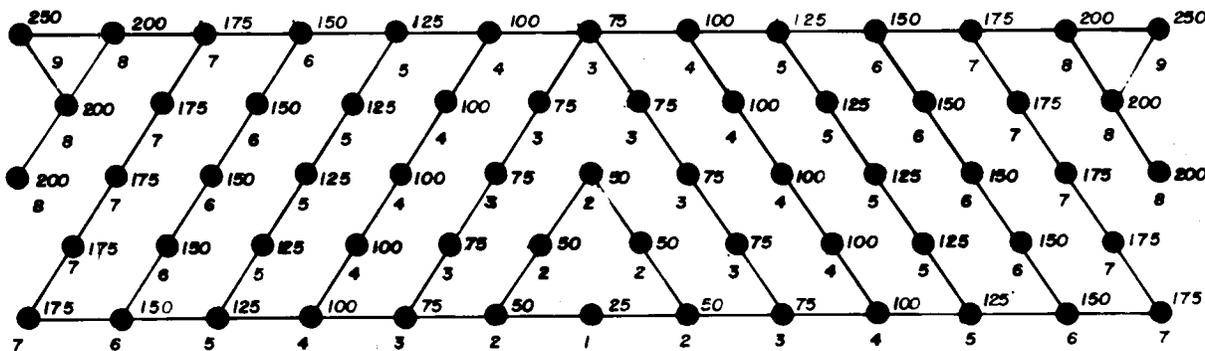


Figura 6.15 Detalle del diseño de amarres (amarre de echelon cerrado).

Alto explosivo (Emulgel 2000 5,08 x 40,64 cm)	
Total de barrenos.....	63
Por barreno.....	5,5 kg
Total de alto explosivo.....	346,5 kg

Agente explosivo (anfo emulgel c)
 Total de barrenos..... 63
 Por barreno..... 22,41 kg
 Total de agente explosivo..... 1411,83 kg

Cordón Detonante (Primacord Deta-Cord)

Total de barrenos..... 63
 Por barreno..... 9,00 m
 Total de barrenos..... 567 m
 Conexión entre barrenos..... 230,30 m
 Total de cordón detonante..... 797,30 m

Iniciadores No-Eléctricos Primadet MS 76,20 cm (30")

No. de secuencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No. de piezas	1	5	9	10	10	10	10	6	2

Artificios iniciación

Fulminantes..... 2 piezas
 Cañuela..... 2,00 m

6.2 Voladuras Subterráneas

Cuando es necesario romper y desplazar la roca, para llevar a cabo un proyecto de construcción, se utilizan técnicas de voladura para este fin, el tamaño y alcance de alguno de estos proyectos pueden ser enormes, tales como los proyectos hidroeléctricos o sistemas de transporte como el Metro. Cada proyecto es único, por lo que se requiere tomar importantes consideraciones tanto en el diseño de la voladuras como en la aplicación de los explosivos, tomando en cuenta las condiciones locales del terreno, las restricciones y cuidados que requiere el proyecto. El reto de los responsables de las voladuras es obtener la fragmentación y el desplazamiento deseados, manteniendo los niveles de vibración y golpe de aire bajo control, de acuerdo a las restricciones permitidas. El tipo de explosivo, así como la cantidad, geometría y distribución de los mismos, dentro de una masa rocosa, pueden ser factores manejables. La geología y las condiciones del medio ambiente local de las voladuras pueden ser variables muy difíciles, pero algunas veces son posibles de manejar por los expertos en voladuras. Los proyectos de construcción que requieren el uso de explosivos pueden dividirse dentro de dos categorías: obras de superficie y obras subterráneas.

6.2.1 Obras Subterráneas de Construcción

En este trabajo nos limitaremos a las obras de construcción subterráneas. La construcción de túneles, pozos o lumbreras, son trabajos altamente especializados que requieren un entrenamiento único. Los túneles y pozos pueden variar en intervalos de tamaño que van desde 1,524 a 8,288 m (5 a 60 pies) de diámetro. Estas obras se construyen para uso

subterráneo en autopistas, vías férreas, conductores de agua, sistemas masivos de tránsito y desarrollos mineros subterráneos. Las técnicas para la construcción de túneles y pozos se han desarrollado en forma impresionante en los últimos años. Los equipos hidráulicos de alta capacidad y los utilizados para bombear la emulsión han mejorado, aumentando rápidamente las tasas de rendimiento en la producción. Los diámetros de perforación varían de 3,81 a 8,89 cm, los factores de carga de explosivo son altos, del orden de 1,75 a 4,75 kg/m³ y los factores de energía de 5,617 a 15173 kj/m³.

Es de suma importancia que los barrenos sean dados en la posición y orientación correcta. El marcaje de los barrenos en la cara, antes de ser perforados, debe hacerse con gran exactitud, los errores en la perforación tienen un efecto muy significativo, sobre todo en las operaciones subterráneas de voladuras.

La principal diferencia entre las voladuras en túneles, pozos y voladuras de banco, es que en las voladuras de túneles y pozos solamente tenemos una cara libre, mientras que en las voladuras de banco se tienen dos o más caras libres.

En las voladuras de túneles y pozos es necesario crear una segunda cara libre (cuña), hacia donde la roca pueda quebrarse y desplazarse. La segunda cara libre se produce por la localización y orientación de los barrenos en la frente y disparados en un predeterminado orden, antes del resto de la voladura. Después de que se hace el corte, el resto de los barrenos en la voladura se disparan hacia la cara libre, de acuerdo al diseño de retardos. El diseño de los barrenos restantes en el disparo se pueden comparar a una voladura de banco, en el entendido que las desviaciones de la perforación producen efectos muy importantes en los resultados y que se utilizan altos factores de energía debido a lo encajonado de la voladura. Los barrenos a lo largo del contorno de los límites de excavación del túnel, al igual que los barrenos de cielo (techo), los barrenos de costilla (pared) y barrenos de piso, tienen que ser con cierto ángulo hacia afuera de los parámetros de diseño de la excavación, estos barrenos permitirán el acomodo del equipo de perforación en el siguiente disparo.

6.2.2 Tipo de Túneles

6.2.2.1 Métodos de frente completa

Este un método usual en túneles de pequeño y mediano tamaño. En este método se dispara la sección completa y el éxito de su aplicación depende no solamente de la eficiencia de la perforación, sino también del ciclo de la operación. La secuencia ideal consiste en: perforación, voladura y rezagado completo del material acumulado por el disparo. El patrón de perforación, la profundidad, el número de barrenos, el equipo de perforación, el rezagado, la ventilación, etc., deben ser por lo tanto bien seleccionados para llevar a cabo el ciclo completo.

6.2.2.2 Métodos de ataque superior y banco.

Posiblemente es el método más utilizado, y consiste en abrir un túnel a lo largo del techo de la sección, consiguiéndose acceso para sanear y reforzar la roca en dicha zona. El resto de la sección se remueve con uno o más bancos. Este método se aplica en túneles de más de 10 metros de diámetro y sirve para reducir costos de perforación y voladura. Las voladuras

en este tipo de operación normalmente se realizan en forma muy confinada, aun cuando parte del banco tenga dos caras libres, para permitir una mejor voladura se recomienda rezagar el material de la voladura anterior. En la sección de banqueo las cargas de explosivos se calculan como en las voladuras normales de banco. Si los disparos se hacen con material al frente, las cargas deben calcularse para permitir el abundamiento; sin embargo, esto produce mayores niveles de vibración.

6.2.3 Voladuras en hundimiento (Pozos o tiros)

Los principios utilizados en estas obras son básicamente los mismos que en la apertura de túneles, ya que sólo cuentan con una cara libre y es necesario provocar una segunda cara libre mediante una cuña al igual que en las voladuras de túneles; sin embargo, estas pueden modificarse por circunstancias especiales. Durante la apertura de tiros normalmente se trabaja con condiciones excesivas de humedad, por lo tanto comúnmente se abre una cuña que también puede servir como colector de agua o bien se lleva la explotación en dos fases, para permitir que el agua escurra hasta el colector desde donde pueda ser bombeada.

El patrón de perforación deberá diseñarse de tal forma que si un barreno falla en la secuencia del disparo para romper y establecer una cara libre, el barreno adyacente detonará ayudando a romper y a desplazar el material del barreno fallado de esta forma se minimizan los efectos. Si esto no se realiza, puede haber barrenos congelados que repercutirán en pérdida de tiempo.

En algunos pozos (tiros) se ha encontrado, cuando se está trabajando en una zona de estratos con muy pronunciada inclinación, que la roca de la voladura tiende a apilarse en la parte más baja de los estratos inclinados, pero con la introducción de un periodo de extra retardo en los barrenos de amortiguamiento o en el lado del pozo donde esto ocurre, es posible dirigir la roca quebrada hacia el centro del pozo.

6.2.4 Otras obras subterráneas

Existen obras subterráneas de gran dimensión que se utilizan como almacenamientos principalmente de petróleo o para algunas otras aplicaciones como son: cámaras frigoríficas, instalaciones militares, garajes o estacionamientos subterráneos, obras hidráulicas etc. Estas obras normalmente se proyectan en roca sana, para lo cual se deberán realizar estudios geológicos muy completos, que proporcionan las bases para determinar el emplazamiento y diseño de las cámaras subterráneas.

Con la participación de geólogos y técnicos en voladuras se pueden tomar las mejores decisiones sobre los métodos más adecuados y más seguros de las voladuras a utilizar.

En la excavación de las grandes cámaras subterráneas, normalmente se acostumbra a dividir la sección de roca en fases diversas de voladura, independientemente del empleo de métodos diferentes.

6.2.5 Tipos de cuña

La parte inicial y más crítica en la apertura de un túnel o un pozo es la cuña, la función esencial de este corte es proporcionar una cara libre adicional hacia donde la roca quebrada pueda desplazarse. Todas las cuñas caen dentro de dos clasificaciones: cuñas en ángulo o cuñas en paralelo.

6.2.5.1 Las cuñas en ángulo:

Las cuñas en ángulo se dividen en cuñas de V y de Pirámide:

Cuñas en V.- Consisten en pares de barrenos inclinados hasta casi juntarse en el centro, con dos líneas paralelas de barrenos, y además paralelas a los ejes del pozo. La cuña se coloca usualmente al centro de la excavación y es por lo general la más profunda que el resto de los barrenos, con el propósito de proporcionar un hueco para coleccionar el agua después del disparo, permitiendo la perforación y la carga del explosivo en el siguiente disparo. En pozos de gran dimensión, algunos ingenieros colocan la cuña fuera del centro de la excavación cerca de una de las paredes. Esta práctica facilita el despeje de la rezaga en el lado opuesto cuando se utilizan los tiempos adecuados de retardo.

Cuña de Pirámide.- En el diseño de una cuña de pirámide se emplean círculos concéntricos de barrenos inclinados, de tal forma que en el fondo queden cercanos uno a otros, la cuña normalmente consiste de cinco a ocho barrenos debidamente espaciados con un ángulo de aproximadamente 30° y por lo general más profundos que el resto de los barrenos, con el objetivo de proporcionar un colector de agua para el siguiente ciclo de minado (Figura 6.16). En algunas rocas masivas se agrega un par de barrenos guía al centro de la pirámide para ayudar a romper algunas rocas grandes producidas por los barrenos iniciales en la cuña.

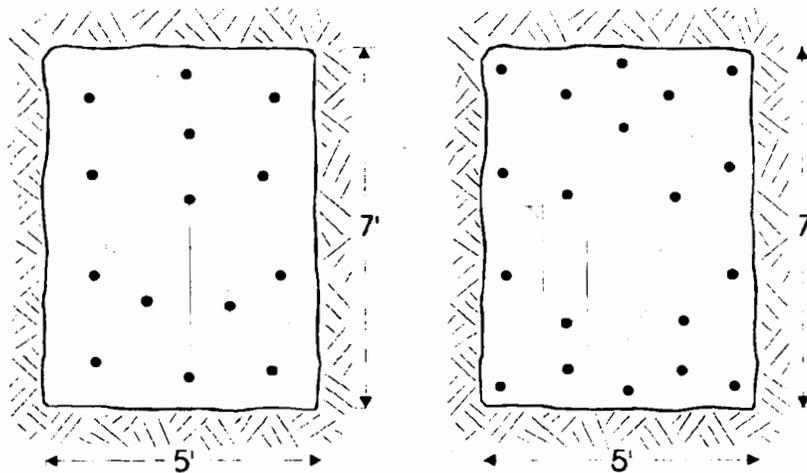


Figura 6.16 Cuñas piramidales

En estos tipos de cuñas, si los barrenos se llegan a cruzar, el avance que se obtiene es inferior al de diseño. Si los barrenos en el fondo están separados más de 30 cm, el avance será también inferior al de diseño.

El ángulo entre los barrenos de cuña deberá ser de 60° ó más, para minimizar el robo de barrenos. En algunas operaciones se provee a los perforistas de escantillones para asegurar la separación y ángulos entre los barrenos.

La selección de una cuña específica de ángulo está en función de la roca, el equipo de perforación utilizado, la filosofía de la Gerencia de la mina y de cada perforista.

Una conjunción entre la experiencia y una serie de operaciones prueba-error son normalmente comunes para determinar la mejor cuña de ángulo en determinada operación. En operaciones pequeñas con mucha frecuencia es imposible colocar los barrenos con el ángulo adecuado. En este caso se recomienda utilizar cuñas con barrenos paralelos.

6.2.5.2 Cuñas en barrenación paralela

Se utilizan principalmente en la apertura de túneles y pueden ser de diferentes tipos y tamaños, dependiendo del tipo de roca a romper. A este tipo de cuña se le puede denominar también cuña quemada y está formada por barrenos en paralelo de igual o diferente diámetro, con la salvedad de que algunos barrenos de la cuña no se cargan porque servirán de alivio a la roca fragmentada para empujarla de la voladura. Para el funcionamiento adecuado de estas cuñas, es necesario un alineamiento y espaciamiento adecuado entre los barrenos, con el fin de obtener el avance diseñado para la voladura.

Las cuñas paralelas normalmente requieren de mayor número de barrenos que las cuñas en ángulo, debido a que los barrenos rompen un volumen de roca muy pequeño, por lo tanto el espaciamiento deberá ser menor.

Sin embargo, este tipo de cuñas tienen la ventaja de que es muy fácil la perforación, ya que los barrenos son paralelos. Existen muchos tipos de cuñas quemadas con barrenación paralela que difieren principalmente por la localización, la cantidad y diámetro de los barrenos vacíos en una cuña. Generalmente el volumen de los espacios vacíos permite que con la profundidad del cuele pueda ser desplazado hacia afuera con éxito. Este avance está limitado a 91,44 cm por cada 2,54 cm de diámetro del barreno quemado.

Otro factor importante a considerar en la planeación de la distancia entre los barrenos vacíos y cargados, es el tipo de rompimiento y movimiento que puede ocurrir.

Pueden variar los resultados cuando un barreno cargado se coloca a una distancia de varias veces el diámetro de un barreno vacío. En general es mucho más difícil romper a plena profundidad una roca suave o porosa que una roca sana quebradiza. Para obtener resultados satisfactorios de voladuras, se deberán realizar voladuras que permitan un factor de abundamiento de por lo menos un 60%, preferiblemente 100%, tomando en consideración la distancia más grande que puede permitirse en los cálculos para cada barreno. Una secuencia adecuada de disparo para cada patrón de perforación en particular, tendrá que determinarse por el tipo de roca y la exactitud de la perforación que está siendo usada, la primera consideración es un buen diseño del patrón de retardos que puedan permitir suficiente tiempo y secuencia, sin el cual la roca pueda taponearse y congelarse en el lugar.

Para minimizar el congelamiento de las cuñas quemadas se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- Utilizar barrenos vacíos adicionales o de mayor diámetro, para proporcionar áreas de vacíos adicionales en factores de abundamiento mayores de la roca.
- Dejar un taco razonable para evitar que el rompimiento de un barreno anterior pueda dañar a otro o provocar una iniciación prematura.
- Seleccione un diámetro pequeño de explosivos para reducir la cantidad de explosivos por cada 30,48 cm.
- Cambie el espaciamiento de los barrenos quemados de la cuña.
- Cambie el patrón de retardos para permitir más tiempo entre los barrenos.

Las cuñas quemadas se clasifican en cuñas en línea y cuñas de caja, generalmente las cuñas en líneas se usan en frentes pequeños donde se utilizan máquinas de pierna y las cuñas de caja son más comunes en frentes de mayor dimensión donde se utilizan jumbos.

En ocasiones cuando una frente fue barrenada, cargada y retardada adecuadamente, pueden existir fallas debido a los cambios geológicos importantes del terreno. Cuando se utilizan algunos explosivos como las dinamitas, una onda de propagación puede ocurrir y detonar el explosivo del barreno adyacente, eliminando la secuencia de retardo y congelando la cuña, esto se puede minimizar con los siguientes pasos:

- Un cuidadoso alineamiento de los barrenos.
- Incrementar el espacio de vacío proporcionado por los barrenos quemados.
- Con un espaciamiento ligeramente más grande
- Cuando se usan hidrogeles el movimiento de la roca puede provocar que en algunos barrenos aun no detonados, el explosivo dentro de ellos pueda hacerse tan delgado llegando a su diámetro crítico y provocar que se haga insensible. También la onda de detonación de un barreno inicial puede producir un incremento en la densidad del explosivo y provocar la falla conocida como falla del producto por insensibilidad o falla por precompresión. Los barrenos guía son perforados más cerca del barreno quemado que de los barrenos en una cuña normal y estos son disparados instantáneamente.

En la tabla 6.1 se da un estimado de barrenos de 4,13 cm de diámetro, requerido con un correspondiente factor de potencia cuando se usan cartuchos de 3,17 cm de diámetro o anfo cargado neumáticamente para diferentes áreas en una frente, o cuando se utilizan las cuñas quemadas de caja en granito (un barreno de alivio de 7,62 cm).

Cuando se da una cuña quemada en línea con barrenos de diámetro pequeño, se requiere agregar de tres a cinco barrenos como los indicados en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Guía de perforación y carga para frentes de diferente superficie:

ÁREA DE LA FRENTE m ²	No. DE BARRENOS	FACTOR DE POTENCIA kg/m ³
2,78	23	4,33
4,64	27	3,98
5,57	30	3,80
6,50	33	3,56
7,43	35	3,38
8,36	37	3,15
9,29	40	2,97
18,58	57	1,78
27,86	66	1,37
37,16	73	1,19

6.2.6 Selección de explosivos

En las operaciones de túneles o pozos (tiros), se requieren tiempos de ciclo cortos con un máximo de avance por cada disparo, por lo que la selección de explosivos es un factor muy importante. Como complemento a esto, los explosivos deben tener alto contenido de energía y ser productos de fácil manejo para una iniciación rápida y segura. Además, algo de vital importancia es el usar explosivos clase I, es decir, con características para ser utilizados en operaciones subterráneas, ya que el usar productos con altos contenidos de gases tóxicos es muy peligroso, además de estar prohibido su uso. De cualquier forma, todo el personal deberá esperar, después de la voladura hasta que los frentes de disparo hayan sido ventilados adecuadamente y los gases tóxicos hayan sido removidos, para poder regresar a los frentes de trabajo.

Cálculo de cargas explosivas y patrones de perforación.

Cálculo de plantilla de barrenación de una frente con las siguientes características :

Datos :

Diámetro de perforación	=	4,76 cm
Sección de frente	=	4,0 X 4,0 m
Tipo de roca	=	Roca dura (granito)
Densidad de la roca	=	3,3 gr/cm ³
Profundidad de barreno	=	3,0 m
Taco (por antecedente)	=	0,50 m
Factor de carga	=	1,0 kg/ton
Carga de fondo	=	Emulsión 1" X 8" (0,120)
Carga de columna	=	Anfomex Subterráneo

1.- Selección de cuña

Conociendo las características de la roca se selecciona la cuña. En este sistema se consideró utilizar una cuña de cinco de oros con un barreno de alivio al centro de 7,62 cm de diámetro.

2.- Cálculo de la superficie de la frente

sección rectangular:

$$A = B \times H = 4,0 \times 2,0 = 8,0 \text{ m}^2$$

Sección circular :

$$A = r^2 = (2)^2 = 6,28 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie total} = 14,28 \text{ m}^2$$

3.- Cálculo del volumen y tonelaje de roca a tumbar con explosivo.

$$v = 14,28 \text{ m}^2 \times 3,00 \text{ m} = 42,84 \text{ m}^3$$

$$T = 42,84 \text{ m}^3 \times 3,3 \text{ ton/m}^3 = 141,37 \text{ tons}$$

4.- Cálculo de la carga total de explosivo por barreno considerando un taco de 0,50 m

Emulsión 1" x 8" (Densidad específica = 1,20 gr/cm³).

Se necesitan 2,148 kg de emulsión para llenar un metro de columna en un diámetro de 4,76 cm.

Por lo tanto:

$$2,149 \text{ kg} - 1,0 \text{ m}$$

$$0,120 \text{ kg} - x = 0,558 \text{ m}$$

Anfo subterráneo (Densidad = 0,85 gr/cm³) cargado neumáticamente.

Se necesitan 1,52 kg de Anfo confiando para llenar un metro de columna en un diámetro de 4,76 cm.

Por lo tanto:

$$1,52 \text{ kg} - 1,0 \text{ m}$$

$$x - 2,44 \text{ m} \quad x = 3,715 \text{ kg}$$

carga total / barreno = ANFO + EMULSIÓN

$$\text{Carga total / barreno} = 3,715 + 1120 = 3,835 \text{ kg}$$

5.- Cálculo de explosivo total utilizado en la frente considerada en este ejemplo :

kg de explosivo (Factor de carga) (Toneladas Tumbadas)

$$\text{kg de explosivo} = (1,0 \text{ kg/ton}) (141,37 \text{ ton})$$

$$\text{kg de explosivo} = 141,37 \text{ kg}$$

6.- Cálculo del número de barrenos necesarios en la frente :

$$\text{No. de barrenos} = \frac{\text{kg de explosivo / frente}}{\text{kg de explosivo / barreno}}$$

$$\text{No. de barrenos} = \frac{141,37 \text{ kg}}{3,835 \text{ kg}} = 36,86$$

$$\text{No. de barrenos cargados} = 37$$

7.- Se procede a ubicar proporcionalmente los 37 barrenos cargados. (incluyendo los de cuña en la frente mencionada)

- 1.- Ubicar barrenos de cuña y ayudantes de cuña.
- 2.- El resto de los barrenos se distribuyen en la superficie restante en forma proporcional.

6.2.8 Espaciamientos típicos para diferentes cuñas quemadas

DIÁMETRO DE BARRENO mm	DIÁMETRO Y NÚMERO DE BARRENO DE ALIVIO mm	ESPACIAMIENTO TÍPICO ENTRE CENTROS DE BARRENOS mm
38	76 (x1)	125
38	76 (x1)	150
45	76 (x1)	125
45	76 (x1)	150
45	76 (x1)	200
45	100 (x1)	150
45	100 (x1)	200
51	76 (x1)	210
51	100 (x1)	230
51	125 (x1)	190
51	125 (x1)	280

Todos los tipos de roca se expanden al quebrarse y el factor de expansión se incrementa de acuerdo al grado de fragmentación. En algunas rocas, el factor de abundamiento o expansión de la roca quebrada puede ser suficiente para congelar la cuña, causando una pérdida completa del disparo. Para minimizar el riesgo de congelamiento de la cuña se requiere:

- Proveer de uno o más barrenos vacíos para permitir la expansión de la roca, incrementando el porcentaje de área vacía del 15% ó 20%.
- Asegurar que la columna de explosivo en cada barreno de la cuña tenga un taco de por lo menos 10 veces el diámetro de la carga.
- Reducir la energía por metro de barreno en la cuña, esto se puede hacer usando cartuchos de explosivo de menor densidad.
- Alinear cuidadosamente los barrenos de cuña, asegurándose que estos sean paralelos.

- Hacer cambios apropiados en el patrón de perforación y en el espaciamiento de los barrenos de cuña, ajustando los cambios de acuerdo a las condiciones del terreno.
- Ajustar apropiadamente los tiempos al diseño de la cuña con la orientación de los estratos.
- No detonar los barrenos de cuña en forma simultánea; la eyección de la roca fragmentada en la cuña toma un cierto período de tiempo y es conveniente no detonar otro barreno durante este período de tiempo, se recomienda un período de tiempo mayor a 100 ms.

6.2.8.1 Secuencia y tiempo de disparo

En las cuñas quemadas, los primeros barrenos en detonar deberán estar por lo general muy cerca de los barrenos vacíos. La secuencia de detonación para el resto de los barrenos en la cuña deberá asegurar barrenos exitosos que tengan un mínimo de bordo y un amplio ángulo de rompimiento para desarrollar una cara libre. La roca fragmentada por los dos primeros barrenos en la cuña son empujados hacia los barrenos sin carga, antes de ser proyectado hacia fuera de la cara. En longitudes mayores de 3 m el tiempo tomado, para que la roca sea eyectada completamente fuera de la cuña, es mayor de 100 m. Por lo tanto los retardos entre detonaciones consecutivas deberán exceder los 100 m.

Normalmente se utilizan tiempos de retardo de período largo (LP), el mayor tiempo entre intervalos de retardo proporcionan el tiempo adecuado para que la roca sea eyectada del área de la cuña. Después los barrenos pueden ser iniciados en secuencia por tiempos consecutivos de retardo.

Donde las cargas son disparadas en números consecutivos de ms de retardo, no se lleva un progresivo alivio del bordo y hay un riesgo muy alto de congelamiento de la cuña. Donde se utilizan los retardos de ms en la cuña, se deberán disparar cargas consecutivas en cada cuarto o quinto número de retardo.

Cuando los retardos entre barrenos sucesivos se incrementan, se generan los siguientes beneficios:

- La cuña tiene una alta probabilidad de salir completa y el disparo tendrá también un avance completo.
- La rezaga tiene un alto y corto perfil.
- Los niveles de vibración son bajos, ya que los barrenos tienen una cara libre efectiva.

6.2.8.2 Barrenos de producción

El bordo de los barrenos deberá permitir romper y empujar, no es posible compensar en barrenos con excesivo bordo con cargas adicionales de explosivos.

El espaciamiento de los barrenos de producción fuera del área de la cuña dependen de muchos factores, se incluyen :

- El tipo de roca.
- Diámetro del barreno.
- La sección de la frente.
- Fragmentación requerida por el equipo de rezagado.

En todas las frentes el patrón de perforación está completamente afectado por el diámetro de perforación y el tipo de roca. Se deberá desarrollar y seguir un patrón sistemático de perforación. En el cuele de túneles no es muy común que se utilicen barrenos mayores a 45 mm (1 ¾ pulg.); el diseño de bordos y espaciamientos aproximados son distintos para diferentes diámetros de perforación, en una roca de dureza media. Rocas más suaves o más duras requerirán menores o mayores bordos, respectivamente.

Cuando la longitud del cuele por disparo es muy grande, se deberá reducir el bordo para disminuir el volumen de roca que debe eyectarse por cada barreno disparado.

6.2.8.3 Bordo y espaciamientos típicos

DIÁMETRO DE PERFORACIÓN (mm)	BORDO MÁXIMO (B) (m)	ESPACIAMIENTO MÁXIMO (S) (m)
32	0.60	0.75
38	0.75	0.80
45	0.90	1.00
51	1.00	1.10
57	1.00	1.20
64	1.20	1.30

Secuencia de iniciación

Diseño de patrones de retardo

Con el sistema típico de encendido para frentes, cruceros y contrapozos se puede obtener el máximo avance, eliminando el riesgo de robo de barrenos.

Control de sobre rompimiento

En rocas competentes pudiera no ser necesario el uso de técnicas especiales para obtener paredes y perfiles satisfactorios. Sin embargo, el espaciamiento entre barrenos perimetrales y de alivio deberá ser reducido.

Donde el terreno no es muy consistente, o el riesgo de caída de roca puede ser importante, es esencial usar métodos de voladura perimetral. El éxito de cada técnica es muy independiente de la exactitud de perforación, el tipo de roca y el explosivo utilizado.

Las voladuras perimetrales tienen importantes ventajas para proporcionar paredes y perfiles que son firmes y bien cortados. Sobre todo cuando se utiliza un diseño adecuado de voladura para este fin.

Voladuras perimetrales

En estas voladuras, el sobrerompimiento o afectación de la roca son minimizadas por :

- Reducción de la energía del explosivo por metro en los barrenos perimetrales.
- Reducción del espaciamiento entre barrenos perimetrales, usualmente $\frac{1}{4}$ del espaciamiento normal.
- Asegurar que el desplazamiento de los barrenos de perímetro sea de 0,6 a 0,75 veces el bordo.
- Disparar los barrenos perimetrales en el último retardo, una vez que el resto de los barrenos hayan creado una cara libre efectiva.
- Cargar los barrenos de pared con cargas desacopladas o con productos de menor energía.

Voladuras de precorte

En precortes, los barrenos perimetrales son disparados en forma simultánea, antes que el resto de los barrenos de la voladura, debido a que los barrenos de producción deben estar muy cerca de la línea de precorte (de 0,25 a 0,50), la detonación de las cargas de precorte pueden dislocar las cargas explosivas adyacentes. Esto incrementa la posibilidad de encontrar cargas no detonadas en la rezaga. Por tal razón el precorte de perímetros, con frecuencia necesita ser llevado como una operación por separado, si lo comparamos con las voladuras perimetrales, las voladuras de precorte tienen las siguientes desventajas:

- El máximo y práctico espaciamiento para las voladuras de precorte es menor que para las voladuras perimetrales.
- Las cargas de precorte crean una fractura entre barrenos, pero no contribuyen significativamente al rompimiento de la roca, sin el diseño del perímetro.
- Para un peso de carga dado, por número de retardo, las voladuras de precorte producen altos niveles de vibración.
- El precorte es efectivo solamente en rocas muy competentes.

Por esta razón, las voladuras perimetrales son por lo general preferidas a las de precorte; sin embargo, el precorte se utiliza ocasionalmente para crear perfiles lisos para los portales de los túneles y en las paredes de grandes cámaras subterráneas.

Exactitud de la perforación

La exactitud de la perforación es crucial para un efectivo control del perímetro. Una perforación inexacta puede causar sobrerompimiento por:

- Barrenos perimetrales yendo más allá del perfil del túnel.
- Resultan irregularidades en la frente de las voladuras previas.
- La desviación de la perforación como resultado de error en la colocación del ángulo de la perforadora o error como resultado de la inclinación de los estratos. Técnicas de perforación o una excesiva longitud de los barrenos.

Explosivos

Para llevar a cabo los efectos requeridos, es usualmente necesario cargar los barrenos perimetrales a lo largo de las paredes con un explosivo de relativa baja energía por metro.

En la tabla 6.2 se pueden ver las cargas de explosivo recomendadas, para diferentes diámetros de perforación así como los bordos y espaciamentos recomendados para los diferentes sistemas de control de sobre rompimiento.

Taco

Usualmente es necesario el taqueo de los barrenos perimetrales con material inerte. Esto mejora la eficiencia y distribuye mejor la energía dentro del barreno. Si no se coloca taco, las cargas pueden ser expulsadas del barreno. Cuando se usan cargas desacopladas y estas están muy cerca de la boca del barreno, el rompimiento de la misma puede afectar parte de la carga de otro barreno o iniciarla antes de tiempo.

Iniciación

Es usual utilizar un primer en el fondo de los barrenos de perímetro para permitir el rompimiento adecuado. Los barrenos perimetrales deben ser disparados en el mismo tiempo de retardo para obtener resultados óptimos.

6.3 Voladuras subacuáticas

Las voladuras subacuáticas se aplican en diversos tipos de obras tales como: profundización y construcción de puertos y canales, excavación de trincheras para la instalación de oleoductos, gasoductos y cables de comunicación, excavación para cimentaciones de obras civiles, explotación de yacimientos consolidados, etc.

Las operaciones de voladuras subacuáticas requieren de mayor cuidado y experiencia que operaciones similares en la superficie, debido a la capa de agua que cubre la roca. La barrenación y el cargado de explosivos suelen ser más complicados en este tipo de voladuras, por lo cual se deben de considerar los siguientes factores para tener éxito en este tipo de voladuras:

- Métodos de operación y equipos de barrenación especiales
- Diversos sistemas de cargado
- Factores de carga adecuados para desplazar a la roca y el agua
- Selección de explosivos con excelente resistencia al agua y desempeño bajo presión hidrostática
- Uso de un sistema de iniciación seguro y confiable
- Control de vibraciones utilizando los productos adecuados y patrones de retardo para reducir los riesgos de propagación

Métodos de barrenación y voladura

Los métodos mas comunes para realizar voladuras subacuáticas son los siguientes :

1. Barrenación y voladura sobre roca
2. Barrenación y voladura sobre plataforma
3. Barrenación y voladura con buzos
4. Voladuras con concussion charges

1.- Barrenación y voladura sobre roca:

En este caso el agua se encuentra a nivel o a escasa distancia de la parte superior del banco a volar, de tal forma que se pueden realizar sobre superficie o roca las actividades de barrenación y carga de explosivos (Figura 6.17).

2. Barrenación y voladura sobre plataforma:

Este método contempla barrenar y cargar desde una plataforma flotante, debido a que el banco de roca se encuentra a varios metros por debajo del agua figura 6.18.

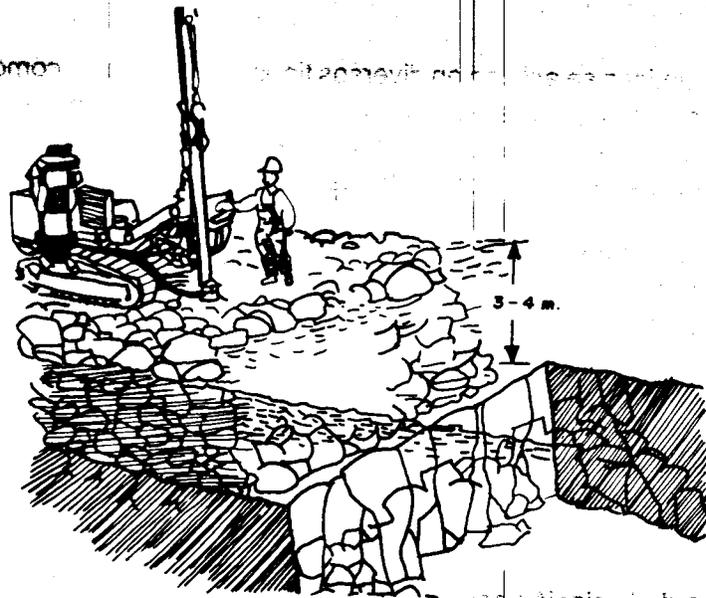


Figura 6.17 Barrenación en roca

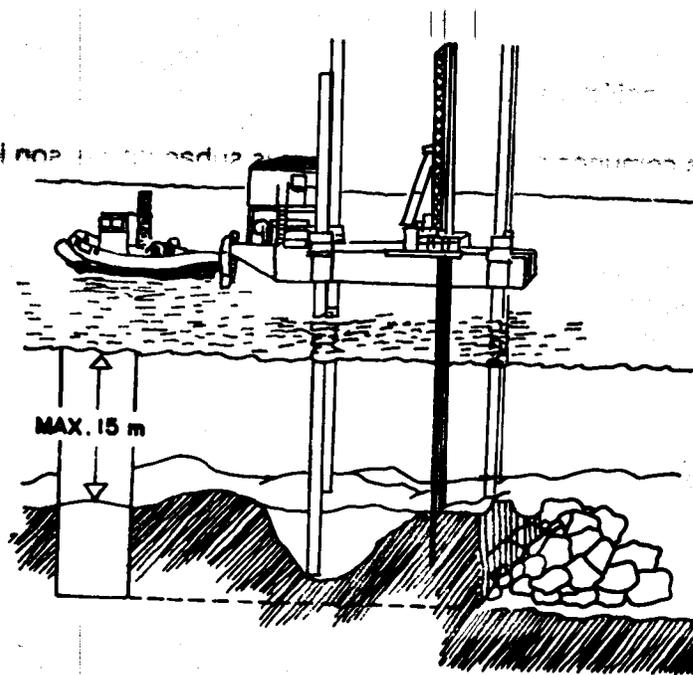


Figura 6.18 Método de barrenación en plataforma

Para los dos casos anteriores se describen las formas de barrenación y cargado de explosivos:

Barrenación

Existen 2 alternativas para efectuar la barrenación. La primera es con un equipo tradicional de barrenación, con el cual una vez terminado el barreno se retira la broca y tubería, y se procede a cargar el explosivo; este sistema tiene el inconveniente de que el barreno se quiebre o se cierre con desprendimiento de roca de las paredes del mismo, dada la alteración del terreno debido a la saturación del agua. La segunda alternativa es usar un equipo provisto con Kelly bar, el cual consiste en un tubo ligeramente más grande que la broca. A medida que se realiza la barrenación el tubo avanza excavando la roca.

Una vez terminado el barreno se retira la broca, se queda la tubería la cual sirve como ademe, posteriormente se coloca un tubo de PVC o de cartón encerado, para evitar que el barreno se cierre u obstruya; finalmente se retira la tubería y se procede a cargar los explosivos.

Cargado de explosivos

El método de cargado de explosivos puede ser de 2 maneras; en cartuchos cebados con cordón detonante en especie de rosario o con indicadores no eléctricos de retardo. A granel, bombeándolos al interior del barreno usando un camión especial. Este producto tiene la ventaja de que se puede llenar por completo el área del barreno, se obtiene mayor presión de detonación, más energía y por consiguiente mejores resultados; la iniciación del explosivo a granel es mediante HDP'S de 1 y 3 libras colocados en el fondo y a lo largo del barreno.

3. Barrenación y voladura con buzos

Las voladuras subacuáticas con la asistencia de buzos son ocasionales y son usadas para operaciones especiales. Dada la escasa visibilidad que existe abajo del agua, se deben tomar medidas especiales para orientar al buzo en la realización de las actividades (Figura 6.19).

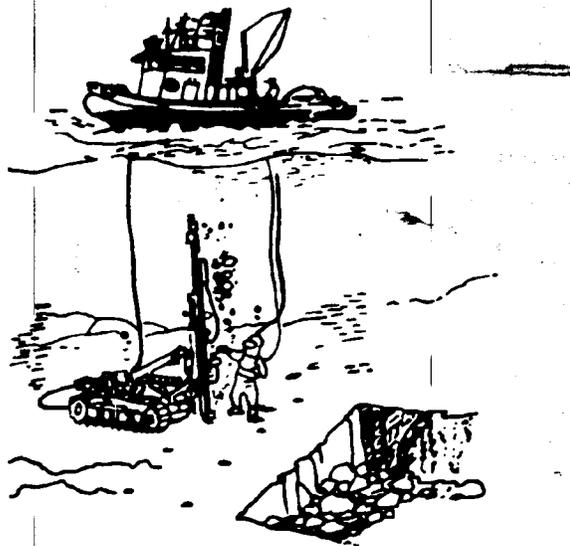


Figura 6.19 Método de barrenación y voladura con buzos

4.- Voladuras con concussion charges (shaped charges)

Este sistema ha sido desarrollado para romper roca sin usar barrenación. El efecto de las Shape Charges es obtenido por la concentración y dirección del explosivo y se consigue cuando la carga tiene la forma de cono con un cierto ángulo en la parte superior. El cono se cubre internamente con un metal, el cual se comprime durante la detonación creando un proyectil de metal fundido (Jet) con una alta habilidad de penetración. Para darle tiempo a que el proyectil forme la carga de explosivo, tiene que ser colocada a cierta distancia de la superficie (Stand Off). Las Shaped Charges se utilizan en bancos de 1 a 2 m de altura con patrones de cargado que varían desde 1X1 hasta 2,5 X 2,5 m, dependiendo el tipo de roca.

Se deberá tener especial cuidado con las áreas habitadas debido a las ondas de choque generadas, que producen una intensidad de 10 veces mayor a las producidas por cargas confinadas dentro del agua. También se deberán extremar precauciones con el lanzamiento de proyectiles cuando la altura del agua sea menor a 2 m (Figura 6.20).

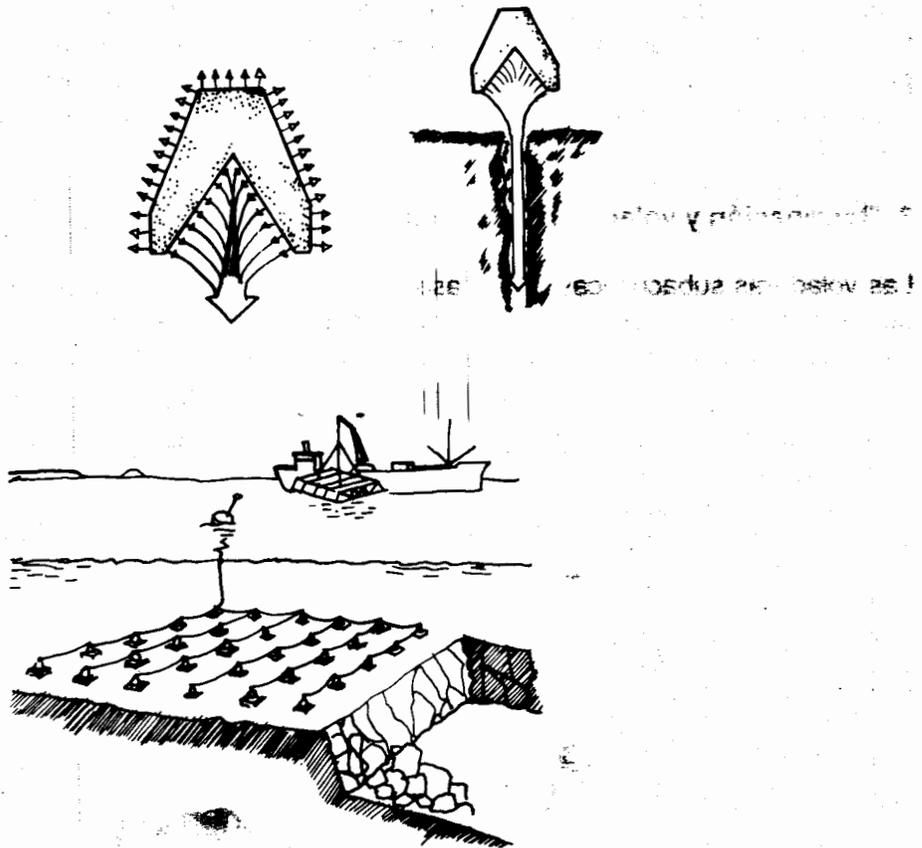


Figura 6.20 Características de la voladura con Concussion Charges

Explosivos

Los requisitos que deben reunir los explosivos usados en voladuras subacuáticas son principalmente: alta energía, excelente resistencia al agua, y adecuada sensibilidad y sensibilidad cuando se trabajan bajo presión hidrostática.

En el agua la energía del explosivo se trasmite con gran eficiencia por su baja compresibilidad, por lo cual la onda de choque tiene un alto poder destructivo, alcanzando presiones máximas de 10 Kpa.

La importancia de la onda de choque respecto a los explosivos consiste en la rapidez con la que se trasmite, esto quiere decir, que un explosivo puede sufrir una compresión previa a la activación por parte del iniciador nonel o cordón detonante y desensibilizarse por completo originando que el explosivo no detone. Este fenómeno ocurre más frecuentemente con aquellos explosivos que usan como agente sensibilizador microesferas de vidrio de baja resistencia a la precompresión.

Sistemas de iniciación

Los sistemas de iniciación utilizados en voladuras subacuáticas son; el cordón detonante de 50 gr/ft el cual se usa a todo lo largo del barreno con cargas de explosivo conectadas en rosario. También se usa el sistema nonel con HDP'S, recomendándose usar varios cebos a lo largo del barreno para asegurar la continuidad de la detonación.

Vibraciones y ondas de choque en el agua

En las voladuras subacuáticas las vibraciones del terreno son más impredecibles que en las voladuras ordinarias, debido al riesgo de propagación entre barrenos cuando se usa explosivo muy sensitivo. Por otra parte, las ondas de choque de las voladuras subacuáticas pueden causar problemas a construcciones cercanas, embarcaciones y personas dentro del agua. Las medidas para reducir la alta presión de las ondas de choque son; detonar menores cantidades de explosivos, usar cargas confinadas y usar cortinas de burbujas de aire.

6.4 Diseño de voladuras con sistema a granel

El diseño de la voladura a granel es el mismo que para las voladuras a cielo abierto; su aplicación se generaliza en grandes operaciones, extendiéndose cada vez más su uso por el significado ahorro que se tiene al substituirlo por el cartucho.

Para lograr este objetivo describiremos el equipo e instalaciones necesarias para su implementación con éxito; posteriormente, se enfocará a los ahorros que implica el sistema con un cálculo simple.

En la actualidad el sistema de carga a granel mezclado en el sitio es el más nuevo y moderno, con el se pueden cargar infinidad de barrenos rápidamente, ya que su cargado varía de 150 a 700 kg/min, dependiendo de la relación que se suministre a los barrenos y del equipo que lo efectúe, pero siempre implicando un ahorro significativo en costos y tiempo.

Sus principales características son: que se mezcla es en sitio, no es sensitiva hasta que se deposita dentro del barreno, se acopla completamente a la pared del barreno ocupando la totalidad de su diámetro, por lo que la acción del explosivo es más eficiente sobre el material, ya que su composición es uniforme en toda la columna explosiva y permite una mejor distribución de la energía. El producto tiene óptima resistencia al agua (45 días), y no existen sobrantes de mezclas, ya que son elaboradas como se necesitan en el mismo lugar, controlando con precisión la carga de fondo adecuada a la iniciación de la columna y su taco, para obtener óptimos resultados.

Otras características de este tipo de explosivo es de poseer una consistencia apropiada para su bombeo y de ser resistente al agua, lo que nos permitirá cargar el barreno rápidamente, ya sea seco o con agua, el cargado a granel se divide en dos: por bombeo y gravedad, en las dosificaciones se anota primero la proporción de la emulsión y enseguida la proporción del anfo.

Sistema a granel por bombeo. Se utiliza este sistema cuando los barrenos por cargarse contienen agua, y se usan mezclas de 70/30 hasta 50/50, en las que el mayor porcentaje es de emulsión y el menor de anfo; independientemente de cual se trate, se entrega en el fondo del barreno por medio de una manguera que se va retractando conforme va subiendo la emulsión a granel, desplazando por completo al agua, permitiendo con ello un buen confinamiento del explosivo.

Sistema a granel por gravedad. Este sistema se usa cuando los barrenos de la plantilla a cargar están secos y la mezcla a utilizarse lleva mayor proporción de anfo, o sea de 10/90 a 30/70, y el cargado de los barrenos se hace desde superficie o boca del barreno, por medio del gusano equipado al camión.

Características de las mezclas

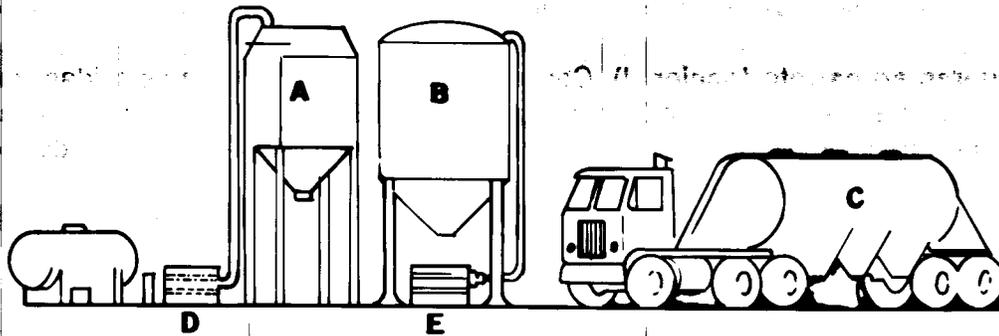
Mezcla 70/30	Densidad	1,26 gr/cm ³
	Vel de detonación	460 m/s
	energía	725 cal/gr
	presión de detonación	66 Kbars
Mezcla 20/80	Densidad	1,10 gr/cm ³
	Vel de detonación	4100 m/s
	Energía	800 cal/gr
	Presión de detonación	44 Kbar.
Mezcla 30/70	Densidad	1,17 gr/cm ³
	Vel de detonación	4100 m/s
	Energía	800 cal/gr
	Presión de denotación	49 Kbars

Equipo utilizado en sistema emulsión a granel ASA-G

- Silos elevados de nitrato de amonio prilado, descargan por gravedad del camión de mezcla en sitio, y su capacidad dependerá de los requerimientos del lugar (Figura 6.21).
- Silos elevados de emulsión a Granel ASA-G, también descargan por gravedad a la unidad de mezcla en sitio.
- Equipo de transporte a granel, ya sea para ASA-G o nitrato de amonio a granel.
- Sistema neumático para la carga de los silos de nitrato de amonio granulado (compresor)
- Bomba hidráulica para la descarga de pipa y carga de silo.
- Depósito para el aceite combustible (diesel)

Camioneta de 3 ton con bomba para desaguar los barrenos.

Camión mezclador sistema a granel.



A
SILOS ELEVADOS DE NITRATO DE AMONIO PRILADO DESCARGAN POR GRAVEDAD A LA UNIDAD DE MEZCLA EN SITIO (CAPACIDAD SEGUN REQUERIMIENTO.

B
SILOS ELEVADOS DE ASA-G (EMULSION A GRANEL) DESCARGAN POR GRAVEDAD.

C
EQUIPO DE TRANSPORTE A GRANEL YA SEA PARA ASA-G O NITRATO DE AMONIO PRILADO.

D
SISTEMA NEUMATICO PARA LA CARGA DE SILOS DE NITRATO DE AMONIO GRANULADO.

E
BOMBA HIDRAULICA PARA LA DESCARGA DE PIPA Y CARGA DE SILO.

Figura 6.21 Equipo utilizado para el sistema a granel

Características del camión mezclador sistema a granel (Figura 6.22)

Panel de control. Puede hacer una selección rápida de tres formulaciones, la combinación de las cargas cambia automáticamente de una mezcla a otra mientras llena cada barreno y se detiene también automáticamente en las cantidades preestablecidas; el contador tabula el total diario.

Transportador de gusano. Está fabricado en acero inoxidable y se localiza a un lado del camión, carga anfo o mezclas de ASA-G con anfo, dentro del barreno, en cantidades por encima de los 700 kg/min, ya que posicionado el gusano encima del barreno y con el panel en la cabina, el cargado lo efectúa una sola persona. Se selecciona instantáneamente anfo o emulsión, para cargas individuales o combinadas, un control automático permite una carga combinada ininterrumpida.

Tolvas de almacenamiento (resistentes a la corrosión). Tienen capacidad de acuerdo a las necesidades del trabajo, son resistentes porque están en contacto con ingredientes corrosivos, por lo tanto, están construidas de acero inoxidable.

Bomba de Slurry (opcional). Bomba tipo cavidad progresiva operada hidráulicamente, entrega mezclas de emulsión y nitrato para ser bombeados dentro del barreno.

Mangueras en carrete (opcional). Contienen acción hidráulica de velocidad variable y controles reversibles, de 33 m de longitud y 5,08 cm de diámetro; junto a la bomba que también es opcional, se puede colocar una columna continua de explosivo resistente al agua dentro de los barrenos desplazándola.

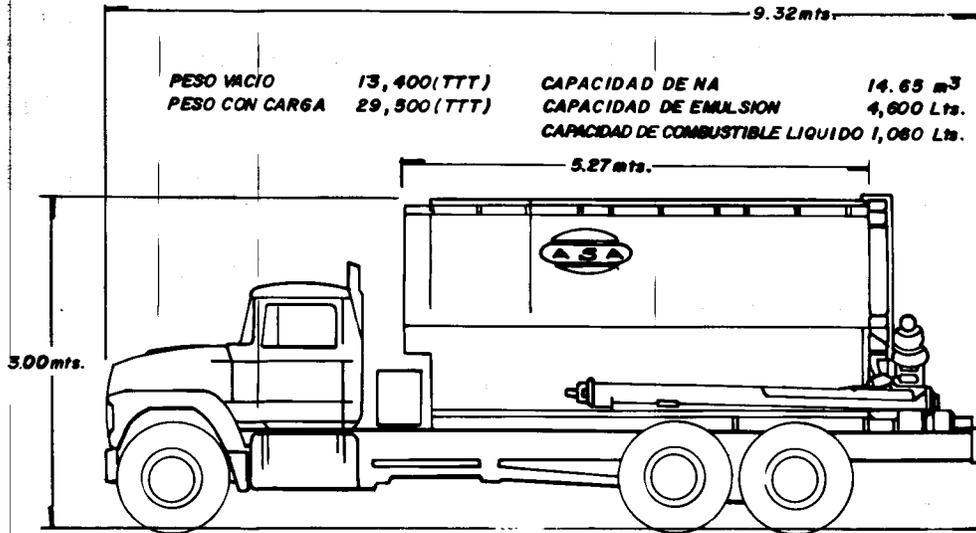


Figura 6.22 Camión de mezcla ASA-G con anfo y/o nitratos

7. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE MONITOREO SÍSMICO REALIZADO EN EL PROYECTO " MARIQUITA ", SON. Y SUS IMPLICACIONES EN EL GASODUCTO NACO - CANANEA - HERMOSILLO

7.1 Resumen

Se realizó la inspección del sitio y sus alrededores en el área del proyecto de mina a cielo abierto denominado " Mariquita ", ubicado en el estado de Sonora; en este proyecto se realizaron 8 voladuras de prueba: 4 para determinar la propagación de las ondas sísmicas hacia el Observatorio "Guillermo Haro", localizado a unos 4 km E del Proyecto de Tajo, y 4 para analizar el mismo fenómeno, pero en dirección hacia el gasoducto de PEMEX, Naco-Cananea-Hermosillo, cuyo tramo más cercano se localiza aproximadamente a 1 Km al S de la zona del proyecto, por lo que se encuentran en sentido casi perpendicular al de los anteriores.

Las voladuras consistieron en la detonación, en forma independiente, de ocho barrenos de 7,62 cm de diámetro, con profundidades promedio de 20 m. En cada voladura se colocó un sismógrafo con el fin de registrar los niveles de vibración propios de cada sitio, y de la zona en general. A partir del análisis de los resultados fue posible determinar las curvas de atenuación que caracterizan la propagación de las ondas sísmicas en la zona y mediante un escalamiento de las curvas de atenuación se determinaron los niveles de vibración máximos, que se obtendrían en la zona del gasoducto, al considerar las cargas reales que se proyecta detonar, con período de retardo, en las voladuras que realicen durante la producción de la mina.

Los niveles de vibración determinados para esas voladuras de máxima carga, demuestran que los métodos propuestos hasta ahora en forma teórica se apegan muy bien con los valores registrados en el campo, por lo que se garantiza que las voladuras que se pretenden realizar durante la explotación del Tajo, no afectarán en lo mínimo al macizo rocoso y mucho menos a la tubería del gasoducto Naco - Cananea - Hermosillo, distante aproximadamente 1,050 m de la zona del proyecto en su tramo más cercano.

7.2 Introducción

El uso de explosivos en las cercanías de zonas urbanas u obras de infraestructura crea molestia a la población por el ruido de las detonaciones, el polvo que desprenden y las vibraciones del suelo principalmente. Este malestar puede llegar a manifestarse con demandas contra los usuarios de los explosivos, si estos no realizan un diseño cuidadoso de sus voladuras, que permita mantener el confort de los vecinos y la seguridad de sus instalaciones e inmuebles.

Para garantizar estos satisfactores, el Departamento de Minas de los Estados Unidos del Norteamérica (USBM), así como las oficinas de investigación de países vanguardistas, sobre todo europeos, han emitido diferentes normas de seguridad que especifican los valores máximos permisibles, tanto de los niveles de vibración como en la sobrepresión de la onda de aire. Dichas normas se elaboraron a partir de un gran número de mediciones

sísmicas y de la sobrepresión de la onda de aire de las voladuras realizadas en distintos tipos de roca y suelo, usándose también diferentes explosivos.

Las miles de voladuras instrumentadas y la recopilación del comportamiento de otras realizadas en diferentes partes del Mundo, hacen que estos criterios se apliquen con éxito en otros países, como en el caso de México, donde la norma USBM-RI8507 se adecuó muy bien durante la demolición de los edificios con explosivos en los años de 1985 y 1986, realizadas en la Ciudad de México. Por tal motivo, este mismo criterio es un buen punto de partida para determinar si las voladuras que se realizan en la explotación del Proyecto de Tajo " Mariquita ", Son. por **Servicios Corporativos Frisco, SA de CV** pudieran ocasionar afectaciones al gasoducto de Petróleos Mexicanos localizado al pie del cerro " Mariquita", aproximadamente a 1,050 m al sur de la futura zona de voladuras, como se indica en la figura 7.1.

En el presente estudio se muestran los niveles de vibración determinados en el sitio con el monitoreo sísmico de 4 de las 8 voladuras de prueba realizadas y sus implicaciones para la zona donde se localiza el gasoducto; una vez realizados los escalamientos, se establecieron los parámetros de juicio que permitieron determinar los niveles de vibración, esfuerzos y deformaciones que se obtendrían en el punto más cercano del gasoducto, al emplear los patrones de voladura diseñados por personal técnico de **Dupont, SA de CV** para iniciar la explotación de la mina a cielo abierto en un futuro próximo.

7.3 Criterios de seguridad

En la bibliografía existen diversos criterios de seguridad para salvaguardar la integridad de inmuebles, obras de infraestructura, monumentos antiguos, equipo delicado de precisión, etc. Para el caso del tramo del gasoducto de PEMEX localizado al pie del cerro " Mariquita", los criterios de seguridad vigentes tanto en los Estados Unidos de Norteamérica como en países vanguardistas del Mundo, consideran a este tipo de instalaciones como edificios sumamente frágiles, denominados de tipo III, representados por construcciones delicadas por su antigüedad, su valor histórico, la calidad del equipo instalado o la alta repercusión social y económica que ocasionaría su falla.

Los criterios de seguridad más estrictos para garantizar la integridad de este tipo de edificaciones, vigentes actualmente tanto en sus países de origen como en otras localidades del Mundo, son:

- a) El emitido por el Departamento de Minas de la Unión Americana (USBM), en 1980, de acuerdo con el Reporte de Investigación RI-8507.
- b) El emitido, en 1983, en Alemania Occidental por el departamento de Exploración Geológica, conocido como DIN 4150.
- c) La norma de Estandarización Europea para salvaguardar la integridad de monumentos antiguos o históricos propuesta por Konon y Schuring en 1985.

Estos criterios de seguridad son los que se aplican con mayor confiabilidad en países que no cuentan aun con los propios para garantizar la integridad de sus obras de infraestructura y la seguridad de sus ocupantes, por lo tanto se considera que deberán aplicarse a las voladuras realizadas en un futuro en la zona del Tajo "Mariquita", para garantizar que no ocasionarán niveles de vibración, que pudieran potencialmente deteriorar y menos dañar al gasoducto o a las estructuras rocosas que lo alojan.

Las figuras 7.2, 7.3 y 7.4 muestran gráficamente los límites establecidos por estas normas y como se puede apreciar, un parámetro importantísimo para la determinación de los valores de velocidad de partícula máximos permisibles, es la frecuencia de vibración del terreno sobre el cual está alojada la estructura o edificación.

Para el sitio donde se localiza el gasoducto y alrededores, teóricamente se estimaba que la frecuencia de los pulsos dominantes más críticos serían de aproximadamente 15 Hz, porque a la distancia en la cual se realizarán las voladuras es considerable (aproximadamente 1 km), además la calidad del macizo rocoso se consideraba muy buena, con peso específico promedio de $2,2 \text{ Ton/m}^3$ y velocidades de propagación de onda longitudinal variables entre 2 119 a 4 343 m/s.

La información recolectada en los trabajos de campo indica que las frecuencias de los pulsos dominantes varían de 17 a 47 Hz, por lo que su filtración hacia la zona del gasoducto bien pudiera corresponder a los 15 Hz estimados teóricamente.

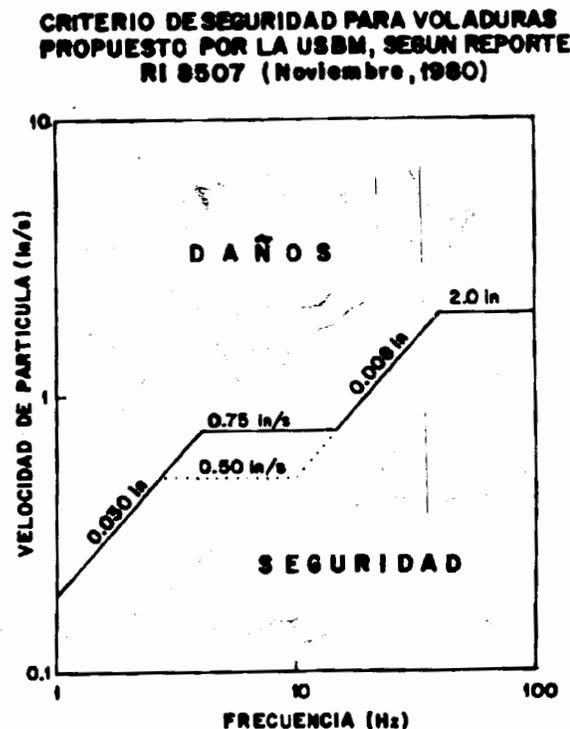


Figura 7.2 Criterios de seguridad para voladuras propuesto por la USBM, según reporte RI 8507 (noviembre, 1980)

**NORMA DIN 4150
1983**

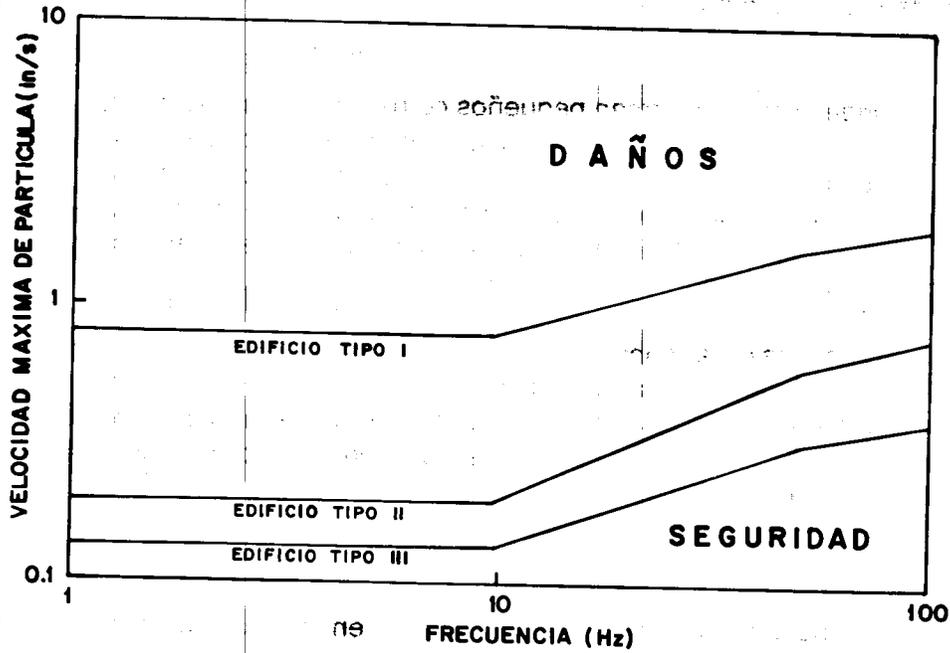


Figura 7.3 Norma DIN 4150, 1983

**KONON Y SCHURING (1985)
EDIFICIOS ANTIGUOS E HISTORICOS**

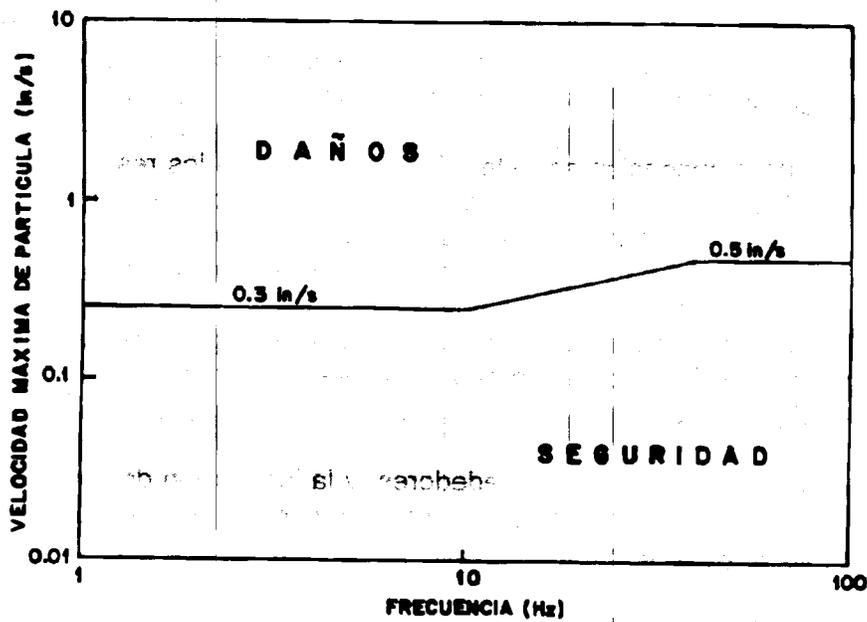


Figura 7.4 Edificios antiguos e históricos; Konon y Schuring (1985)

7.4 Marco geológico

081+ 4M

Los tipos de roca que predominan en la zona son: pórfido andesítico, granitos y brechas volcánicas.

Los pórfidos andesíticos conforman pequeños cerros, con diferente coloración producto de su mineralización, predomina el tono rojizo. Su afloramiento tipo se encuentra en el cerro « Mariquita », es la roca donde se llevarán a cabo todas las voladuras de producción. Son rocas más o menos blandas, con alto grado de fracturamiento, peso volumétrico promedio de 2,2 Ton/m³, velocidades longitudinales comprendidas en el intervalo de 2 119 a 4 343 m/s y transversales entre 1 238 y 2 793 m/s.

Los granitos son la roca basal, sobre ellos se encuentra desplantado el Observatorio «Guillermo Haro». Afloran en coloraciones blancas principalmente, conformando los cerros de mayor altura que se encuentran en el sitio. Son de calidad de roca muy buena y con poco fracturamiento en estado intacto; sin embargo, por lo general se encuentran cubiertos por una capa de roca intemperizada de mala calidad, con espesor máximo de 10 m. De acuerdo con las mediciones de campo presenta un peso volumétrico promedio de 2,7 Ton/m³, velocidades longitudinales de 5 700 m/s y transversales de 3 081 m/s, confirmando su excelente calidad.

Los granitos se encuentran ampliamente esparcidos en la zonas con espesores importante de roca alterada o descomprimida. No se observa su contacto con el pórfido andesítico debido a que se encuentra cubierto por un potente paquete formado por brechas volcánicas, con colores de tonalidad amarillenta fundamentalmente, que rellenan las partes bajas de la zona de estudio.

Las brechas volcánicas, al igual que los granitos, afloran ampliamente y no presentan fracturamiento. Son rocas compactas, con peso volumétrico promedio de 2,2 Ton/m³, velocidades longitudinales de 4 386 m/s y transversales de 2 429 m/s.

Las velocidades de propagación se determinaron a partir de los resultados de refracción sísmica de esta etapa de pruebas, realizados conjuntamente con el monitoreo de velocidad de partícula, con el fin de obtener secciones representativas del subsuelo. En la figura 7.5 se consigna una de las secciones geosísmicas obtenidas en esta campaña de exploración y como se puede observar existen materiales de cobertura en estado suelto, en espesores considerables, desempeñado un papel importante en la propagación de las ondas sísmicas, debido a que absorben cantidades grandes de energía, situación independientemente favorable para el proyecto.

Con el reconocimiento de la zona y alrededores, y la inspección del Gasoducto, se pudo constatar que éste se encuentra casi en su totalidad cubierto, salvo el pequeño tramo que se encuentra colgando en la zona del cruce con la carretera. Donde se observa que no presenta rasgos de deterioro característico por el medio ambiente, ni se evidencia la presencia de taludes inestables de riesgo potencial ante posibles deslizamientos del suelo, que le pudiera ocasionar fracturamiento o ruptura.

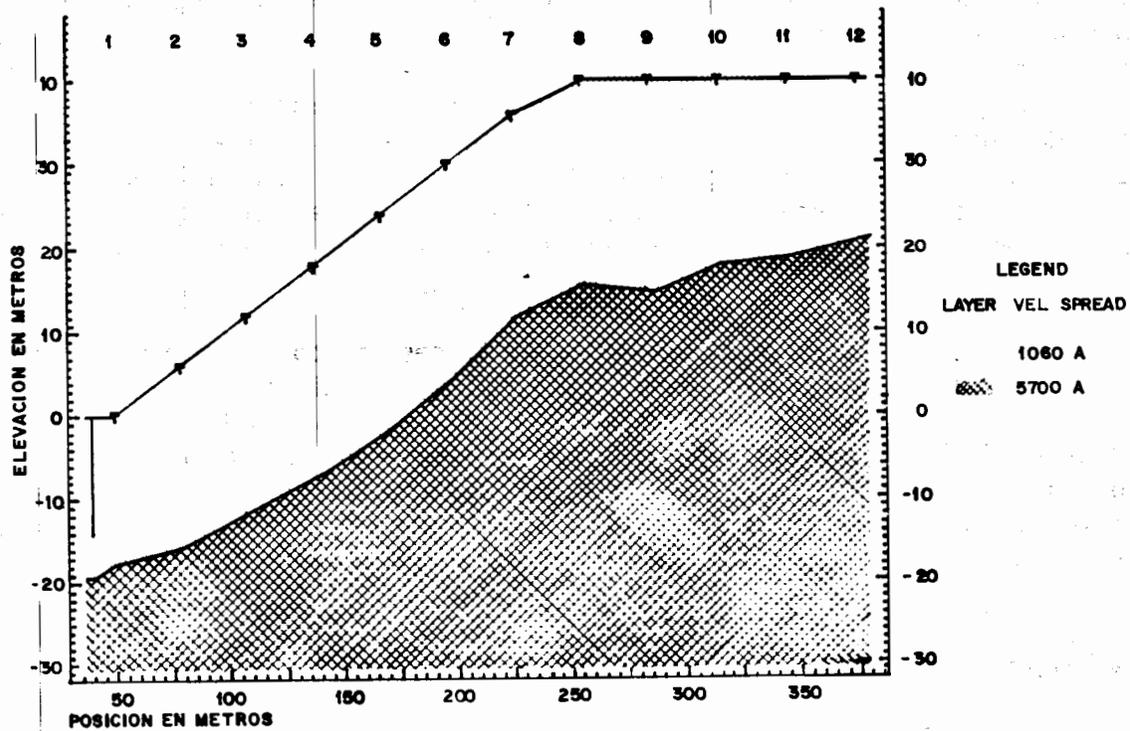


Figura 7.5 Sección geosísmica del proyecto Mariquita, Son.

7.5 Cargas de prueba utilizadas

En la figura 7.1 se muestra la ubicación de los barrenos utilizados para realizar las voladuras de prueba, los denominados Tiro 1 y 2 se encuentran situados en granitos, los Tiro 3 y 4 se encuentran alojados en brechas volcánicas y los restantes (Tiro 5 al 8) en pórfidos andesíticos. La tabla 7.1 proporciona información más detallada de los tiros de prueba efectuados.

Tabla 7.1 Información de los tiros de prueba efectuados en el Proyecto de tajo « Mariquita », Son.

TIRO	FECHA	PROF. (m)	AGUA (m)	EXPLOSIVOS (Kg)		TACO (m)	HORA DE DISPARO
				ALTO	ANFO		
1	07/11/95	20,0	16,5	4,5	5,0	16,0	13:32
4	07/11/95	21,0	3,5	4,2	21,0	14,0	21:21
2	08/11/95	22,0	3,0	6,0	20,0	12,0	12:45
3	08/11/95	21,5	12,0	13,8	0,0	11,0	15:55
5	08/11/95	21,5	0,0	5,4	20,0	12,0	17:46
6	09/11/95	21,0	0,0	1,2	50,0	8,5	10:04
7	09/11/95	19,0	1,0	6,0	25,0	9,5	12:26
8	09/11/95	21,5	0,0	1,2	50,0	8,5	14:36

En el diseño de las voladuras de prueba se tomó como finalidad principal generar la mayor cantidad de energía sísmica sin ocasionar roca en vuelo, provocando que parte de la energía liberada por el explosivo se transformara en energía mecánica, por lo tanto podemos considerar que prácticamente el 100 % de la energía producida se manifestó, en esta etapa de pruebas, como energía sísmica. Hecho favorable para los fines de esta campaña de exploración, debido a que se generaron los mayores niveles de vibración posible. Para llevar a cabo esto, fue necesario seleccionar el tamaño adecuado de la gravilla y realizar tacos mínimos, de 8,5 m, de acuerdo con los modelados efectuados previamente en computadora.

Cabe aclarar que en la práctica esto representa un caso crítico, donde no se obtendría fragmentación de la roca sino únicamente generación de energía sísmica, de esta manera se puede afirmar que los niveles de vibración, registrados en las voladuras de prueba son mayores a los que se obtendrían en pruebas que considerarían fragmentación del material y por consiguiente habrá partición de la energía proporcionada por el explosivo. No obstante que esta situación es contraria a la establecida en la práctica, se considera benéfica para los fines del estudio y contribuye a manejar mayores umbrales de seguridad.

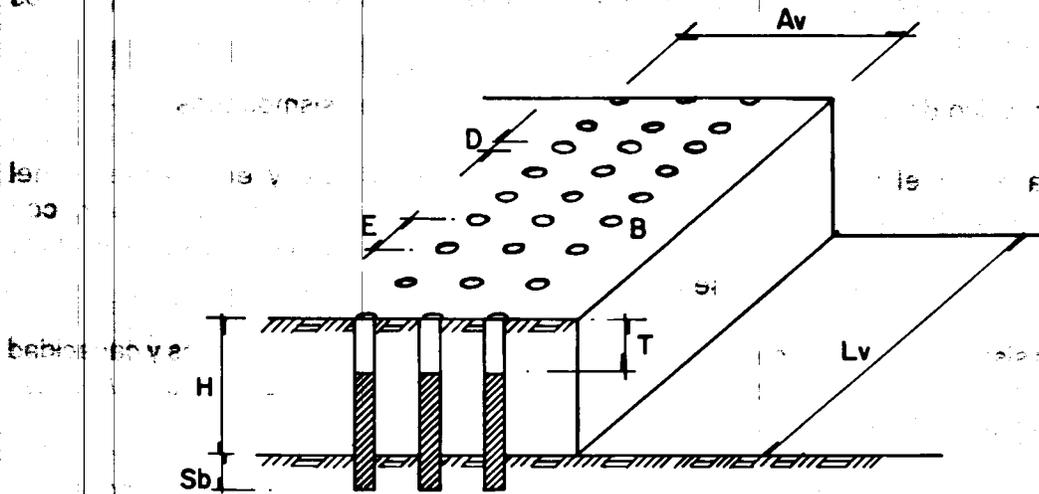
7.6 Cargas máximas estimadas en la etapa de operación

De acuerdo con el diseño preliminar del patrón de voladuras, realizado por personal técnico de Dupont, SA de CV, se considera factible realizar la explotación del Tajo a través de **24 barrenos**, con cargas que varían de **467 a 487 kg** de explosivo para cada uno. Los barrenos serán detonados en conjunto, pero no simultáneamente, de uno por uno en forma independiente, con un defasamiento en tiempo conocido como período de retardo, diseñado de acuerdo con la geometría del banco y las características particulares de la roca del sitio.

En el diseño del patrón de voladura se tomó como finalidad fundamental aprovechar la mayor cantidad de energía, producida por los explosivos para fragmentar la roca, para lo cual fue necesario realizar modelados en computadora del comportamiento del banco de acuerdo con las dimensiones y el tipo de maquinaria que se proyecta utilizar.

No obstante, que las herramientas tecnológicas actuales permiten cuantificar y realizar diseños óptimos de las voladuras, no es posible aprovechar al 100 % la energía para este fin, razón por la cual una parte de la energía liberada se manifiesta en calor, luz, ruido y vibraciones. A las energías no desables en el trabajo de fragmentación de la roca se les conoce como energías de desperdicio.

Los resultados del diseño del patrón de voladura obtenidos para la explotación del Tajo "Mariquita", se muestran en la figura 7.6, y como se podrá observar, el número de barrenos propuesto es de 24 a 15 m de profundidad y en diámetro de 311 mm; por tanto el total de explosivo a utilizar sería aproximadamente de 11 toneladas, explotándose el banco con detonaciones fraccionadas, barreno por barreno, con el uso de retardos como se comentó inicialmente. De acuerdo con el diseño, la carga máxima detonada por período de tiempo será de **487 kg**.



- D - DIAMETRO
- B - BORDO
- E - ESPACIAMIENTO
- Lv- LARGO DE VOLADURA
- T - TACO
- Sb- SUB-BARRENACION
- Av- ANCHO DE LA VOLADURA

Figura 7.6 Voladuras en banquero

7.7 Equipo utilizado

La instrumentación de las voladuras de prueba se realizó a través de 13 sismógrafos digitales: 6 de Dupont y 7 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, los cuales se alojaron colinealmente en cada caso con los puntos de voladura correspondientes, procurándose colocar los sensores en afloramientos de roca a distancias comprendidas entre 10 y 400 m. Del análisis de los registros obtenidos se determinaron espesores y velocidades de propagación de los diferentes materiales que constituyen el subsuelo del sitio y sus alrededores, así como los parámetros dinámicos de la partícula como son: aceleración, velocidad, desplazamiento de los niveles de vibración generados por las voladuras, frecuencias de los pulsos dominantes y sobrepresión de la onda de aire.

La instrumentación se realizó en los puntos conciliados entre el Instituto de Ingeniería y Dupont, que de acuerdo con las características geológicas y topográficas presentes en el campo se consideraron los más adecuados. (Figura 7.1). Para las mediciones se utilizaron equipos digitales, a fin de poder procesar los sismogramas completos con el uso de computadoras. Del análisis de los registros, se determinaron los niveles de vibración generados por las voladuras de prueba y su ley de atenuación, parámetros que hicieron

posible determinarlos escalamientos y obtener los niveles de vibración máximos esperados para las voladuras de operación.

El registro sísmico de las voladuras se realizó con los siguientes sismógrafos:

- Para medir el ruido ambiente o de fondo en el edificio y equipamiento del Observatorio, se utilizó un sismógrafo **DR-100** marca **Sprenghetener**, con sismómetros Kinematics de 5 segundos de período natural, propiedad del Instituto de Ingeniería y únicamente se destinó para este fin.
 - Seis sismógrafos **EDA**, con sensores Lennar de 1 Hz de 3 componentes y capacidad para grabar en ventanas de 30 segundos, a una densidad de 100 muestras/s/canal, propiedad del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
 - Un acelerógrafo modelo **MR2002 Strong Motion Recorder**, de 3 componentes, con capacidad de grabar 17 s antes de la detonación y 30 s después de ella a una densidad de 200 muestras/s/canal propiedad de Dupont.
 - Dos sismógrafos ingenieriles marca **Thomas**, modelo **VMS-100**, propiedad de Dupont, con sensores de 2 Hz y 4 canales; 3 para el registro de cada una de las componentes de la vibración terrestre y el otro para determinar la sobrepresión de la onda de aire. Estos equipos tienen capacidad para grabar en ventanas de 30 s, a una densidad de 100 muestras/s/canal.
 - Un sismógrafo ingenieril marca **Thomas**, modelo **VMS-700**, propiedad de Dupont con sensores de 2 Hz y 4 canales. Este equipo se programó para grabar 1 segundo a una densidad de 100 muestras/s/canal.
 - Un sismógrafo ingenieril marca **Thomas**, modelo **VMS-500**, propiedad de Dupont, con sensores de 2 Hz y 4 canales con capacidad para grabar en ventanas de 30 segundos, a una densidad de 100 muestras/s/canal. Es un sismógrafo con las mismas características que el anterior, salvo porque el registro es analógico. Este equipo se programó para grabar en ventanas de 1 segundo, después de los arribos de los frentes de onda producidos por las voladuras y 0,5 segundos antes de ellas.
- Un sismógrafo digital marca **Nimbus Geometrics**, modelo **ES-1 225**, propiedad de Dupont es de 12 canales, con impresión en papel electroestático, grabación en disco y selectores de filtros, amplitudes y grado de sensibilidad (ganancias) para cada traza. Los geófonos sismodetectores son Mark Products de 24 Hz. Este sismógrafo cuenta además con el software que le permite transmitir la información a una computadora para cuantificar los espesores y las velocidades de propagación de los diferentes materiales presentes en el subsuelo.

Todos los sismógrafos se consideran **equipos modernos** y cuentan con el software requerido para transferir los registros obtenidos en campo, a una computadora capaz de cuantificar los parámetros de la dinámica de la partícula, como son: desplazamiento, velocidad, aceleración, frecuencia del pulso dominante en cada uno de sus 3 componentes, amortiguamiento, velocidad de partícula pico y los espectros de potencia indispensables para la aplicación de los criterios de seguridad.

7.8 Registros obtenidos

La figura 7.7 muestra el tipo de los registros sísmicos obtenidos por parte de Dupont en el monitoreo de los 8 barrenos de prueba, donde además del registro obtenido en los 4 canales la computadora, se proporcionan listados de los niveles de vibración máximos registrados en cada una de las componentes en velocidad, aceleración, desplazamiento y sobrepresión de aire, así como la resultante vectorial y la frecuencia de los pulsos dominantes, además de los aspectos generales obligados como son: distancia a la voladura, cantidad de explosivo utilizado, localidad y hora local.

En la tabla 2 se presentan de manera resumida, los parámetros más importantes de los registros obtenidos por parte de Dupont.

Cabe hacer notar que a distancias mayores de 50 m el ruido producido las por voladuras de prueba fue insignificante y casi no se escuchó, por tal motivo la sobrepresión de la onda de aire no fue registrada. De igual manera, los niveles de vibración fueron disminuyendo significativamente con la distancia, debido a las características particulares de las rocas presentes en cada uno de los sitios, de tal manera los niveles de vibración, a partir de 500 m, pueden considerarse prácticamente despreciables y sólo detectables por instrumentos. La fuerte atenuación de los frentes de onda puede explicarse por lo deleznable de los materiales de cobertura y por las interfases no cementadas entre pórfidos, brechas y granitos, dando lugar a pérdidas de energía.

Tabla 2 Vibration consultant

MANUEL E. ACEV VIBRATION CONSULTANT
MEXI

V3.2 Page: 1
Date 01-11-1996

Number of recor 12 File : LAMARIQ.VIB DECE-13-199 Wed. 23: 07 2,241

La Mariquita
Sonora, Méx.
Noviembre/95

GROUND VIBRATION DATA (Data points: 22):

95% confidence level equation: $P = 681.58 * (Ds) ^ (-1.59)$

Coefficient of determination (r^2 - 'goodness of fit') = Sample standard deviation = 0,34

AIR OVERPRESSURE DATA (Data points: 0):

95% confidence level equation : $AP = 0,00 * LOG (DS) + 0,00$

Coefficient of determination (r^2 - 'goodness of fit') = Sample standard deviation = 0,00

No.	SHOT	LOCATION	DATE	TIME	P.P.V.	FREQUENCY	AIR PRESSURE	DISTANCE	CHARGE WEIGHT	SCALED VIBRAT.	DISTANCE AIRPRES
					in/s	Hz	dB	ft	lb		
1	TIRO No. 1	MARIQUITA	11/07/95	13:27	0,16	57	0,00	656,17	20,93	143,43	238,10
2	TIRO No. 4	MARIQUITA	11/07/95	21:21	0,02	9	0,00	820,21	55,51	110,09	215,01
3	TIRO No. 4R	MARIQUITA	11/07/95	22:21	0,22	32	0,00	328,08	55,51	44,03	86,00
4	TIRO No. 2	MARIQUITA	11/08/95	12:44	0,05	10	0,00	918,64	57,27	121,39	238,33
5	TIRO No. 2	MARIQUITA	11/08/95	12:44	0,38	47	0,00	524,93	57,27	69,36	136,18
6	TIRO No. 2	MARIQUITA	11/08/95	12:44	3,27	27	0,00	131,23	57,27	17,34	34,05
7	TIRO No. 2R	MARIQUITA	11/08/95	12:44	0,18	27	0,00	1115,49	57,27	147,40	289,39
8	TIRO No. 3	MARIQUITA	11/08/95	15:55	0,12	64	0,00	524,93	30,40	95,21	168,19
9	TIRO No. 3	MARIQUITA	11/08/95	15:55	1,82	47	0,00	131,23	30,40	23,80	42,05
10	TIRO No. 5	MARIQUITA	11/08/95	17:45	0,10	17	0,00	524,93	55,95	70,18	137,25
11	TIRO No. 5	MARIQUITA	11/08/95	17:45	2,95	27	0,00	131,23	55,95	17,54	34,31
12	TIRO No. 5R	MARIQUITA	11/08/95	17:45	0,11	36	0,00	1115,49	55,95	149,13	291,65
13	TIRO No. 6	MARIQUITA	11/09/95	10:04	0,05	17	0,00	918,64	112,78	86,50	190,14
14	TIRO No. 6	MARIQUITA	11/09/95	10:04	0,13	23	0,00	524,93	112,78	49,43	108,65
15	TIRO No. 6	MARIQUITA	11/09/95	10:05	6,33	34	0,00	131,23	112,78	12,36	27,16
16	TIRO No. 6R	MARIQUITA	11/09/95	10:04	0,05	26	0,00	1115,49	112,78	105,04	230,88
17	TIRO No. 7	MARIQUITA	11/09/95	12:26	0,72	28	0,00	131,23	68,28	15,88	32,11
18	TIRO No. 7R	MARIQUITA	11/09/95	12:26	0,04	35	0,00	1115,49	68,28	135,00	272,92
19	TIRO No. 8	MARIQUITA	11/09/95	14:35	0,22	20	0,00	918,64	112,78	86,50	190,14
20	TIRO No. 8	MARIQUITA	11/09/95	14:35	0,44	47	0,00	524,93	112,78	49,43	108,65
21	TIRO No. 8	MARIQUITA	11/09/95	14:35	0,94	43	0,00	131,23	112,78	12,36	27,16
22	TIRO No. 8R	MARIQUITA	11/09/95	14:35	0,05	44	0,00	1115,49	112,78	105,04	230,88

Tabla 2 Vibration consultant

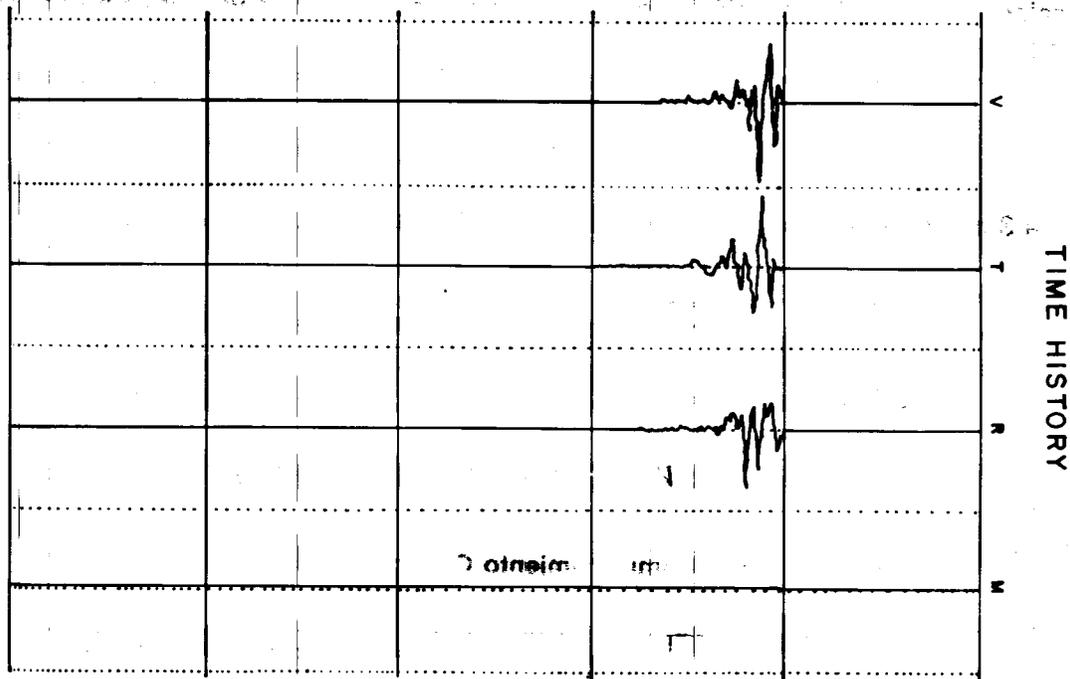


Figura 7.7 Registros sísmicos

7.9 Resultados

Con la inspección para revisar el estado que presentó el gasoducto y los alrededores de los barrenos detonados después de cada voladura, se constató que los niveles de vibración generados no ocasionaron ningún deterioro, debido a que fueron prácticamente instrumentales y mucho menores que los que se producen con el paso de vehículos de carga en las terracerías.

Con los parámetros sísmicos que caracterizan al macizo rocoso, la distancia existente entre los puntos de voladura y los sismógrafos, las velocidades pico de partícula y el peso de la carga máxima utilizada en cada detonación, se calcularon las curvas de atenuación representativas de cada uno de los sitios estudiados y en diferentes direcciones, tanto hacia el Observatorio como al gasoducto. En la parte superior de la figura 7 se muestra la ecuación ajustada por mínimos cuadrados, que aprupa la población de los 22 registros obtenidos por parte de Dupont, la cual tiene como expresión en su envolvente superior:

$$V = 681.58 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.59}$$

- en donde:
- R = Es la distancia en pies comprendida entre la zona de voladura y el punto donde se determinará el nivel de vibración.
 - W = Carga máxima en libras por periodo de retardo utilizada en la voladura.
 - V = Velocidad de la partícula en in/s.

El escalamiento de esta ecuación permite determinar los niveles de velocidad de partícula, que se obtendrán en los trabajos de explotación de la mina al utilizar cargas mucho mayores. Se determinaron los niveles de vibración que se obtendrían a distancias comprendidas entre 100 y 10 000 m, utilizando en las voladuras cargas, por período de retardo, que varían desde 100 hasta 5 000 kg.

La tabla 3 muestra los valores de velocidad de partícula que se obtendrán en la etapa de producción de la futura mina, e involucra las detonaciones máximas de 1 000 Kg de explosivo, detonados en forma simultánea, por período de retardo en condiciones normales; sin embargo, para fines ilustrativos se han considerado casos muy extremos y muy poco probables de llevar a la práctica, donde se utilizarán hasta 5 000 kg de explosivo, detonados en forma simultánea por período de retardo.

$$V = 681.58 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.59}$$

Comportamiento General

DISTANCIA (m)	CARGA POR PERIODO DE RETARDO							
	100 Kg	250 Kg	500 Kg	1000 Kg	2000 Kg	3000 Kg	4000 Kg	5000 Kg
100	4,9630	10,282 6	17,8411	30,955 7	53,7106	74,1400	93,192 1	111,281
500	0,3840	0,7957	1,3806	2,3954	4,1562	5,7371	7,2113	8,6111
1 000	0,1276	0,2643	0,4586	0,7957	1,3806	1,9057	2,3954	2,8604
2 000	0,0424	0,0878	0,1523	0,2643	0,4586	0,6330	0,7957	0,9501
5 000	0,0099	0,0205	0,0355	0,0616	0,1068	0,1475	0,1854	0,2213
10 000	0,0033	0,0068	0,0118	0,0205	0,0355	0,0490	0,0616	0,0735

Tabla 7.3. Valores de velocidad de partícula determinados para diferentes distancias y cantidades de carga por período de retardo en la explotación del Tajo del Proyecto "Mariquita", Son.

Como se puede apreciar, para los casos normales de explotación, con cargas máximas de 1 tonelada por período de retardo, los valores de velocidad de partícula a distancias mayores de 1 Km a la redonda son inferiores a 0,8 in/s, lo cual indica que estos valores satisfacen los criterios de seguridad más estrictos, aún si se considera al gasoducto como edificación del tipo I, que obviamente no lo es. Por otro lado, cabe comentar que para distancias mayores a 4 Km los niveles de vibración son prácticamente insignificantes y muy inferiores a los producidos por efecto de ruido ambiente.

En la figura 7.8 se ilustra en forma gráfica, como se incrementan los niveles de vibración al aumentar la carga por período de retardo en las detonaciones y el decremento correspondiente al aumentar la distancia.

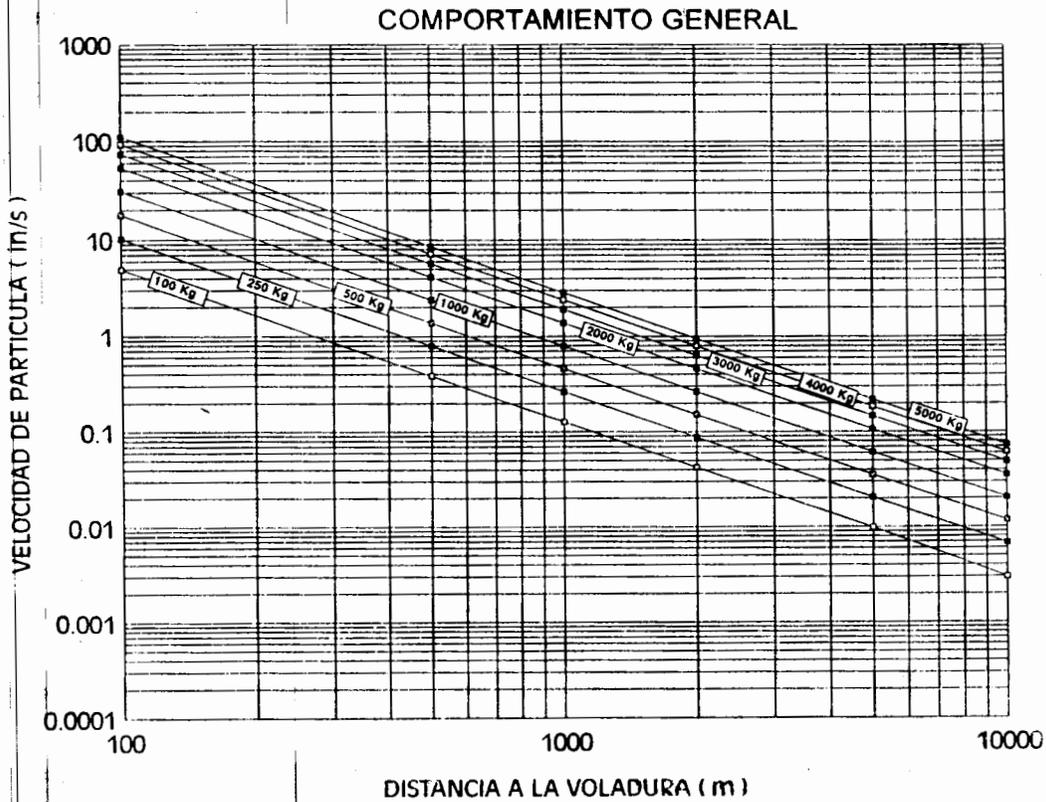


Figura 7.8 Velocidades de partícula determinadas para diferentes distancias y cantidades de carga por periodo de retardo en la explotación del tajo del proyecto "Mariquita", Son.

De acuerdo con los resultados se puede asegurar que no existirá afectación de ningún tipo a más de 1 000 m de distancia, inclusive los de tipo "cosmético", es decir, aquellos que podrían ocasionarse en los materiales más blandos o frágiles de casas habitación, que se encontrarán supuestamente en las inmediaciones del perímetro señalado (los cuales es factible deteriorar con niveles de vibración menores a 2 in/s) como son: agrietamientos de muros con aplanados en yeso o cubiertos con papel tapiz, desprendimiento de tirol, ruptura de vidrios y azulejos, etc. Obviamente los gasoductos tienen una resistencia mucho mayor que la de los materiales frágiles que se utilizan en la construcción, por lo que fácilmente pueden soportar niveles de vibración de 2 in/s y por esta razón muchos autores utilizan este parámetro como criterio de seguridad para gasoductos.

A nivel informativo y para establecer un marco de comparación, cabe recordar que los niveles de vibración para producir daños estructurales en casas habitación como son; ruptura de castillos, trabes, losas y armados o afectaciones a la cimentación por asentamientos, que deben sobrepasar valores de 12 in/s, al respecto, cabe citar que los macrosismos ocurridos en septiembre de 1985 alcanzaron velocidades de partícula de 20 in/s en la zona de suelo más blando.

Particularizando, hacia la zona Sur del Tajo " Mariquita ", en la cual precisamente se localiza el Gasoducto, las mediciones obtenidas a partir de los registros sísmicos recolectados con dirección hacia el gasoducto, indican la existencia de dos curvas de atenuación: una para el macizo rocoso normal y otra para la zona donde se localiza la falla geológica regional.

En el pórfido andesítico los registros sísmicos obtenidos en los trabajos de monitoreo de los barrenos 7 y 8 presentan como curva de atenuación representativa del sitio a la envolvente superior que operacionalmente se define como:

$$V = 543.42 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.6}$$

El escalamiento de esta ecuación para diferentes cargas de explosivo por período de retardo y distancias, se muestra en la tabla 4 y como se puede apreciar, los valores de velocidad de partícula son menores a los de la ecuación general e indican que durante los trabajos de explotación de la mina, estos serán inferiores a 0,45 in/s en la zona del gasoducto y por lo mismo cumplirán satisfactoriamente los criterios de seguridad más estrictos, aún en el caso estricto en que se considerará al gasoducto como edificación del tipo III. De acuerdo con estos resultados, se puede asegurar que no existirá afectación de ningún tipo, inclusive "cosmético", a más de 500 m de distancia.

$$V = 580.33 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.52}$$

Comportamiento hacia el gasoducto

DISTANCIA (m)	CARGA POR PERIODO DE RETARDO							
	100 Kg	250 Kg	500 Kg	1000 Kg	2000 Kg	3000 Kg	4000 Kg	5000 Kg
100	308893	6,6386	11,842 4	21,125 1	37,684 2	52,868 3	67,223 2	80,9914
500	0,2101	0,4516	0,8057	1,4372	2,5638	3,5968	4,5734	5,5101
1 000	0,0660	0,1419	0,2532	0,4516	0,8057	1,1303	1,4372	1,7316
2 000	0,0208	0,0446	0,0796	0,1419	0,2532	0,3552	0,4516	0,5442
5 000	0,0045	0,0097	0,0172	0,0307	0,0548	0,0769	0,0978	0,1178
10 000	0,0014	0,0030	0,0054	0,0097	0,0172	0,0242	0,0307	0,0370

Tabla 7.4. Valores de velocidad de partícula determinados para diferentes distancias y cantidades de carga por período de retardo en la explotación del Tajo del Proyecto "Mariquita", Son.

La figura 7.9, en forma gráfica, ilustra el incremento de los niveles de vibración al aumentar la carga por período de retardo en las detonaciones y el decremento correspondiente al aumentar la distancia.

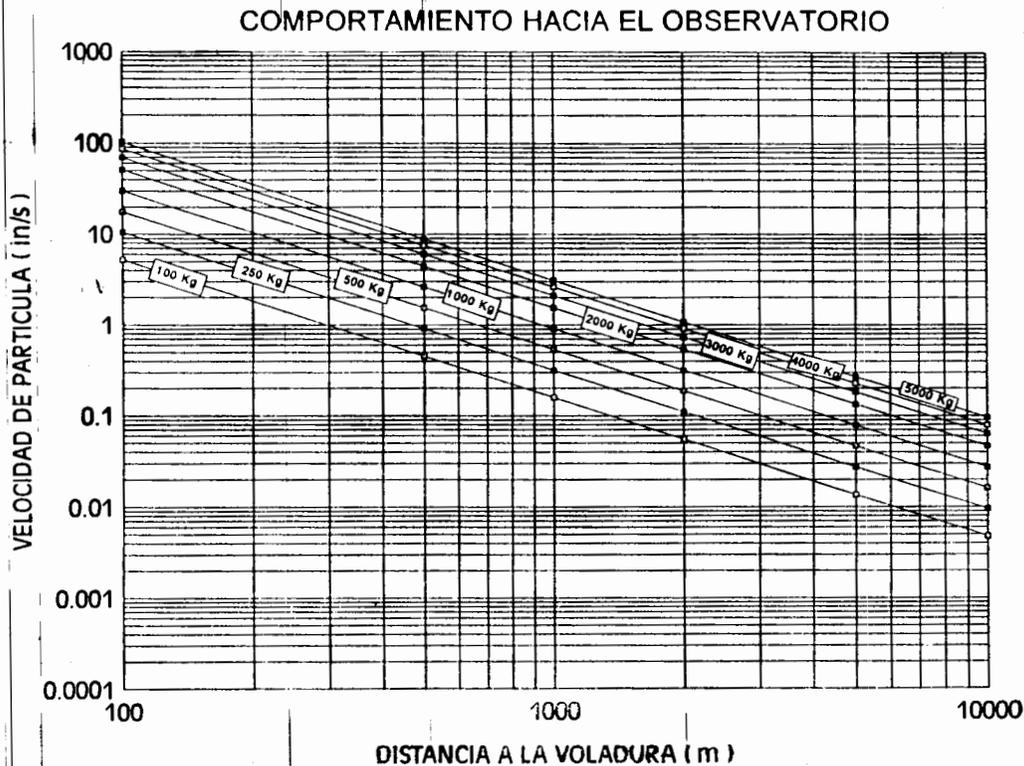


Figura 7.9 Comportamiento hacia el Observatorio

A los parámetros de velocidad pico de partícula (V_{pp}) determinados, se les asignó una frecuencia del pulso dominante (f) de 15 Hz, acorde con las características del material brechoide, y se compararon con los niveles de vibración máximos permisibles establecidos por la norma americana USBM-R18507 (Figura 2), mediante una simple sobreposición, para determinar el grado de afectación que las vibraciones producidas por las voladuras de producción ocasionarán en el gasoducto, considerando el caso de que sobre él se alojarán casas habitación y que no se quiere dañar ni siquiera los enyesados que constituyen los materiales más frágiles de la construcción. Si este fuera el caso, los niveles de vibración no deberían rebasar los máximos permisibles establecidos en la norma de seguridad norteamericana.

La posible canalización de energía que podría transmitirse hacia un tramo del gasoducto, debido a la presencia de la falla geológica regional que se localiza ligeramente al E del Proyecto y con dirección casi N-S, es factible teóricamente siempre y cuando se presenten condiciones propicias para ello. Con el fin de analizar esta posibilidad, se realizó el monitoreo de los niveles de vibración producidos por los barrenos de prueba 5 y 6, localizados en la zona de falla.

La tabla 5 muestra el comportamiento en la zona de falla mediante la ecuación ajustada por mínimos cuadrados, que agrupa una población de 7 registros en los 2 barrenos de prueba detonados en el sitio, y tiene como expresión en su envolvente superior:

$$V = 390.04 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.59}$$

Como se puede apreciar, los valores de velocidad de partícula son menores a los de la ecuación general y ligeramente menores que los de la atenuación local, esta situación es indicativa de que existe una pérdida considerable de energía sísmica, que se manifiesta por una absorción de energía debido muy probablemente a que la zona de falla es amplia y está rellena de material cataclástico en estado de semicompacto a suelto, y no contrasta significativamente con los valores del sitio. Situación favorable para el proyecto, porque la falla geológica regional no representa una estructura sellada, con alto contenido arcilloso, que pudiera provocar un efecto de canalización de energía y por consiguiente amplificación de las ondas sísmicas; sino por el contrario, la estructura geológica presenta un relleno muy suelto que absorbe parte considerable de la energía sísmica.

La aplicación de la ecuación para la zona del cruce del gasoducto con la falla, indica que durante los trabajos de explotación de la mina, se obtendrán valores de velocidad de partícula máximos de 0,045 in/s, los cuales satisfacen ampliamente los mínimos establecidos para edificaciones del tipo III, por los criterios de seguridad más estrictos ya descritos anteriormente, e inclusive también se puede asegurar que no existirá afectación de ningún tipo, inclusive "cosmético", a más de 500 m de distancia

$$V = 390.04 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.59}$$

COMPORTAMIENTO EN LA ZONA DE FALLA

DISTANCI A (m)	CARGA POR PERIODO DE RETARDO							
	100 Kg	250 Kg	500 Kg	1000 Kg	2000 Kg	3000 Kg	4000 Kg	5000 Kg
100	2,8401	5,8843	10,2097	17,7147	30,7364	42,4273	53,3300	63,6817
500	0,2198	0,4553	0,7900	1,3708	2,3784	3,2831	4,1268	4,9278
1 000	0,0730	0,1513	0,2624	0,4553	0,7900	1,0905	1,3708	1,6369
2 000	0,0242	0,0502	0,0872	0,1513	0,2624	0,3622	0,4553	0,5437
5 000	0,0056	0,0117	0,0203	0,0352	0,0611	0,0844	0,1061	0,1267
10 000	0,0019	0,0039	0,0067	0,0117	0,0203	0,0280	0,0352	0,0421

Tabla 7. 5. Valores de velocidad de partícula determinados para diferentes distancias y cantidades de carga por periodo de retardo en la explotación del Tajo del Proyecto "Mariquita", Son.

7.10 Esfuerzos y deformaciones generadas en la tubería.

Para cuantificar el cambio que provocarán las vibraciones en el estado de esfuerzos de la tubería del gasoducto, se solicitó a la Subgerencia de Ductos de Gas Natural Zona Norte de PEMEX, las especificaciones técnicas del acero con el cual está construido el gasoducto:

-	Módulo de elasticidad de Young	$E = 28,6 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$
-	Módulo de cortante	$G = 11,0 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$
-	Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,283$
-	Diámetro exterior	$\phi = 16 \text{ in}$
-	Espesor	$t = 0,25 \text{ in}$
-	Presión interna de trabajo	$P = 600 \text{ lb/in}^2$
-	Esfuerzo máximo permisible	$F_v = 20\,800 \text{ lb/in}^2$
-	Profundidad promedio	$Z = \text{de } 0,90 \text{ a } 1,20 \text{ m}$
-	Tipo de tubería	API 5LX-52
-	Tipo de juntas o costuras	Soldadura a tope

Cabe aclarar que la presión interna actual del gasoducto es de 400 psi, y se proyecta en un futuro elevar la hasta las 600 psi (psi = lb/in²).

Con base en las especificaciones anteriores, se determinó que la tubería no deberá someterse a esfuerzos mayores de 20 800 psi y que las deformaciones producidas por las vibraciones ocasionadas con las voladuras, tampoco deberán exceder a la deformación máxima permisible ($\epsilon_{\text{máx}}$) determinada como:

$$\epsilon_{\text{máx}} = F_v / G = 20\,800 / 11,0 \times 10^6 = 1,89 \times 10^{-3}$$

Con el fin de determinar si la energía que se propaga por el subsuelo se transmitirá íntegramente a la tubería del gasoducto, se cuantificó inicialmente la interrelación suelo-estructura de acuerdo con la expresión desarrollada tanto por Newmark (1969) como por Hendron (1972):

$$J = \frac{E / (1 + \nu)}{\left(\frac{G E_T I}{1 - \nu_T^2} \right) \left(\frac{I}{r^3} \right)}$$

Rigidez del medio
Rigidez al contacto con la tubería

en donde E y ν representan el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson del medio, respectivamente; mientras que E_T y ν_T se refieren al Módulo de Young y al Coeficiente de Poisson de la tubería, I es el momento de inercia lineal y r el radio de la tubería.

Estos autores han demostrado que para propósitos prácticos, cuando la razón de la rigidez del terreno con respecto a la flexibilidad estructural de la tubería, indicada por la ecuación anterior, es mayor de 10, entonces se puede considerar a ésta como completamente flexible, es decir, la estructura se deforma de la misma manera que el suelo, no habiendo pérdidas por la interrelación suelo estructura, transmitiéndose íntegramente la energía sísmica a través del tubo.

Considerando los resultados proporcionados por los tendidos de refracción sísmica, se determinó que las rocas que constituyen el macizo rocoso del Tajo "Mariquita" y alrededores son fundamentalmente pórfidos andesíticos con los siguientes módulos elásticos y dinámicos:

-	Velocidad Longitudinal	VP = 2 285 m/s
-	Velocidad Transversal o de cortante	VS = 1 418 m/s
-	Peso específico	$\gamma = 2,2 \text{ gr/cm}^3$
-	Módulo de Elasticidad de Young	$E = 1,52 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$
-	Módulo de Cortante	$G = 6,41 \times 10^5 \text{ lb/in}^2$
-	Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,19$

Sustituyendo en la ecuación de Newmark los valores determinados para el tipo de rocas presentes en el sitio y los obtenidos para el tipo de tubería del gasoducto, resulta una razón de flexibilidad $J = 0.009$, valor que por ser menor que 10, indica que hay una interrelación suelo-estructura, por lo que sólo una parte de la energía sísmica se transmitirá a la estructura y por consiguiente el gasoducto se deformará en menor grado que el movimiento que sufra el terreno.

No obstante, estos resultados, son favorables para el proyecto de mina, en los cálculos de los esfuerzos y deformaciones que producirán las vibraciones sobre la tubería, se ha tomado el caso crítico, considerando que la energía sísmica que se propagará por el terreno se transmitirá íntegramente a la tubería. Considerando en este caso, que tenemos el incremento en la deformación $\Delta\varepsilon$ producida por las vibraciones y será de acuerdo con la formulación que maneja el Instituto de Ingeniería (Rascón, O.A. y Muñoz C., 1985):

$$\Delta\varepsilon = \frac{V_{\max}}{2V_s} = \frac{0.4516 \text{ in} / \text{s}}{2 \times 1418 \text{ m} / \text{s}} = 4.045 \times 10^{-6}$$

en donde V_{\max} es la velocidad máxima de partícula y V_s la velocidad de propagación de las ondas de corte. Para este cálculo se ha considerado el caso crítico cuando detonan simultáneamente 2 barrenos, representando un total aproximado de 1 000 kg de explosivo y la velocidad de cortante de los pórfidos andesíticos que predominan en el sitio.

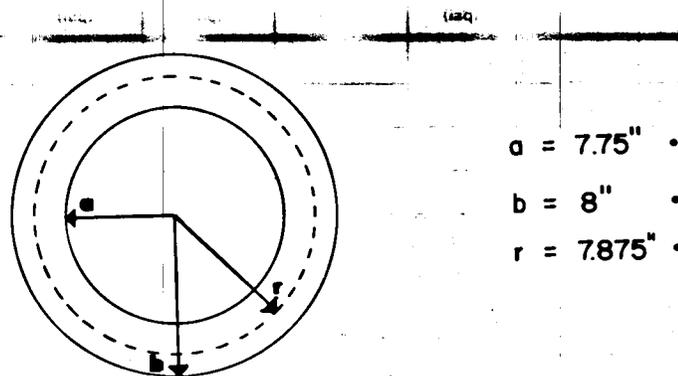
Como es lógico suponer que la deformación total del gasoducto será la suma de las deformaciones, producidas tanto por la presión interna como las vibraciones. La deformación que producirán las vibraciones ($\varepsilon = 4,045 \times 10^{-6}$) son mucho menores a la máxima permisible ($\varepsilon_{\max} = 1,89 \times 10^{-3}$) determinada a partir de las especificaciones técnicas indicadas por PEMEX, por lo tanto teóricamente se puede asegurar que las vibraciones causadas por las voladuras sólo ocasionarán un incremento del **0,214 %**, es decir prácticamente despreciable.

Por otro lado, el esfuerzo cortante adicional que se producirá por las vibraciones sobre la tubería del gasoducto, denominado τ , se cuantifica de acuerdo con la ecuación conocida $\tau = \varepsilon G$. Sustituyendo valores se determina que $\tau = 44,50 \text{ psi}$.

De igual modo, la comparación de este esfuerzo con el máximo permisible indicado por PEMEX ($F_v = 20\,800$ psi), representa un incremento en el estado de esfuerzos de 0,214%, que por ser igual al determinado en el análisis de las deformaciones nos indica que la formulación utilizada es correcta.

Para completar la evaluación es necesario calcular el incremento del estado de esfuerzos de la tubería producido por el material de relleno que la cubre. Para ello supondremos que el material de cobertura se encuentra en estado semicompacto, con un peso específico de $1,5\text{ gr/cm}^3$, que de acuerdo con las especificaciones, el centro de la tubería se encuentra a una profundidad promedio "h" de 1,40 m. En este caso, la presión que ejerce el material de cobertura sobre las paredes del tubo se determina por la ecuación $T_v = \gamma h = 29,84$ psi, prácticamente un 60 % inferior a los que generarán las vibraciones de las voladuras de producción.

Los esfuerzos radiales σ_r y tangenciales σ_θ a que se encuentra sometida la tubería por efecto de la presión interna "P", se determinaron de acuerdo con la formulación de los textos de resistencia de materiales (Popov, 1983), utilizando las expresiones que se indican en la figura 7.10.



$$a = 7.75'' \cdot$$

$$b = 8'' \cdot$$

$$r = 7.875'' \cdot$$

ESFUERZO RADIAL

$$\sigma_r = p \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) = p (-0.488)$$

ESFUERZO TANGENCIAL

$$\sigma_\theta = p \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) = p (30.996)$$

DONDE:

p = PRESION INTERNA

* = PARAMETROS DETERMINADOS PARA
EL GASODUCTO NACO - HERMOSILLO

Figura 7.10 Esfuerzos ejercidos en una tubería sujeta a presión interna

La tabla 6 muestra el estado de esfuerzos a que estará sometido el gasoducto, tanto en su nivel actual (400 psi) como en el caso crítico con presiones internas de 600 psi, y como se puede apreciar, la suma de los esfuerzos involucrados no rebasan el máximo permisible establecido por las especificaciones (20 800 psi), lo que garantiza la seguridad e integridad del gasoducto. La componente tangencial es la que ejerce la mayor parte de los esfuerzos a que se encuentra sujeto el gasoducto, mientras que los mínimos generados serán a consecuencia del material de cobertura y de las vibraciones producidas por la explotación de la futura mina "Mariquita". En particular, el incremento de esfuerzos debido a las vibraciones representa el 0,352 % para el estado actual y de 0,235 % para el estado crítico. Cabe aclarar que estos incrementos no representan siquiera el 1 %, por lo que se puede considerar que prácticamente son despreciables.

La tabla 7 muestra las deformaciones producidas en el gasoducto por los diferentes factores involucrados, totalizando $1,13 \times 10^{-3}$ para el estado actual de presión interna (400 psi) y $1,70 \times 10^{-3}$ para el estado con presión interna al límite (600 psi). Como se puede apreciar, en ambos casos las deformaciones producidas por los materiales de cobertura y las vibraciones son prácticamente insignificantes.

PRESION (psi)	COMPONENTE	σ_r (psi)	σ_θ (psi)	σ_v (psi)	τ (psi)	TOTAL
400,00	RADIAL	195,20		29,84	44,50	269,54
	TANGENCIAL		12 398,40	29,84	44,50	12 472,74
600,00	RADIAL	292,80		29,84	44,50	367,14
	TANGENCIAL		18 597,60	29,84	44,50	18 671,94

Tabla 7.6. Estado de esfuerzos a que se encontrará sometida la tubería del gasoducto involucrando los producidos por vibraciones y materiales de cobertura.

PRESION (psi)	COMPONENTE E	ϵ_r	ϵ_θ	ϵ_v	ϵ	TOTAL
400,00	RADIAL	$1,77 \times 10^{-5}$		$2,71 \times 10^{-6}$	$4,05 \times 10^{-6}$	$2,45 \times 10^{-5}$
	TANGENCIAL		$1,13 \times 10^{-3}$	$2,71 \times 10^{-6}$	$4,05 \times 10^{-6}$	$1,13 \times 10^{-3}$
600,00	RADIAL	$2,66 \times 10^{-5}$		$2,71 \times 10^{-6}$	$4,05 \times 10^{-6}$	$3,34 \times 10^{-5}$
	TANGENCIAL		$1,69 \times 10^{-3}$	$2,71 \times 10^{-6}$	$4,05 \times 10^{-6}$	$1,70 \times 10^{-3}$

Tabla 7.7. Deformaciones a que se encontrará sometida la tubería del gasoducto involucrando los producidos por vibraciones y materiales de cobertura.

7.11 Evaluación de efectos debido a la falla regional

La instrumentación realizada en la zona de falla, cuyos resultados se discutieron con detalle anteriormente, indican que no existe la posibilidad de canalización de energía hacia el gasoducto, debido a la presencia de la falla geológica regional, localizada ligeramente al E del Tajo y con dirección casi N-S, debido principalmente a su tipo de relleno, el cual fundamentalmente es material cataclástico en estado semicompacto a suelto con los siguientes parámetros dinámicos, determinados a partir de los resultados proporcionados por los tendidos de refracción sísmica:

-	Velocidad longitudinal	VP = 3 532 m/s
-	Velocidad transversal o de cortante	VS = 1 641 m/s
-	Peso específico	$\gamma = 2,2 \text{ gr/cm}^3$
-	Módulo de elasticidad de Young	$E = 2,55 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$
-	Módulo de cortante	$G = 9,36 \times 10^5 \text{ lb/in}^2$
-	Coefficiente de poisson	$\nu = 0,36$

De acuerdo con estos valores, resulta que la deformación e producida por las vibraciones (Rascón, O.A. y Muñoz C., 1985) será:

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}}{2V_s} = \frac{0.4553 \text{ in / s}}{2 \times 1641 \text{ m / s}} = 3.524 \times 10^{-6}$$

en donde V_{\max} es la velocidad máxima de partícula y V_s la velocidad de propagación de las ondas de corte, determinadas en la zona de falla con los tendidos de refracción sísmica. Como se puede observar, las deformaciones que producirán las vibraciones ($\varepsilon = 3,524 \times 10^{-6}$) son aproximadamente de 3 ordenes de magnitud menores a la máxima permisible ($\varepsilon_{\max} = 1,89 \times 10^{-3}$), por lo que teóricamente se puede asegurar que las vibraciones canalizadas por la zona blanda de falla sólo ocasionarán un incremento del **0,186 %**, es decir prácticamente despreciable.

Los esfuerzos adicionales que se inducirán sobre la tubería en la zona de falla, denominados τ , serán de **38,76 psi**, de acuerdo con la ecuación $\tau = \varepsilon G$.

De igual modo, la comparación de este esfuerzo con el máximo permisible indicado por PEMEX ($F_v = 20\ 800 \text{ psi}$), representa un incremento en el estado de esfuerzos de 0,186%, que por ser igual al determinado en el análisis de las deformaciones, nos indica que la formulación utilizada es correcta.

La tabla 8 muestra el incremento producido por este nuevo esfuerzo en el total del estado de esfuerzos a que se encuentra sometida la tubería del gasoducto en la zona de falla, tanto en su nivel actual (400 psi) como en el caso límite con presiones internas de 600 psi.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 10, la suma de los esfuerzos involucrados no rebasan el máximo permisible establecido por las especificaciones, garantizándose la seguridad e integridad del gasoducto. La componente tangencial ejerce

la mayor parte de los esfuerzos a que se encuentra sujeto el gasoducto, mientras que los mínimos generados son, al igual que el caso anterior, los producidos por el material de cobertura.

De acuerdo con los cálculos, las vibraciones producidas durante la futura operación del Tajo " Mariquita" y canalizadas por la zona de falla, ocasionarán incrementos del **0,306 %** para el estado actual y de **0,205 %** para el estado límite, que por no representar siquiera el 1% se consideran prácticamente despreciables.

La tabla 9 muestra las deformaciones producidas en el gasoducto por los diferentes factores que se ven involucrados, totalizando $1,13 \times 10^{-3}$ para el estado actual de presión interna (400 psi) y $1,70 \times 10^{-3}$ para el estado con presión interna al límite (600 psi). Como se aprecia en ambos casos, las deformaciones producidas por los materiales de cobertura y las vibraciones son prácticamente insignificantes.

PRESIÓN (psi)	COMPONENTE	σ_r (psi)	σ_{θ} (psi)	σ_z (psi)	τ (psi)	TOTAL
400,00	RADIAL	195,20		29,84	38,76	263,80
	TANGENCIAL		12 398,40	29,84	38,76	12 467,00
600,00	RADIAL	292,80		29,84	38,76	361,40
	TANGENCIAL		18 597,60	29,84	38,76	18 666,20

Tabla 8. Estado de esfuerzos a que se encontrará sometida la tubería del gasoducto involucrando los producidos por vibraciones y materiales de cobertura en la zona de falla.

PRESIÓN (psi)	COMPONENTE	ϵ_r	ϵ_{θ}	ϵ_z	ϵ	TOTAL
400,00	RADIAL	1.77×10^{-5}		2.71×10^{-5}	3.52×10^{-5}	2.39×10^{-5}
	TANGENCIAL		1.13×10^{-3}	2.71×10^{-5}	3.52×10^{-5}	1.13×10^{-3}
600,00	RADIAL	2.66×10^{-5}		2.71×10^{-5}	3.52×10^{-5}	3.29×10^{-5}
	TANGENCIAL		1.69×10^{-3}	2.71×10^{-5}	3.52×10^{-5}	1.70×10^{-3}

Tabla 9. Deformaciones a que se encontrará sometida la tubería del gasoducto involucrando los producidos por vibraciones y materiales de cobertura en la zona de falla.

No obstante que los esfuerzos y las deformaciones producidos en el gasoducto, según muestran las mediciones de campo y los cálculos correspondientes, son prácticamente despreciables; se construyeron curvas esfuerzo-velocidad y deformación-velocidad con el fin de determinar los niveles de velocidad de partícula máximos permisibles y de operación. Este análisis adicional permitirá determinar directamente en campo los esfuerzos y deformaciones producidos en la tubería a consecuencia de las vibraciones producidas por la mina, además servirá para garantizar, mediante un monitoreo periódico de las vibraciones, que las actividades de producción de la mina no ocasionarán daño alguno a las obras de infraestructura de la localidad.

La figura 7.11 muestra el incremento en el estado de esfuerzos a que se encontrará sujeta la tubería durante los trabajos de producción de la mina y como se puede observar, los incrementos son graduales y proporcionales a la velocidad de partícula del terreno. Para el estado actual de presión interna (400 psi), se observa que la tubería puede soportar niveles de vibración considerables, mayores a 20 in/s sin fallar, debido a que los esfuerzos totales ejercidos en la tubería son menores a su máximo tolerable de 20 800 psi, de acuerdo con las especificaciones de PEMEX. Para este nivel de operación, la ruptura del gasoducto se ocasionaría con velocidades de partícula mayores a 80 in/s, que se generarían si voladura se realizara sin tiempos de retardo y a menos de 50 m de distancia. Por otro lado, para la presión interna límite de 600 psi, la curva indica que fácilmente puede soportar vibraciones mayores a 2,0 in/s y su ruptura se ocasionaría con niveles de vibración del orden de 20 in/s.

De acuerdo con lo anterior, para garantizar la integridad del gasoducto, los límites de vibración producidos por las voladuras de producción de la futura mina no deberán exceder las especificaciones indicadas por PEMEX para el estado límite, se manejarán factores de seguridad mínimos del 100 % y se vigilará periódicamente los niveles de vibración producidos en campo. Para cumplir con todo lo anterior se propone:

- a) Colocar en el punto más cercano, del gasoducto a la zona de voladuras, un sismógrafo ingenieril que determine en el sitio los niveles de vibración registrados, quedando el sismógrafo localizado a 1 km aproximadamente de distancia de la zona de voladuras.
- b) Manejar para cualquier punto del gasoducto el valor de 2,0 in/s como máximo operable. Este valor indica que la mina no deberá de exceder durante su operación los niveles de vibración a más de 2,0 in/s y si este fuera el caso, se deberán realizar las modificaciones necesarias para abatirlos nuevamente.
- c) Manejar para cualquier punto del gasoducto el valor de 5 in/s como máximo permisible. Este límite indica que por seguridad del gasoducto no se tolerarán niveles de vibración mayores a dicho valor.
- d) Realizar modificaciones en el diseño del patrón de voladuras si los niveles de vibración registrados a un costado del gasoducto se incrementan progresivamente, aún antes de rebasar el máximo operable, a fin de garantizar que no se alcanzará el máximo permisible y por consecuencia se evitará la suspensión de actividades.

Por lo que a las deformaciones se refiere, el incremento a que se encontrará sujeta la tubería durante los trabajos de producción de la mina presentan la misma forma de las curvas, análisis y conclusiones descritas anteriormente para el análisis de esfuerzos, por lo que prevalecen, en este caso, los valores propuestos como máximo operable y máximo permisible para la futura mina.

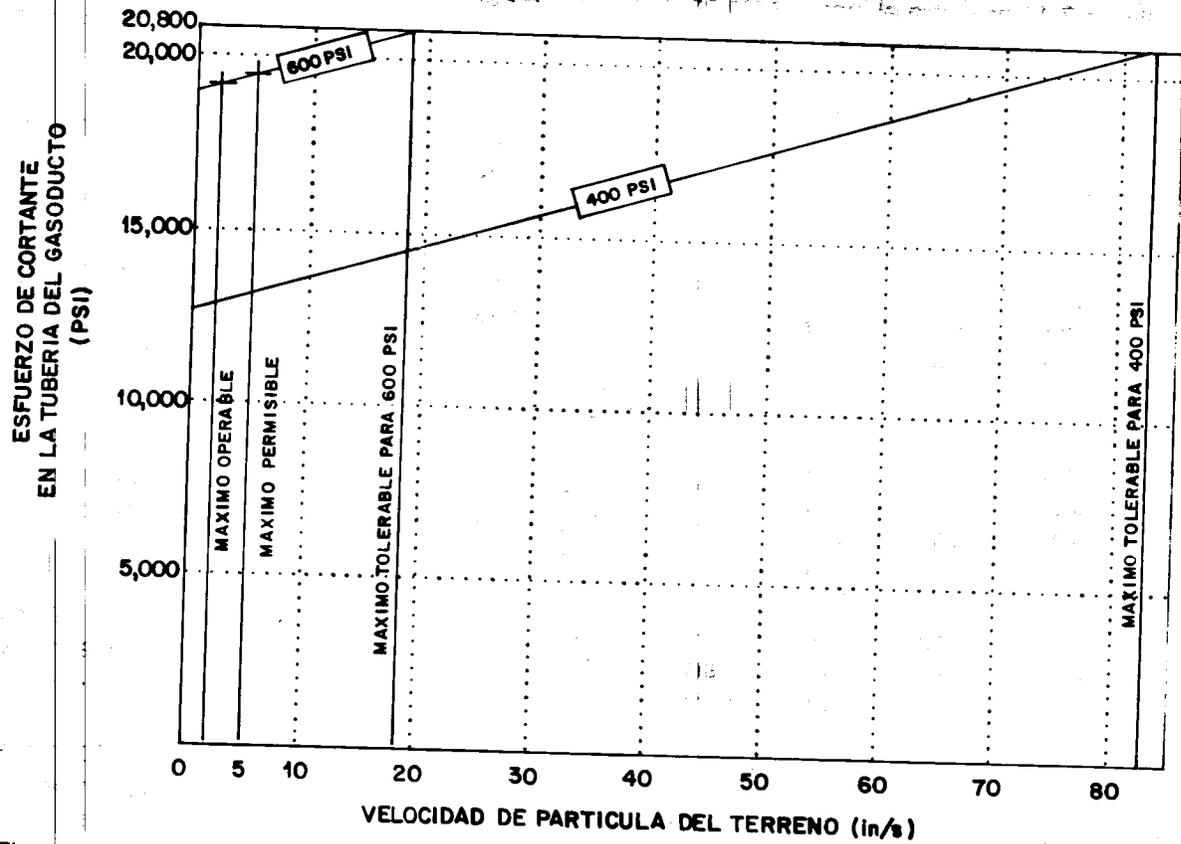


Figura 7.11 Variación del estado de esfuerzos de la tubería del gasoducto en función de los niveles de vibración del terreno.

7.12 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en las mediciones de campo y los análisis teóricos previamente realizados se concluye que:

- Son tres los tipos de roca que predominan en la zona: pórfidos andesíticos, brechas volcánicas y granitos; los pórfidos andesíticos constituyen la roca a explotar, las brechas volcánicas representan la roca más blanda sobre la cual se encuentra desplantado el **Gasoducto Naco-Cananea-Hermosillo**, a 1 050 m de distancia, en su tramos más cercano del futuro banco de roca a explotar; mientras que los granitos son la roca basal sobre la cual se encuentra desplantado el **Observatorio "Guillermo Haro"**, localizado aproximadamente a 4 km del futuro tajo. Con el reconocimiento e inspección del gasoducto y alrededores se pudo constatar que no presenta rasgos de deterioro característicos, ni existen taludes inestables que pudieran representar un riesgo potencial.
- Algunos tramos del gasoducto se encuentran apoyados sobre rocas de composición granítica o andesítica, situación favorable para el proyecto de mina, debido a que este tipo de rocas impide la creación de fallas por asentamiento.
- Los valores de velocidad de partícula determinados en el sitio, a distancias mayores de 1 000 m, no rebasan ni siquiera ligeramente los máximos permisibles establecidos por la Norma Norteamericana USBM-RI8507, no creando ningún deterioro, inclusive de tipo "cosmético" que pudiera requerir cambios en el patrón de voladura. Estos niveles de vibración a distancias mayores, satisfacen ampliamente los valores mínimos permisibles establecidos por los criterios internacionales de seguridad más estrictos.
- La inspección del las condiciones que presentó el gasoducto y sus alrededores, después de las voladuras de prueba, constató que los niveles de vibración no le ocasionaron ningún deterioro, debido a que los niveles de vibración fueron prácticamente instrumentales y mucho menores que los producidos por el paso de vehículos pesados en la carretera.
- Es factible la explotación de los pórfidos andesíticos del Proyecto "Mariquita" con una plantilla de **24 barrenos**, en diámetro de 130,48 cm (2") y con una profundidad de 15 m cada uno, distribuidos en una malla rectangular, compuesta por 3 hileras de 8 barrenos cada una, separados en intervalos de 10 m y diseñada para detonar cargas máximas de 974 kg, equivalentes a la detonación simultánea de 2 barrenos, a intervalos de tiempo de por lo menos con un período de retardo entre cada serie.
- Es factible reducir en la práctica aún más los valores de vibración, si el gasoducto operara a futuro con presiones internas mayores a las especificadas; de ser así, las modificaciones en el diseño del patrón de voladuras pueden garantizar en la práctica valores inferiores a 0,120 in/s.

- Con los parámetros que caracterizan al macizo rocoso, la distancia existente entre los puntos de voladura y los sismógrafos, las velocidades pico de partícula y el peso de la carga máxima utilizada en cada detonación, se calcularon las curvas de atenuación representativas del sitio y con dirección hacia el gasoducto, las cuales tienen como expresión:

Comportamiento general de la zona:

$$V = 681.58 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.59}$$

Comportamiento hacia el gasoducto:

$$V = 543.42 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.67}$$

Comportamiento en la zona de falla:

$$V = 390.04 \left(\frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-1.59}$$

- El escalamiento de las ecuaciones anteriores permitió determinar los niveles de velocidad de partícula que se obtendrán durante los trabajos de explotación de la futura mina, al utilizar cargas mucho mayores. Al respecto, se determinaron los niveles de vibración que se obtendrían a distancias comprendidas entre 100 y 10 000 m, utilizando en las voladuras cargas con período de retardo variable de 100 hasta 5 000 kg.
- De acuerdo con las curvas de extrapolación, a distancias mayores de 1 km a la redonda, los valores de velocidad de partícula son inferiores a 0.8 in/s, independientemente de la cantidad de explosivo detonado y en condiciones normales de operación, lo cual indica que los niveles de vibración producidos durante la operación de la futura mina, satisfacerán ampliamente los criterios de seguridad más estrictos.
- La aplicación de las ecuaciones indican que durante los trabajos de explotación de la futura mina, las velocidades de partícula serán inferiores a 0,5 in/s a la orilla del gasoducto, independientemente de si se encuentra o no en la zona de falla, y por lo mismo cumplirán satisfactoriamente los criterios de seguridad más estrictos. De acuerdo con estos resultados se puede asegurar que no existirá afectación de ningún tipo, inclusive de tipo "cosmético", a más de 1 000 m de distancia.
- Cabe recalcar que los valores de velocidad de partícula máximos esperados en cualquier tramo del gasoducto (< 0,5 in/s), son prácticamente insignificantes y muy inferiores a los producidos por el paso de vehículos pesados en la carretera.

- La falla geológica regional que separa los pórfidos andesíticos de los granitos, presenta una situación favorable para el proyecto de mina debido a que existe una pérdida considerable de energía sísmica, la cual se manifiesta por una absorción de energía debido muy probablemente a que la zona de falla es amplia y está rellena de material cataclástico en estado de semicompacto a suelto, no contrasta significativamente con los propios del sitio.
- La aplicación de la ecuación resultante para el trayecto de los frentes de ondas sísmicas con dirección hacia el gasoducto, indica que la falla geológica disminuye significativamente la propagación de las ondas y por lo mismo durante los trabajos de explotación de la futura mina, es factible obtener valores de velocidad de partícula máximos de 0,45 in/s, los cuales ampliamente satisfacen los mínimos establecidos para edificaciones de tipo III; por los criterios de seguridad más estrictos ya descritos antes, e inclusive también se puede asegurar que no existirá afectación de ningún tipo, inclusive "cosmético", a más de 1 000 m de distancia. Obviamente, los valores determinados son prácticamente insignificantes y muy inferiores a los producidos en el gasoducto por efecto del tráfico de vehículos pesados.
- Con base a las especificaciones del gasoducto, proporcionadas por PEMEX, se determina que la tubería no deberá someterse a esfuerzos mayores de 20 800 psi y que las deformaciones producidas con las vibraciones ocasionadas por las voladuras tampoco deberán rebasar la deformación máxima permisible ($\epsilon_{\text{máx}} = 1,9 \times 10^{-3}$).
- La ecuación de Newmark aplicada al gasoducto y el tipo de rocas en los que está emplazado, una razón de flexibilidad $J = 0,009$, valor que por ser menor que 10, indica que hay una interrelación suelo-estructura, por lo que sólo una parte de la energía sísmica se transmitirá a la estructura y por consiguiente el gasoducto se deformará en menor grado que el movimiento que sufra el terreno; resultado favorable para el proyecto de mina, que no se consideró en los cálculos de los esfuerzos y deformaciones que producirán las vibraciones sobre la tubería, a fin de operar con un mayor factor de seguridad.
- La deformación máxima que producirán las vibraciones ocasionadas por la operación de la futura mina es $\epsilon = 4,045 \times 10^{-6}$, valor mucho menor al máximo permisible ($\epsilon_{\text{máx}} = 1,89 \times 10^{-3}$), determinado a partir de las especificaciones técnicas indicadas por PEMEX, por lo que teóricamente se puede asegurar que las vibraciones causadas por las voladuras sólo ocasionarán un incremento del **0,214%**, es decir prácticamente despreciables.
- El esfuerzo cortante adicional máximo que se producirá por las vibraciones sobre la tubería del gasoducto es de $t = 44,50$ psi, el cual comparado con el máximo permisible indicado por PEMEX ($F_v = 20\ 800$ psi), representa un incremento en el estado de esfuerzos de 0.214 %, que por ser igual al determinado en el análisis de las deformaciones nos indica que la formulación utilizada es correcta.

- La presión que ejerce el material de cobertura sobre las paredes de la tubería es de **29,84 psi**, la cual prácticamente corresponde a un 60 % de la que generará con las vibraciones producidas por las voladuras de operación.
- La componente tangencial es la que ejerce la mayor parte de los esfuerzos a que se encuentra sujeto el gasoducto, mientras que los mínimos generados serán a consecuencia del material de cobertura y de las vibraciones producidas por la explotación de la futura mina " Mariquita". En particular, el incremento de esfuerzos debido a las vibraciones representará el **0,352 %** para el estado actual y el **0,235 %** para el estado límite. Cabe aclarar que estos incrementos no representan siquiera el 1 %, por lo tanto se considera que prácticamente son despreciables.
- En la zona donde se localiza la falla geológica regional, la deformación máxima que producirán las vibraciones ($\epsilon = 3,524 \times 10^{-6}$) son aproximadamente 3 ordenes de magnitud menores a la máxima permisible ($\epsilon_{m\acute{a}x} = 1,89 \times 10^{-3}$), por lo que teóricamente se puede asegurar que las vibraciones canalizadas por la zona blanda de falla sólo ocasionarán un incremento del **0,186 %**, es decir prácticamente despreciable.
- Los esfuerzos adicionales que se inducirán sobre la tubería en la zona de falla, será de **38,76 psi**, el cual comparado con el máximo permisible indicado por PEMEX ($F_v = 20\ 800$ psi), representa un incremento en el estado de esfuerzos de sólo el **0,186 %**.
- De acuerdo con los cálculos, las vibraciones producidas durante la futura operación del Tajo " Mariquita" y canalizadas por la zona de falla, ocasionarán incrementos del **0,306%** para el estado actual de operación (400 psi) y de **0,205 %** para el estado límite en que la tubería se someta a presiones internas de 600 psi, los cuales por no alcanzar siquiera el 1% podemos considerar que prácticamente son despreciables.
- El incremento en el estado de esfuerzos a que se encontrará sujeta la tubería durante los trabajos de producción de la mina son graduales y proporcionales a la velocidad de partícula del terreno. Para el estado actual de presión interna (400 psi), se observa que la tubería puede soportar niveles de vibración considerables mayores a 20 in/s sin fallar; mientras que para el caso límite en que la tubería se encuentre sometida a una presión interna de 600 psi, las curvas indican que fácilmente puede soportar vibraciones mayores a 2,0 in/s y que su ruptura se ocasionaría con niveles de vibración del orden de 20 in/s.
- Por otro lado, el incremento de deformaciones a que se encontrará sujeta la tubería durante los trabajos de producción de la mina, son similares en la forma de las curvas, análisis y conclusiones a los comentados anteriormente para el estado de esfuerzos, por lo que prevalecen en este otro caso los valores propuestos como máximo operable y máximo permisible para la operación de la futura mina.

- Para garantizar la integridad del gasoducto se propone acatar los siguientes 4 aspectos:
 - a) Colocar en el punto más cercano del gasoducto a la zona de voladuras un sismógrafo ingenieril, que determine en el sitio los niveles de vibración registrados.
 - b) Establecer el valor de 2,0 in/s como máximo operable. Este valor indica que la mina no deberá de exceder durante su operación y en cualquier situación niveles de vibración mayores a 2,0 in/s y si este fuera el caso deberá de realizar las modificaciones necesarias para abatirlos nuevamente.
 - c) Establecer el valor de 5 in/s como máximo permisible. Este límite indica que por seguridad del gasoducto no se tolerarán niveles de vibración mayores a este valor.
 - d) Realizar modificaciones en el diseño del patrón de voladuras si los niveles de vibración registrados a un costado del gasoducto se incrementan progresivamente, aún antes de rebasar el máximo operable, a fin de garantizar que no alcanzará el máximo permisible y por consecuencia la suspensión de actividades.

7.13 Bibliografía

- Benhumea L.M., 1993, Criterios de seguridad para prevención de daños por voladuras en edificaciones en la Ciudad de México, Trabajo de ingreso a la Academia Mexicana de Ingeniería, Revista de Ingeniería, Vol. LXIII, No. 2.
- Dowding H. Ch., 1985, Blast vibration monitoring and control, Prentice Hall.
- Du Pont, S.A. de C.V., 1983, Manual para el uso de explosivos, decimosexta edición, Depto. Explosivos, México.
- Instituto Geológico y Minero de España, 1987, Manual de perforación y voladura de roca, Ministerio de Industria y Energía de España.
- Oriard L. L., 1971, Blasting operations in the urban enviroment, Bull. Assoc. Eng. Geol.
- Vázquez C.A. y Benhumea L.M., 1988, Análisis de las vibraciones en la demolición de edificios por explosivos en la Ciudad de México, C.F.E., México.
- Rascón O.A. y Muñoz C., 1985, Análisis sísmico de tuberías enterradas, Modelo matemático y recomendaciones para el Distrito Federal, Series del Instituto de Ingeniería, No. 494, México, D.F.
- Newmark N.M. and Hall W.J., 1969, Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities, Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, International Association of Earthquake Engineering, Vol. II, Santiago, Chile, 37-50.
- Hendron A.J. and Oriard L.L., 1972, Specifications for Controlled Blasting in Civil Engineering Proyects, Proceedings of the First American Rapid Excavation and Tunneling Conference, Society of Mining Engineers, AIME, Littleton, Colorado, USA.

8. VIBRATION MONITORING FOR CIVIL ENGINEERING

In North America most monitoring programs involve either compliance monitoring or blast analysis monitoring, with compliance monitoring being the most common. These are sometimes referred to as far field and near field monitoring respectively, with these terms referring to the distance at which vibration data is collected. Blast analysis monitoring is used to assess blast performance of typically large production blasts in mines and quarries, where the resulting vibrations can be used to assess blast design, product performance, and timing. Such monitoring involves placing sensors very close to the blast. Compliance monitoring is typically concerned with demonstrating adherence to regulations imposed by government agencies. Here the blasting operations would be places such as mines or quaries with housing or other third party structures nearby. These regulations are enacted to set limits on blasting to prevent structural damage and/or reduce human annoyance complaints. monitoring is usually done at the first public or private structure(s) nearest to the blast.

These types of monitoring require a different set of performance requirements in the monitoring instruments or seismographs. Monitoring of blasting activities in civil engineering projects, however, require elements of both types o seismographs as will be presented in this paper.

8.1 Far Field (Compliance) Monitoring

Compliance instruments, by far the most common, record and store data and provide an in field printout with at least some analysis or calculations of peak particle velocity and displacement. For the most part, only the nearest public building is monitored. Although capable of recording velocities of up to 250 mm/second, most compliance monitoring is limited to 15 mm or less. Since monitoring is done at some distance from the blast, the frequencies are attenuated so that they are less than 250 or 300 Hertz. The seismographs therefore do not require sampling rates of more than 1000 samples per second. Finally, because the monitoring is done to protect private residences which are sensitive to certain frequency ranges (typically below 80 Hertz), most seismographs perform rudimentary frequency analysis using a zero crossing technique to indicate the frequencies present in the vibrations. These are usually shown on a graph which has defined limits for vibration as a function of frequency. Each country has set their own standards, for example, in the United States the standard is the USBM R18507 curve. Many countries have set their standards, while others are in the process of doing so.

These seismographs were designed to be set up by relatively inexperienced people. Data interpretation was usually not required, as the type of analysis needed could be performed and printed by the seismograph.

8.2 Near Field (Blast Analysis) Seismographs

Near field, or blast analysis monitoring seismographs are required to do much more. Sensor placement can be as close as ten meters, resulting in significant increases in frequency content and amplitude. It is the need to record the higher frequencies to measure blast timing that dictates the close sensor placement, as the high frequencies dissipate quickly over distance. The requirements result in the need for higher performing sensors (accelerometers of high frequency geophones), higher sample rates (to 8 000 or 16 000 sps), wider dynamic measurement range and significantly more memory. While there is little need for in field printers, computer analysis is a must. There are no regulatory standards to apply here, and the data requires experienced personnel to interpret.

8.3 Civil Engineering Monitoring

Blasting for civil engineering usually occurs around built up infrastructures such as city sewers, buried power transmission lines and gas/oil pipelines. The limits uses by the regulatory bodies which were generated for people's residences serve no useful purpose here, Consequently one is monitoring to show adherence to limits that have been imposed contractually. In some cases these limits can be arbitrarily low, as we will see later.

It is not uncommon to be blasting at short distances (less than 20 meters) from a pipeline or sewer. The structure will be subjected to a wide frequency range of vibration and the vibration limits that will be imposed will depend on its robustness. The magnitude of the vibrations and the requirement to record high frequencies result in specialized sensors such as high frequency geophones and/or accelerometers. In many instances in North America vibration limits are set arbitrarily low by the contracting authority, much lower than what is needed to protect the structure. This can be a challenge and a frustration for the blast designer. Some infrastructures are quite robust and can withstand relatively high vibration levels and are immune to high frequency vibrations, so that one need not use high frequency sensors or recorders.

In some other cases the requirements may be set not in the commonly uses peak particle velocities, but in acceleration. This is commonly the case where the structures to be protected are buildings housing computer systems with sensitive hard drives or other instruments/equipment whose sensitivity to shock is usually known and expressed in "g's" (acceleration). Depending on the nature of the contract and how it is specified, one may be able to use the more commonly available and more inexpensive geophones to record the data and subsequently differentiate it on a PC to obtain the acceleration waveform. Otherwise an accelerometer is required, necessitating more expense. It also requires that the seismograph be designed to accommodate an accelerometer rather than a geophone. This is not the problem it was several years ago, when accelerometers were very expensive. New piezoplastic materials and silicon devices have reduced the price. One caveat is to choose carefully as some of these sensors exhibit a cross axis sensitivity which will result in erroneous readings.

Some civil engineering projects involve pile driving programs rather than blasting. Whereas the blast vibration is over usually in a matter of seconds, pile driving occurs continuously necessitating a different type of monitoring, called stripchart or histogram monitoring. A continuous waveform is not recorded as this would result in a tremendous amount of (largely useless) data. Rather, the monitoring system records the highest amplitude in a given period of time and stores that in memory. Some seismographs also record the frequency of that peak. The result is a series of recorded points of data, representing the maximum amplitudes found over several hours or days. In some cases the seismograph can be preprogrammed with two values representing predetermined warnings of danger levels. When these levels are exceeded, the seismograph will activate an external flashing light or siren to warn the equipment operator. Such a system is shown pictured in photograph 8.1.



Photograph 8.1 Seismograph

8.4 Coupling of Sensors in Civil Engineering

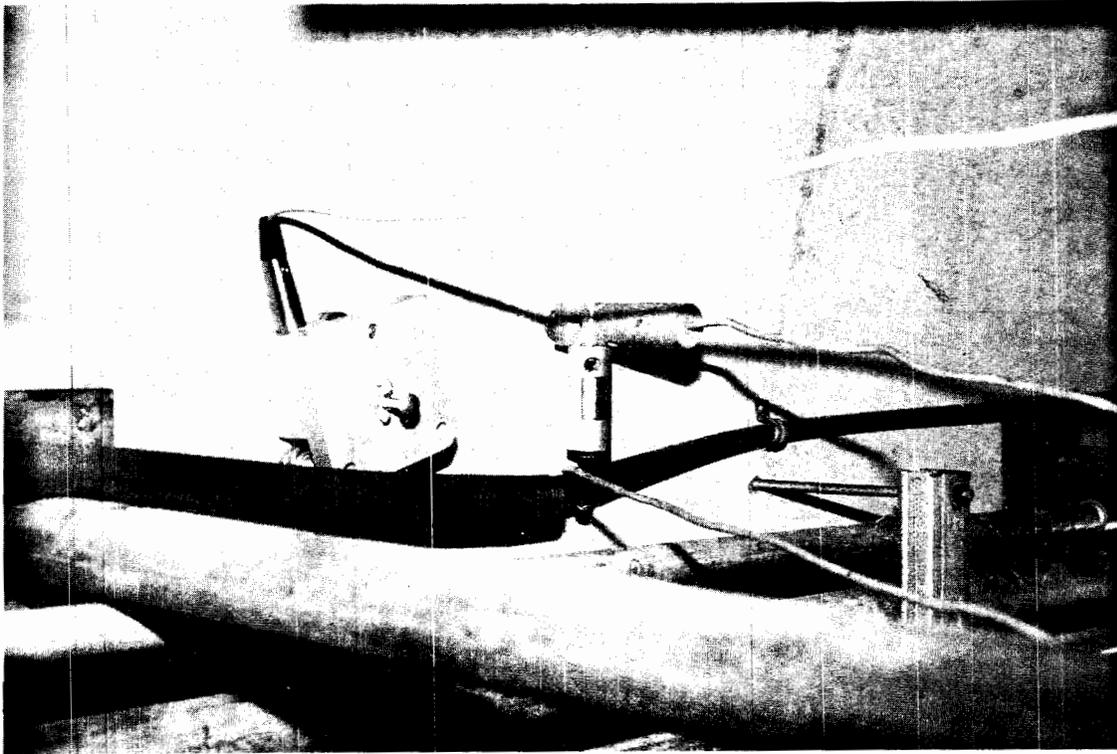
In compliance monitoring the peak particle velocities are likely to be less than 15 mm per second, and a common practice in the US and Canada is to simply place the geophone on the surface and place a weight, such as a sandbag over it. Such methods are considered acceptable because there is little chance of decoupling of the geophone from the ground at these low vibration levels.

Decoupling occurs when there is sufficient energy to cause the sensor or geophone to move independently from the ground. This can happen where the sensor is not securely attached. Once this happens, the geophone records the velocities of the sensor, not the ground and these can be considerably larger than the ground motion.

In those situations where the monitoring points are on structures which are physically close to the blasting, there may be sufficient energy to cause decoupling. In these cases sandbagging is not an acceptable means of securing. Where possible and permitted, the preferred method is to drill a hole and install an expanding bolt to secure the sensor (see photograph 8.2). Other practices include cementing the sensor in place with a material that forms a sufficient bond to secure the sensor, but is weak enough to allow recovery of the sensor after finishing the monitoring program.

The attached waveforms (figures 8.1 & 8.2) show an example of decoupling. In this instance, the bed of a railroad track was being monitored. The bedding material was composed of rock material 7 to 8 cm in circumference. The geophone was fixed in position with a cement compound. While this was sufficient to secure the geophone to the surrounding material, there was sufficient energy to decouple this mass (the sensor plus that bedding material cemented to it).

The resulting waveform does not look like one would expect from a blast. To further confirm what has happened, the waveform was integrated and differentiated to provide displacement and acceleration waveforms, as shown. The evidence is the non-zero value at the end of the displacement waveform and the very sharp acceleration waveforms. The non zero value on the displacement waveform indicates that the sensor has shifted from its original position, something that would not have happened if the coupling to the ground was adequate (unless the ground itself shifted). The extremely high accelerations are indicative of the sensor losing its coupling and moving of its own accord without the damping effect of the earth. If there is needed any further incentive to properly couple the sensor it would be to recognize that a decoupled sensor will always show high vibration levels.



Photograph 8.2

8.5 Civil Engineering in Canada- some examples

The following two examples are civil projects in Canada where explosives were used and where vibration monitoring was required. (These examples were supplied courtesy of Explotech Engineering, Nepean, Ontario, Canada).

The first example (see photographs 8.3 to 8.5) is the construction of a service tunnel in the downtown core of Ottawa, the capital city of Canada. The tunnel was required to supply heating and cooling systems to several federal government buildings. Nearby structures were the visible buildings as well as sewers and power transmission lines. The tunnel was about 600 meters long and about 10 to 12 meters below the surface. The rock was limestone and highly competent.

The contract placed a vibration limit of 3 mm/second at the buildings surrounding the tunnel. This extremely low limit was specified because the buildings were insulated with asbestos and there was concern that this would shake loose and become a health hazard. It was subsequently shown that slamming a door in the building would cause vibrations in excess of 3 mm/second. Nonetheless, excessive over caution on the part of the contracting agencies can result in overly low limits such as this.

Instantel®

Event Report

BA5238, Aug 15 /96 15:50:01 : Waveform

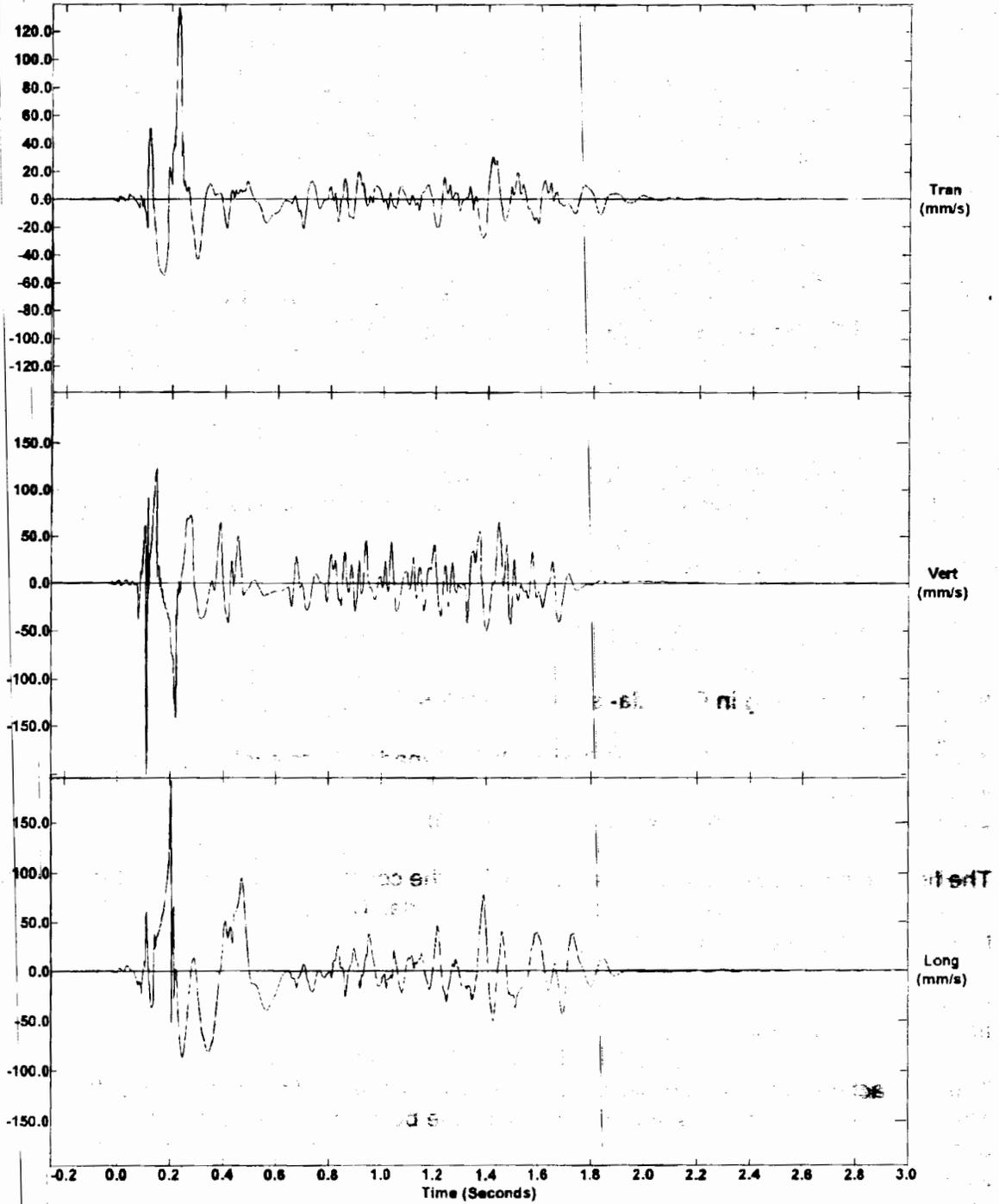


Figura 1. Event report.

Instantel®

Processed Event Report
BA5238, Sep 5 /96 11:07:46 : Process

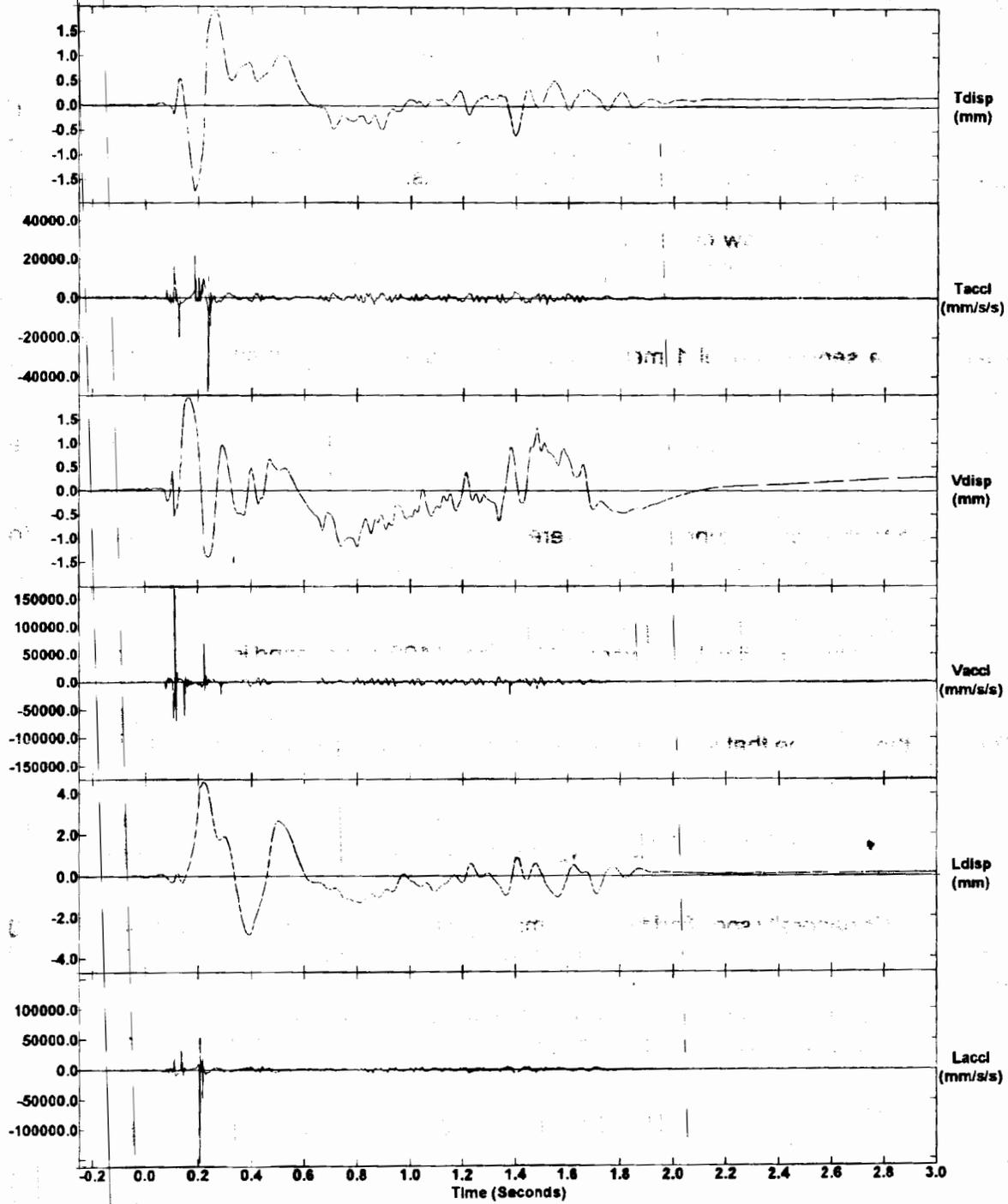


Figura 2. Processed event report.

The sewer was in some places less than 2 meters away requiring very small shots. The contact placed a vibration limit of 50 mm/second on the sewer, regardless of frequency. Because of the short distances, there were very high frequencies recorded as part of a research project to show that tradition vibration limits did not make sense with close-in blasting and that high frequencies did not effect large structures such as sewers.

The second example is shown in photographs 8.6 & 8.7. This is part of the Welland canal, built to transport ships between Lake Ontario and Lake Erie, which are part of the Great Lakes. This canal is close to the famous Niagara Falls.

Fifty years of freeze/thaw cycles and expansion/contraction due to water fill/drain cycles had taken its toll on the old walls. The project required that up 1 meter of old concrete be removed from the canal walls to be replaced with new material.

There was a service tunnel 1 meter behind the material to be removed. These tunnels carried high voltage power to operate the gates seen in the background. The gates themselves were less than 2 meters from the nearest point of concrete removal. Blasting mats were used on the gates only for cosmetic purposes. As it was considered impossible to protect the gates from damage should any material hit it (none did).

In addition to the service tunnel, there were crossovers and filling culverts which added to the blast design complexity and the need to control resultant vibrations.

For this project the vibration limits were not to exceed 100 mm/second in the service tunnels, and 50 mm/second at the gate hinges.

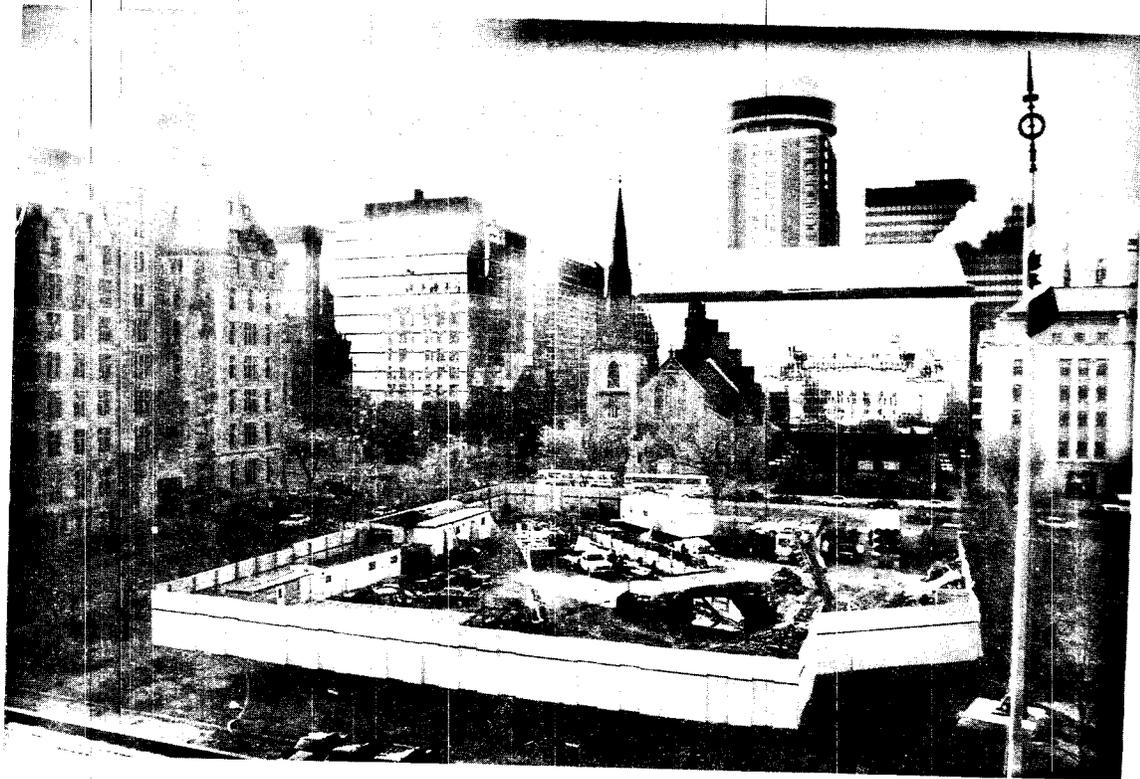
This was the first time that sequential blasting was used on a demolition contract in Canada and the first time that a whole monolith was shot in one blast.

8.6 General Vibration Limits in Canada

In Canada it is generally specified that for compliance monitoring in activities such as quarrying that a vibration limit of 12,5 mm/second and an air overpressure limit of 128 db be adhered to at the nearest structure to the operations. For construction work the limit is 50 mm/second for ground vibration with no generally accepted limit on air overpressure. for civil work the limits vary and as can be seen above can be quite restrictive if there is sensitive buildings, but in no case would it exceed 150 mm/second. There is no generally accepted air over pressure limits.

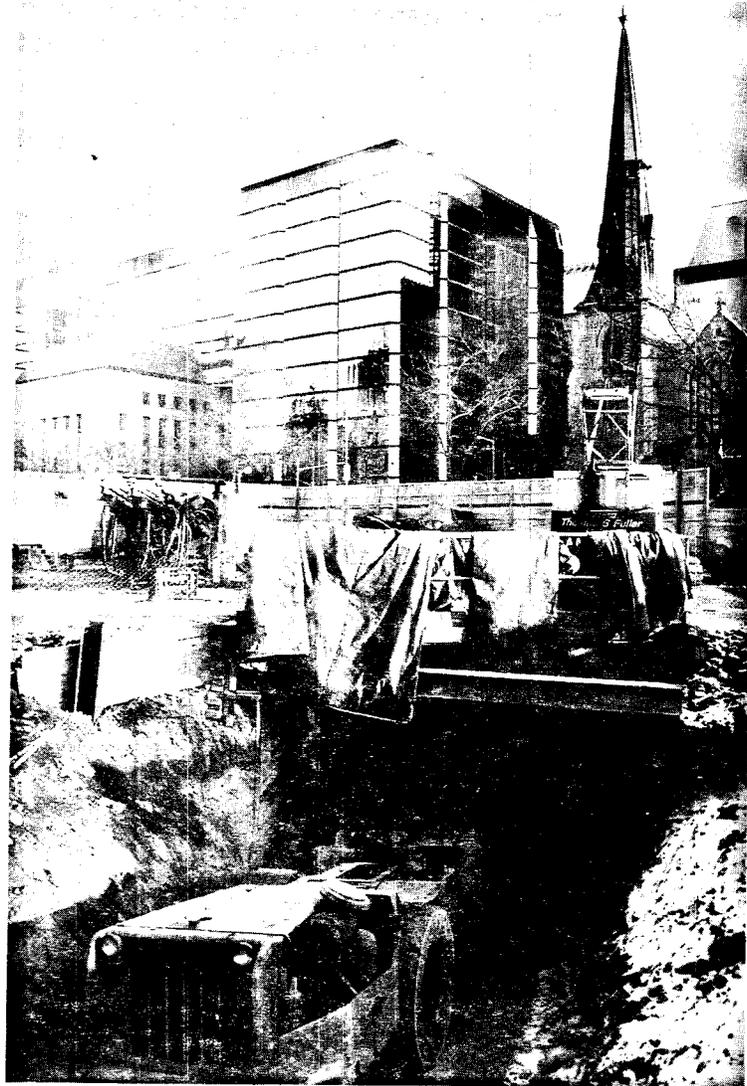
8.7 Summary

Monitoring of vibrations caused by blasting in civil engineering can be done easily with equipment available today that combines the requirements of both near and far field monitoring. Such equipment was not available in a single cost effective unit until recently. The challenge for the future is to understand the effects of vibration amplitudes and frequencies recorded by such units on the infrastructure that we are trying to protect.



Photograph 8.3

A 8 1000000



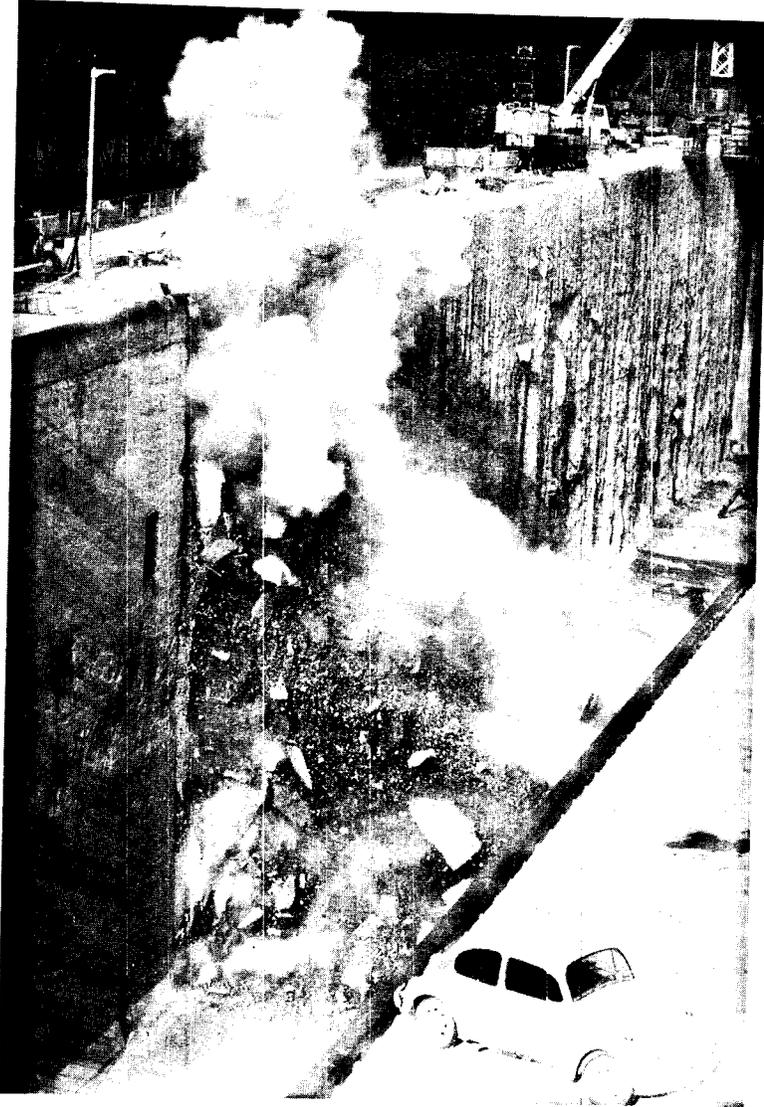
Photograph 8.4



Photograph 8.5



Photograph 8.6



Photograph 8.7

9. ASPECTOS AMBIENTALES

9.1 Perspectivas de la legislación ambiental mexicana para la regulación de actividades altamente riesgosas

9.1.1 Antecedentes

La regulación ambiental de las actividades altamente riesgosas en México es muy reciente. Su historia se inicia con la publicación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente¹ (LGEEPA) en la que se incluyó, dentro del Título Cuarto **Protección al Ambiente**, el Capítulo IV **Actividades Consideradas como Riesgosas**, integrado por cinco artículos, dos de los cuales (art's. 146 y 147) están consagrados a la regulación de las actividades altamente riesgosas.

En su artículo 146 la LGEEPA establece que las Secretarías de Desarrollo Urbano y Ecología² y de Gobernación publicarán listados de las actividades que deben considerarse como altamente riesgosas, en tanto que el artículo 147 señala que la realización de esas actividades se hará en apego a lo dispuesto por la LGEEPA, las disposiciones reglamentarias que de ella emanen y las normas que sean expedidas.

En la fracción X del artículo 5º de la LGEEPA queda establecido que es asunto de alcance general en la nación o de interés de la federación: *la regulación de las actividades que deban considerarse altamente riesgosas, según ésta y otras leyes y sus disposiciones reglamentarias, por la magnitud o gravedad de los efectos que puedan generar en el equilibrio ecológico o el ambiente.*

De acuerdo con lo establecido en el artículo 28 de la LGEEPA, la realización de obras o actividades industriales comerciales o de servicios que puedan causar desequilibrios ecológicos³ o rebasar los límites establecidos en las normas, (esto incluye a las actividades altamente riesgosas), deberán sujetarse a la autorización previa del Gobierno Federal.

¹ La LGEEPA entró en vigor desde el primer día de marzo de 1988.

² A partir del 28 de Diciembre de 1994, los asuntos de carácter ambiental que estuvieron a cargo de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), y que posteriormente fueron responsabilidad de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), forman parte de las funciones asignadas a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). En adelante, y sólo con fines prácticos, todas las Secretarías de Estado mencionadas en este trabajo aparecen con su nombre actual, aun cuando en los textos originales que se citan aparecen con los nombres anteriores.

³ El concepto de "desequilibrio ecológico" se encuentra definido en el artículo 3º de la LGEEPA de la siguiente manera: *La alteración de las relaciones de interdependencia entre elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.*

Para obtener la autorización referida en el artículo 28, el artículo 32 indica que los interesados deben presentar a la autoridad una manifestación de impacto ambiental y que, en su caso, dicha manifestación deberá ir acompañada de un estudio de riesgo, en el que se indiquen las medidas técnicas preventivas y correctivas para mitigar los efectos adversos al equilibrio ecológico durante la realización de la construcción de la obra, el desarrollo de la actividad y en caso de un accidente.

Aunque no se especifica en el artículo 32 ni en ningún otro artículo en qué casos se debe presentar el estudio de riesgo, en la práctica la SEMARNAP ha venido solicitando, a través del Instituto Nacional de Ecología (INE), la realización de tales estudios cuando la obra o actividad que se propone está relacionada con el manejo de sustancias peligrosas, como en el caso de las actividades altamente riesgosas.

Adicionalmente, el artículo 147 establece como obligación para los responsables de realizar actividades altamente riesgosas, la elaboración de programas para la prevención de accidentes, mismos que se someterán a la aprobación del Comité de Análisis y Aprobación de Programas para la Prevención de Accidentes (COAAPA)⁴.

9.1.2 Situación actual

No obstante lo indicado en los artículos ya citados de la LGEEPA, la regulación ambiental de actividades altamente riesgosas se encuentra incompleta, pues no se ha publicado el reglamento previsto en la ley y sólo se cuenta con dos listados de actividades altamente riesgosas, publicados con fundamento en el artículo 146 de la LGEEPA; el primero de ellos (28 de marzo de 1990) se refiere al manejo de sustancias tóxicas, en tanto que el segundo (4 de mayo de 1992) hace referencia al manejo de sustancias inflamables y explosivas.

Adicionalmente, con base en el artículo 174, pero de manera extraoficial, puesto que no se ha publicado en el Diario Oficial de la Federación, el INE ha venido exigiendo la utilización de un guía diseñada por el COAAPA para la elaboración de los programas para la prevención de accidentes, misma que ha sido revisada y modificada en varias ocasiones hasta llegar a su sexta versión.

De acuerdo con la guía para la elaboración de programas para la prevención de accidentes, en ellos se debe aportar información relacionada con los planes, procedimientos, recursos y programas previstos para atender y dar respuesta, en el interior y el exterior de sus instalaciones, a cualquier contingencia o desastre ocasionado por el mal manejo y/o la liberación de sustancias peligrosas.

⁴ El COAAPA se encuentra integrado por las Secretarías de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, y del Trabajo y Previsión Social; además, aunque no está establecido en la LGEEPA, también participa en el COAAPA la Secretaría de Gobernación.

Pero es precisamente en los listados de actividades altamente riesgosas donde se han establecido los tres criterios fundamentales para determinar cuales son las actividades industriales, comerciales y de servicios, que deben considerarse como altamente riesgosas: sustancia peligrosa, manejo de sustancias peligrosas y cantidad de reporte:

Sustancia peligrosa es:

Aquella que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radiactividad, corrosividad o acción biológica puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Manejo de sustancias peligrosas:

- a) alguna o el conjunto de las actividades siguientes: producción, procesamiento,
- b) transporte, almacenamiento, uso o disposición final de sustancias peligrosas.

Cantidad de reporte:

- a) Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transporte dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

Tomando como base las definiciones anteriores, es fácil comprender por qué en el artículo 1º del Primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas queda establecido que:

Se considera como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peligrosas en un volumen igual o superior a la cantidad de reporte.

Vale la pena destacar que en la guía para elaborar programas para la prevención de accidentes diseñada por el COAAPP, la definición de actividad altamente riesgosa es distinta, aunque en esencia parecería conservar el mismo sentido:

- a) Actividades altamente riesgosas: Son aquellas acciones, serie de pasos u operaciones comerciales y/o de fabricación industrial, distribución y ventas, en que se encuentran presentes una o más sustancias peligrosas, en cantidades iguales o mayores a su cantidad de reporte, que al ser liberadas por condiciones anormales de operación o externas, provocarían accidentes.

Aun y cuando se trata de un documento que no ha sido publicado en el diario Oficial de la Federación, pero cuyo seguimiento establece la SEMARNAP para la presentación de los programas para la prevención de accidentes, en la guía del COAAPP debe manejarse la misma definición de los listados, sobre todo porque éstos formalmente sí son documentos oficiales.

Es importante señalar que hasta el momento no hemos hablado de residuos sino de sustancias, entendidas como materias primas o insumos; de tal manera que las cantidades de reporte establecidas en los listados de actividades altamente riesgosas no son aplicables cuando hablamos de residuos peligrosos. Las obras o actividades en las que se generan residuos peligrosos están sujetas a un conjunto de regulaciones ambientales distintas que señalaremos más adelante.

9.1.3 Perspectivas

En la actualidad, el marco regulatorio ambiental en materia de actividades altamente riesgosas se encuentra en un proceso de revisión y complementación. Durante 1985, la SEMARNAP convocó a diversos sectores para que le hicieran saber sus comentarios en torno a las reformas que consideren necesario se deben hacer a la LGEEPA, en tanto que continúa con los trabajos iniciados hace varios años para la elaboración de un proyecto, de reglamento en materia de actividades altamente riesgosas, con el que se pretende cubrir el vacío de legalidad existente hasta ahora en ese sentido.

Por otra parte, de manera totalmente extra oficial, el COAAPPA ha venido recopilando los comentarios de diferentes entidades interesadas en la elaboración de la séptima versión de la guía, para elaborar programas para la prevención de accidentes.

La versión más reciente del documento con la Propuesta de Reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, fue entregada por la SEMARNAP al Poder Legislativo para su revisión, aprobación y promulgación en su caso, incluye las siguientes reformas en materia de actividades altamente riesgosas.

En el artículo 5º del Título Primero, Disposiciones Generales y Capítulo II, Distribución de competencias y coordinación, se propone modificar la fracción V para establecer como facultad de la federación:

La regulación y control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación y manejo de residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, así como para la preservación de los recursos naturales, de conformidad con ésta y otros ordenamientos aplicables.

Como complemento a la fracción arriba señalada, en el artículo 7º, fracción IV, se establece que es atribución de las entidades federativas, del Distrito Federal y de los municipios, la regulación de actividades riesgosas para el ambiente, de conformidad con lo dispuesto en los artículos 146 y 149 de la nueva LGEEPA.

En cuanto a la evaluación de impacto ambiental, la fracción VIII del artículo 28, establece que quienes pretendan llevar a cabo parques industriales donde se prevea la realización de actividades altamente riesgosas, requerirán previamente la autorización de SEMARNAP en materia de impacto ambiental, y en su último párrafo se indica, además, que el reglamento de la presente Ley establece una clasificación de las obras o actividades a que se refiere este artículo, a fin de exentar del requisito de autorización previa a las que por su ubicación, dimensiones o características no produzcan impactos ambientales significativos.

Para el caso de obras o actividades que requieran de autorización previa de impacto ambiental, el artículo 29 establece que los interesados deben presentar a la SEMARNAP una manifestación de impacto ambiental y, a diferencia de la Ley actual, agrega en un segundo párrafo: cuando se trate de actividades consideradas altamente riesgosas en los términos de la presente ley, la manifestación deberá incluir el estudio de riesgo correspondiente.

Adicionalmente, en el artículo 32 la nueva LGEEPA, se establece un requisito no previsto en la legislación actual cuando señala que, tratándose de las obras previstas en las fracciones IV, VIII, IX y XI del artículo 28, la Secretaría sólo admitirá las solicitudes para la realización de obras o actividades que cuenten con una constancia de las autoridades locales correspondientes, en la que se manifieste su aceptación para la ejecución de la obra o actividad, y aclara en un segundo párrafo que la autorización que expida la Secretaría no obligará en forma alguna a las autoridades locales para expedir las autorizaciones que les corresponda en el ámbito de sus respectivas competencias.

En síntesis, dentro del nuevo contexto legal propuesto, la realización de obras o actividades que se consideren altamente riesgosas quedará sujeta a una serie más compleja de trámites, en comparación con los establecidos actualmente, pero al mismo tiempo más claramente definidos, pues ahora sabemos que es sólo en esos casos cuando se deben realizar estudios de riesgo, aunque no se indican los mecanismos a seguir para la obtención de la constancia de aceptación que deberán expedir las autoridades locales.

Más adelante, en el capítulo IV Actividades Consideradas como Altamente Riesgosas, correspondiente al Título IV Protección al Ambiente, la propuesta de reformas a la LGEEPA plantea modificaciones para los cuatro artículos que lo integran. Por tratarse de un capítulo dedicado al tipo de actividades que nos interesan en este caso, se exponen a continuación los textos íntegros propuestos para cada artículo, seguidos de un comentario concreto acerca de la naturaleza de las modificaciones propuestas con respecto al texto vigente y sus implicaciones prácticas.

*ARTÍCULO 146.- La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que regulen las actividades que deban considerarse altamente riesgosas, para efecto de lo establecido en la presente Ley.
Asimismo, en dichas normas oficiales mexicanas se podrán señalar las actividades riesgosa que deberán ser reguladas y controladas por los gobiernos locales.*

La novedad en el artículo 146 estriba en que se habla de normas oficiales mexicanas, en lugar de listados de actividades altamente riesgosas, como los publicados para los casos de sustancias tóxicas, flamables y explosivas, los cuales deberán publicarse en forma de normas oficiales mexicanas, al igual que las correspondientes para sustancias corrosivas, reactivas, radioactivas y de acción biológica que pueden afectar al ambiente, la población o a sus bienes. Sin embargo, es probable que el concepto de actividad altamente riesgosa, como se maneja en los listados actuales, no sea modificado.

ARTÍCULO 147.- *La realización de actividades industriales, comerciales o de servicios altamente riesgosas, se llevarán a cabo con apego a lo dispuesto por esta Ley, las disposiciones reglamentarias que de ella emanen y las normas oficiales mexicanas a que se refiere el artículo anterior. Para tal fin, en aquellos establecimientos en los que se realicen actividades consideradas altamente riesgosas, deberán incorporarse los equipos e instalaciones que correspondan con arreglo a lo dispuesto en las propias normas oficiales mexicanas que se expidan.*

Quienes realicen actividades altamente riesgosas, elaborarán, actualizarán y, en los términos del Reglamento correspondiente, someterán a la aprobación de la Secretaría y de las Secretarías de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos.

Cuando las actividades consideradas altamente riesgosas se realicen o vayan a realizarse en el Distrito Federal, el Gobierno del Distrito Federal participará en el análisis y, en su caso, dará la aprobación de los programas de prevención correspondientes.

En este caso, sólo se actualizan los nombres de las Secretarías señaladas en el artículo 147 de la Ley vigente, las cuales integran a su vez el COAAPPA, dejando fuera de la lista una vez más a Secretaría de Gobernación.

ARTÍCULO 148.- *Cuando para garantizar la seguridad de los vecinos de una industria, que lleve a cabo actividades altamente riesgosas, será necesario establecer una zona intermedia de salvaguarda, el Gobierno Federal podrá, mediante declaratoria, establecer restricciones a las acciones que impliquen riesgos para la población. La Secretaría promoverá ante las autoridades locales competentes, que los planes de desarrollo urbano establezcan las restricciones que correspondan en la asignación de los usos y destinos de áreas y predios.*

En lo referente a las actividades altamente riesgosas, este es el artículo con mayor trascendencia de la propuesta de reformas a la LGEEPA, ya que el establecimiento de restricciones a las acciones que impliquen riesgos para la población vecina, de establecimientos donde se desarrollan actividades altamente riesgosas, ha permanecido como un vacío urgente de resolver.

De todos es conocida la facilidad y rapidez con que se establecen sin control actividades incompatibles en áreas aledañas a los predios donde se desarrollan actividades altamente riesgosas (actividades comerciales, de servicios o asentamientos permanentes de población), incrementando los tipos de implicaciones y niveles de daño en caso de un siniestro, sin que los responsables de las actividades altamente riesgosas puedan intervenir.

Con la entrada en vigor de esta reforma y sobre todo con la puesta en práctica de lo establecido en ella, se puede esperar una baja considerable en los niveles de afectación probable sin necesidad de modificar procesos, bajar volúmenes de sustancias peligrosas en planta o incrementar la dimensión de los predios donde se desarrollen actividades altamente riesgosas.

ARTICULO 149.- Las entidades federativas, el Distrito Federal y los municipios regularán la realización de actividades que no sean consideradas altamente riesgosas, cuando éstas afecten al equilibrio de los ecosistemas o al ambiente dentro de la circunscripción territorial correspondiente, de conformidad con las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables.

En esta materia, la legislación local definirá la distribución de competencias entre el gobierno estatal y los de los municipios, así como las bases de la coordinación entre ambos y con la federación.

En esencia, el artículo 149 que se propone en las reformas a la LGEEPA, reproduce lo establecido en los artículos 148 y 149 de la ley vigente.

10. APLICACIONES

10.1 Reducción de costos con explosivos a granel

Como se mencionó anteriormente, el diseño de voladuras con sistemas a granel es el mismo que para voladuras a cielo abierto, la diferencia de un banco normal es el incremento en 30% de las plantillas de barrenación, aumentando así el volumen con menos barrenos, el explosivo queda bien confinado, no existen huecos o espacios entre las paredes del barreno y el explosivo.

Dentro de la reducción de costos se debe considerar todos los gastos, directos e indirectos se tienen durante la operación de una voladura:

-Reducción de costos del explosivo (más barato).

- Reducción de costos en barrenación:

- a) Brocas
- b) Barras
- c) Coples
- d) Horas máquina
- e) Diesel, etc.

- Reducción de costos en equipo de carga y acarreo:

- a) Acero de desgaste, casquillos, y protectores
- b) Incremento de la velocidad de rezagado

En esta parte sólo analizaremos la reducción de costos que implican la barrenación y los explosivos, que son los que se reflejan de inmediato. Primero, en la Tabla 10.1, analizaremos un ejemplo de cuando utilizamos cartucho y sistema a granel en condiciones secas o de poca humedad. Posteriormente, analizaremos otro ejemplo donde existe agua y no se puede abatir el nivel, siendo necesario cargar sólo alto explosivo (Tabla 10.2).

BARRENO		18.00	16.00
BORDO	m	8.53	9.14
ESPACIAMIENTO	m	9.75	11.58
AREA	m ²	83.17	112.90
ALTURA DE BANCO	m	14.00	14.00
PROF DE BARRENO	m	16.25	16.25
DIAMETRO BARRENO	pulg	12.25	12.25
DENSIDAD DE ROCA	ton/m ³	2.70	2.70
VOLUMEN	m ³	20 958.21	23 708.43
TONELAJE	ton.	56 587.17	64 012.76
TACO	mt	6.50	7.50
COLUMNA EXPLOSIVA	mt	9.75	8.75
RELACION (AE/BE)	%	10/90	20/80
ALTO EXPLOSIVO			
DENSIDAD	GR/CC	1.18	1.10
COLUMNA (TABLA)	KG/mt	89.70	83.63
COSTO	\$/KG	9.58	3.54
PESO TOTAL	KG	1 574.23	11 708.20
	KG	11 782.50	11 708.20
	\$/mt	52.00	52.00
	\$/mt TOT	15 210.00	13 520.00
	\$/m ² TUMB	0.73	0.57
	\$/TON TUMB	0.90	0.85
	\$TOTAL BNO	50 912.29	41 447.03
	\$TOTAL m ²	2.43	1.73
	\$/TON TUMB	0.90	0.64
	\$/m ²	3.15	2.32
	\$/TON	1.17	0.85

Tabla 10.1 Reducción de costos con cartucho y sistema a granel en condiciones secas o de poca humedad.

NIVEL DE AGUA TOTALMENTE INUNDADO

NO BARRENO		18.00	16.00	18.00	16.00
BORDO	MT	8.53	9.14	8.53	9.14
ESPACIAMIENTO	MT	9.75	11.58	9.75	11.58
AREA	MT2	83.17	112.90	83.17	112.90
ALTURA DE BANCO	MT	14.00	14.00	14.00	14.00
PROF DE BARRENO	MT	16.25	16.25	16.25	16.25
DIAMETRO BARRENO	PULG	12.25	12.25	12.25	12.25
ALTURA NIV AGUA	MT	3.18	3.18	16.25	16.25
DENSIDAD DE ROCA	TON/M3	2.70	2.70	2.70	2.70
VOLUMEN	M3	20 958.21	23 708.43	20 958.21	23 708.43
TONELAJE	TON	56 587.17	64 012.76	56 587.17	64 012.76
TACO	MT	6.50	7.50	6.50	7.50
COLUMNA EXPLOSIVA	MT	9.75	8.75	9.75	8.75
RELACION (AE/BE)	%		(70/30 < 20/80)	100/0	70/30
DIAMETRO BOLSA GAS	PULG	12.50	12.50	12.50	12.50
ALTO EXPLOSIVO					
DENSIDAD (TABLA)	GR/CC	1.18	(1.32) (1.1)	1.18	1.32
COLUMNA (TABLA)	KG/MT	89.70	100.36, 83.63	89.70	100.36
COSTO	\$/KG	9.58	5.84, 3.54	9.58	5.84
PESO REV NIV AGUA		5 134.42	5 744.61		
PESO ARRIBA AGUA		112.50	(11 790.3)		
	KG	5 246.92	13 647.60	15 742.35	14 050.40
AGENTE EXPLOSIVO					
DENSIDAD	GR/CC	0.85			
COLUMNA (TABLA)	KG/MT	64.63			
COSTO		3.51			
PESO		7 189.44			
CARGA TOTAL					
		12 436.36	13 647.60	15 050.00	14 050.40
PERFORACION					
	\$/MT	52.00	52.00	52.00	52.00
	\$/MT TOT	15 210.00	13 520.00	15 210.00	13 520.00
	\$/M ² TUMB	0.73	0.57	0.73	0.57
	\$/TON TUMB	0.27	0.21	0.27	0.21
EXPLOSIVO					
	\$TOTAL BARR	75 500.43	61 524.90	150 811.71	82 054.33
	\$TOTAL/M3	3.60	2.60	7.19	3.46
	\$/TON TUMB	1.33	0.96	2.66	1.28
COSTO TOTAL					
	\$/M3	4.33	3.17	7.92	4.06
	\$/TON	1.60	1.17	2.93	1.48

Tabla 10.2 Reduccion de costos con cartucho y sistema a granel cuando existe agua.

10.2. Efectos y respuestas en el entorno

10.2.1 Efectos de las voladuras en el medio ambiente y su control caso práctico

Carretera Chamapa-Lechería Ramal 39/43

El caso que a continuación se expone, muestra que en el ámbito de los explosivos, los retos por más difíciles que se presenten, si se enfrentan con decisión y profesionalismo pueden superarse de una manera eficiente, salvaguardando siempre la integridad del entorno y de sus habitantes.

La Ciudad de México, considerada la más grande del mundo, demanda para su adecuada comunicación y funcionamiento, vialidades eficientes que desahoguen el intenso tráfico de vehículos que por ella circulan diariamente; el parque vehicular estimado es de aproximadamente 3 millones de unidades.

La construcción de la carretera "Chamapa-Lechería" tuvo como objetivo principal, el desahogar a la ciudad del intenso tráfico vehicular que se presenta en la entrada a la ciudad de México, en su parte norte (carretera México-Querétaro).

En la ejecución de este proyecto, en el tramo conocido como ramal 39/43, se contemplaba la excavación de aproximadamente 60 000 m³ de roca basáltica, en un principio, para lograr tal fin, se utilizó equipo de remoción y acarreo para retirar el material sobrepuesto y algo de la formación sólida, hasta que se llegó a la zona donde la roca era muy dura resistente y compacta. Ante esta situación, dada la baja productividad del equipo, por el excesivo desgaste, pero principalmente por el tiempo que se prolongaría la ejecución de dicho corte, se determinó que el uso de explosivos sería imprescindible.

Una vez tomada la determinación para usar los explosivos, la empresa Tribasa consciente del gran reto, que representaba la realización de la obra, decidió contratar a la compañía Dupont, para que ésta brindará toda la asesoría técnica requerida durante el trabajo; la decisión se tomó basándose en las experiencias de trabajos anteriores para las carreteras México-Acapulco, México-Oaxaca, México-Guadalajara, etc., en donde se tuvieron que hacer voladuras controladas con el fin de no afectar casas habitación y estructuras que se encontraban cercanas al trazo mismo de la carretera.

Para la ejecución de los trabajos se procedió a planificar y analizar todos los métodos de seguridad que se implementarían para llevar a cabo las voladuras en el lugar de la excavación, ya que existían muchos puntos de alto riesgo como :

- * La presencia de la carreteras México-Querétaro a una distancia de 100 m de la voladura.
- * El fraccionamiento "La Quebrada" distante a unos 120 m.
- * Cables de alta tensión a una distancia de 200 m.
- * El nuevo tramo carretero ya con carpeta estaba a 250 m.
- * Un puente vehicular a una distancia de 500 m del punto de la voladura.

Algunas medidas de seguridad que se implementaron fueron:

1. Para evitar el vuelo de rocas y los niveles altos de vibración.

- Diseño del bordo apropiado; porque si es corto o reducido genera roca en vuelo y golpe de aire, y excesivo produce roca en vuelo hacia atrás de la voladura y un nivel de vibraciones alto.
- Diseño de un taco con longitud adecuada.
- Determinación del material de taco a usar.
- Analizar el desplazamiento de la roca, haciendo simulaciones en computadora.
- Simulación en computadora de los tiempos de salida de cada uno de los barrenos.
- Realización de un estudio para asegurar que no existían corrientes erráticas en el lugar de excavación.
- Utilización de la máquina explosora "Secuencial Timer" para dar mayor versatilidad a los tiempos de salida de los barrenos y así evitar el "traslape" entre algunos barrenos.
- Utilización de malla ciclónica en la parte superior y cara libre del banco.
- Utilización de bandas y llantas en la parte superior del banco.
- Predicción de niveles de vibración por fórmula para tal efecto.
- Utilización de varios sismógrafos para medir los niveles de vibración y golpe de aire.
- Grabación en video de todas y cada una de las voladuras para su análisis y evidencia.

2. Medidas generales de seguridad.

- Acordonamiento del área de la voladura.
- Aviso de voladura por medio de sirena y aviso en las comunidades vecinas.
- Establecimiento de un horario para el disparo de las voladuras.
- Pláticas de seguridad a las comunidades vecinas, etc.

El tiempo utilizado para realizar la excavación del cajón fue de 3 meses (de marzo a mayo de 1994), y durante este tiempo, todas y cada una de las voladuras fueron auditadas por las siguientes agrupaciones y dependencias:

- a) Protección Civil del Municipio de Cuautitlán Izcalli.
- b) Comisión de Representantes del Fraccionamiento "La Quebrada".
- c) Empresa Especializada en Sismología.

La prioridad principal, para la ejecución de la obra, fue la seguridad, aunque se tuvieran que sacrificar otros factores como la fragmentación y el desplazamiento, como consecuencia de esto, hubo que incrementar la utilización del equipo de remoción y acarreo, era evidente que el tiempo para realizar la excavación se extendería por mucho más de tres meses y por esto, los costos de operación aumentarían.

Durante las primeras 5 voladuras se tuvieron resultados satisfactorios, ya que a pesar de que la fragmentación era gruesa, el equipo utilizado (tractores y cargadores) podían remover y trasladar la rezaga, los niveles de vibración y golpe de aire estaban por debajo de los límites de seguridad, el vuelo de rocas fue totalmente nulo, pero lo más importante fue que se pudo analizar la geología del lugar y observar el comportamiento de la roca con los parámetros de voladura hasta ese momento utilizados.

A partir de ese momento se procedió a optimizar los parámetros de voladura, de tal manera que las siguientes voladuras arrojaron resultados excelentes, puesto que no sólo se obtuvo mejor fragmentación y mejor apilamiento de la rezaga, sino que los niveles de vibración y golpe de aire seguían muy por debajo de los límites de seguridad, el vuelo de rocas seguía siendo nulo y se incrementó considerablemente la eficiencia del equipo de remoción y acarreo.

Consideramos que el éxito de esta operación consistió en los siguientes factores:

1. Estudio previo de cada una de las voladuras a realizar tomando en cuenta lo siguiente:

- a) Análisis de la geología que presentaba el banco de explotación.
- b) Simulación en computadora del comportamiento de la roca en su desplazamiento.
- c) Simulación en computadora de los tiempos de salida de cada barreno.
- d) Diseño de los parámetros de voladura de acuerdo a las condiciones que presentaba cada nuevo banco.

2.- Disciplina operativa

3.- Trabajo en equipo

4.- Estricto apego a las normas de seguridad

5.- Personal con alto nivel de conocimiento y experiencia

6.- Empresas con sentido de responsabilidad y profesionalismo.

10.3. Explosivos a granel futuro inmediato

El sistema Bulk (Explosivo a Granel) se ha utilizado en países altamente industrializados desde hace más de 30 años en el caso de anfo y de más de 15 años en el caso del heavy anfo. Este sistema fue creado para ayudar a los usuarios de productos explosivos a optimizar los costos de sus operaciones de voladura, mediante eficiencia y automatización.

En el manejo de grandes volúmenes como el sistema Bulk, permite obtener ahorros substanciales en los costos finales de una operación minera, o de construcción.

La mezcla de emulsiones con el anfo convencional en sus diferentes porcentajes, ha permitido la obtención de productos de mayor densidad, resistencia a la humedad y contenido de energía en las diferentes formulaciones explosivas, por lo que se ha podido aplicar en lugares donde la existencia de agua en los barrenos no permite el uso del anfo común y corriente, ha permitido también la expansión de los patrones de perforación al tener una

mayor cantidad de energía concentrada en los barrenos, lo que repercute en menor requerimiento y mayor disponibilidad de los equipos de perforación, así como mayor tiempo de vida y menor tiempo en la carga de voladuras y ahorro considerable de tiempo en la carga de explosivos a los barrenos.

Este sistema que ya se está utilizando en otros países, pronto vendrá a revolucionar el uso de los explosivos en nuestro país. Esto es muy importante para México, sobre todo ahora que las operaciones deben ser competitivas a nivel internacional en una economía de libre comercio; donde la optimización y la eficiencia de los costos de operación y la calidad de los productos son indispensables.

Explosivos

Antes de abordar el tema de los productos a granel, debemos involucrarnos un poco más en los detalles de sus propios componentes, iniciando desde la definición de explosivos.

¿Qué es un explosivo?

Un explosivo se puede definir como la mezcla de sólidos y líquidos, que al ser iniciados dan como resultados una ignición violenta (Explosión), generando un gran volumen de gases.

Todos los explosivos tienen características individuales, cada una de ellas es muy importante y requieren ser evaluadas para determinar el potencial de un explosivo, de acuerdo a su naturaleza y destino.

División de los explosivos

Los explosivos generalmente se dividen en dos tipos :

- a) Agentes explosivos
- b) Altos explosivos

Agentes explosivos : (Anfo)

El explosivo más utilizado en todo el mundo es el anfo y en México no es la excepción. Si no fuera por la falta de resistencia al agua, el anfo acapararía virtualmente el total del mercado de los explosivos.

Anfo :

Es un producto explosivo formado por la mezcla de Nitrato de Amonio y diesel en una relación de 94,3% de Nitrato de Amonio y 5,7% de diesel Figura 10.1

Anfo es la abreviación de las siglas en Inglés *Ammonium Nitrate and Fuel Oil*.

El uso del anfo se ha generalizado debido a su costo y a su alto contenido de energía. Actualmente todos los explosivos que existen en el mercado industrial son comparados contra un anfo de características ideales, como son una densidad de $0,84 \text{ g/cm}^3$ y una excelente absorción de diesel.

Las características más importantes usadas como valor comparativo de referencia son el ASV (Valor de la fuerza absoluta), que en este caso es de 377 KJ/100 gr. RWS (Potencia relativa al peso) que es 100 y RBS (Potencia relativa 1 volumen) que también tiene un valor de 100 por ser los dos puntos de referencia importantes.

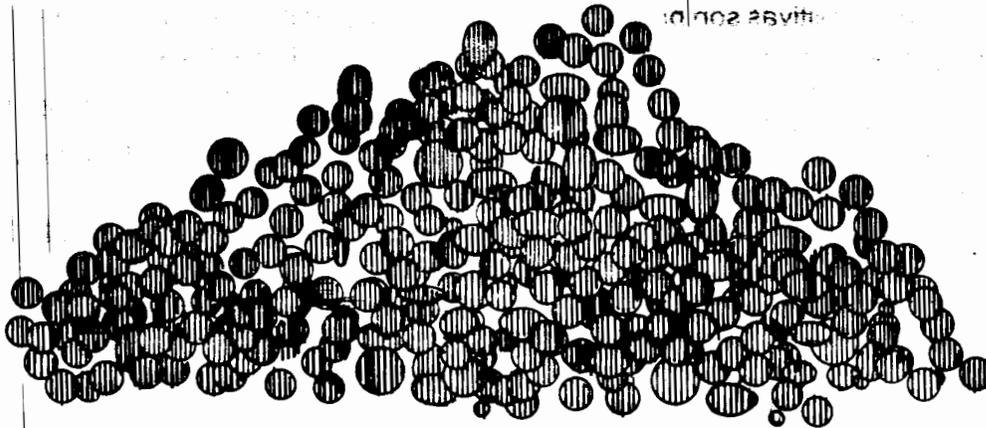


Figura 10.1 Anfo Bulk (a granel)

ANFO PROPIEDADES FÍSICAS :

Densidad	=	0,84 g/cm ³ a granel y 0,95 g/cm ³ cargado neumáticamente (80 a 90 PSI)
Gases	=	Clase 2
Energía disponible	RWS =	100
	RBS =	100
	ASV =	377 (KJ /100 gr)
VOD (teóricamente, al aire libre en tubo de acero cédula 40 de 5,08 cm de diámetro).	=	2400 m/s
Sensitividad	=	No es sensitivo a la cápsula 6
Resistencia al agua	=	Nula

Alto explosivo (Emulsiones)

Este es el nuevo concepto de la fabricación de los productos explosivos, es el producto más reciente desarrollado dentro de la tecnología de los explosivos comerciales; con la introducción de las emulsiones en la minería, sucedió lo contrario a lo que aconteció cuando se introdujeron otros productos, ya que estos se adoptaron rápidamente.

Las emulsiones han disfrutado de una aceptación mundial dentro de un período de tiempo relativamente corto, debido a sus características y al eficiente desempeño en el campo.

Las emulsiones tienen un número de características poco usuales, su interacción íntima de combustible-oxidante produce detonaciones de muy alta velocidad.

Emulsión sensitiva

Las emulsiones sensitivas son preparadas en forma de mezcla de agua en aceite en la que existen dos fases presentes, una externa y otra interna; esto es análogo a la mezcla de agua y aceite.

Ambas fases están separadas, pero con una agitación apropiada y emulsificante un líquido puede ser disperso en otro formando una emulsión.

La fase interna está compuesta de una solución de sales oxidantes suspendidas, rodeadas por la fase de combustible externa, hasta este momento el producto no es sensitivo a los iniciadores convencionales como son la cápsula 6, estopines eléctricos, iniciadores no eléctricos de retardo o cordones detonantes.

La emulsión es estabilizada contra la separación de líquido por un agente emulsificante.

Este emulsificante es la clave para la calidad de muchas propiedades físicas y químicas de la emulsión.

El emulsificante actúa como puente entre el oxidante y el combustible, siendo un lado compatible con el oxidante y el otro con el combustible.

Para lograr la dispersión de la fase oxidante dentro de las gotas suspendidas en la fase combustible, es necesario el uso de mezcladoras especiales.

La emulsión es un nuevo concepto en la fabricación de explosivos y es el más reciente desarrollo de los explosivos comerciales.

La emulsión explosiva así formada es sensitivizada por aire, el cual puede ser agregado por medio de microesferas que además funcionan como un agente de densidad, estas microesferas pueden ser de vidrio con diferentes resistencias a la compresión (Figura 10.2)

Otro sistema para agregar el aire es mediante una reacción química a través de un proceso mecánico (Gassing).

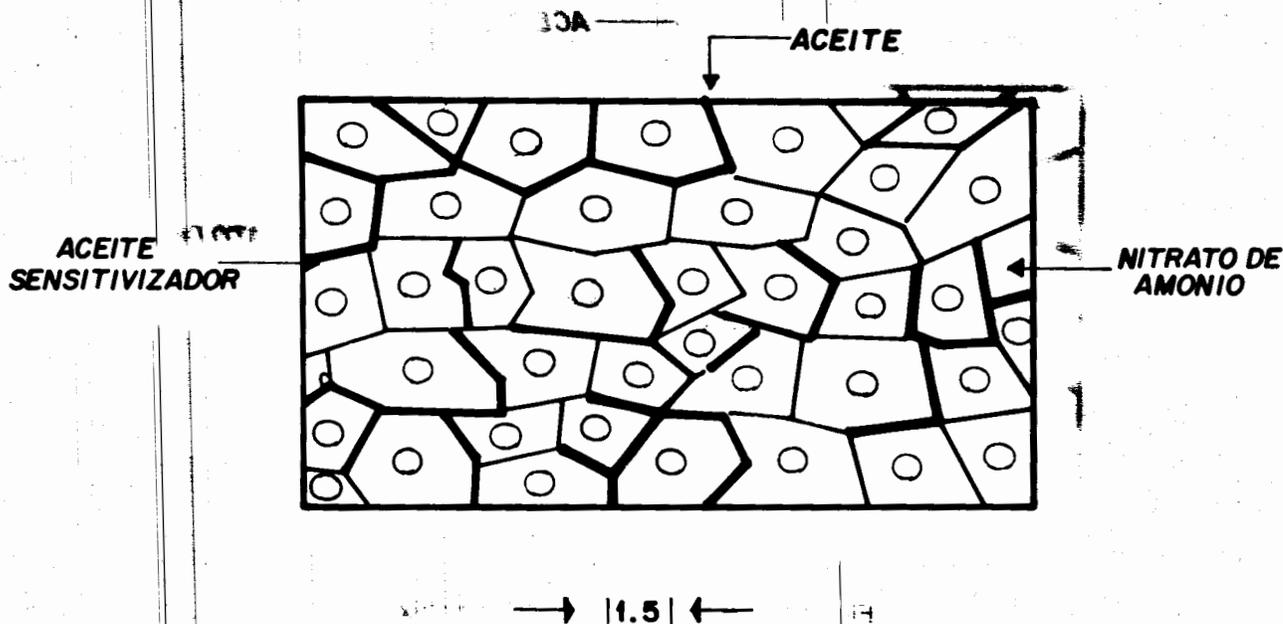


Figura 10.2 Esquema de emulsión sensible.

Propiedades físicas de la emulsión

Densidad	=	120 g/cm ³
Gases	=	Clase 1
Energía disponible	RWS =	81
	RBS =	120
VOD	=	5,000 m/s (Teóricamente al aire libre en diámetro de
5,06 cm)		
Sensitividad	=	Cápsula 6
Resistencia al agua	=	Excelente

Emulsión sensible (Matrix)

Las emulsiones no sensitivas (Matrix) son preparadas en la forma de agua en aceite, en la que existen 2 fases presentes, una interna y otra externa; ésto es análogo a la mezcla de agua y aceite.

Ambas fases se mantienen separadas, pero con una agitación apropiada y emulsificante un liquido puede dispersarse en otro formando una emulsión. La fase interna está compuesta de una solución de sales oxidantes suspendidas como finas gotas microscópicas, las cuales están rodeadas por la fase combustible externa (Figura 10.3).

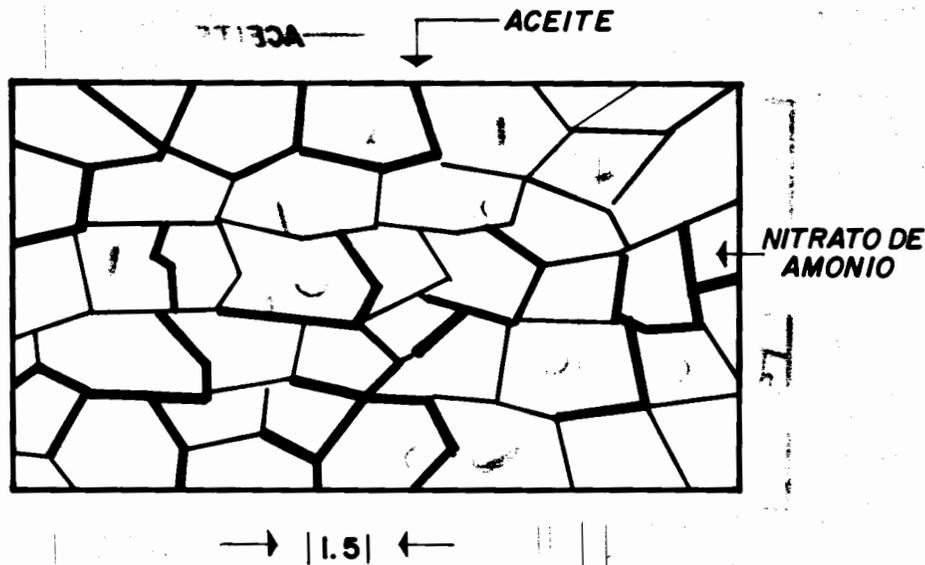


Figura 10.3 Esquema de emulsión matrix

Al igual que en el caso de las emulsiones sensitivas, hasta el momento, este producto no es sensitivo a los iniciadores convencionales.

La emulsión es estabilizada contra separación de líquidos por un agente emulsificante. ¶

El emulsificante es la clave para obtener la calidad y muchas de las propiedades físicas y químicas de la emulsión.

El emulsificante actúa como puente entre el oxidante y el combustible, siendo un lado compatible con el oxidante y el otro lado compatible con el combustible.

Para apoyar la dispersión de la fase oxidante dentro de las gotas suspendidas en la fase combustible, es necesario el uso de mezcladores especiales.

La emulsión es un nuevo concepto en la fabricación de explosivos y es el más reciente desarrollo de los explosivos comerciales.

Matrix propiedades físicas

Densidad	=	1,35 g/cm ³
Gases	=	Clase 1
Energía disponible	RWS =	87
	RBS =	135
VOD	=	Superior a 5,000 m/s (Teóricamente al aire libre)
Sensitividad	=	No es sensitivo a la cápsula 6 e iniciadores convencionales
Resistencia al agua	=	Excelente.

¿Qué es el sistema bulk?

ES EL MANEJO DE PRODUCTOS A GRANEL

Tradicionalmente los explosivos tipo Bulk son utilizados cuando se requiere manejar grandes cantidades de explosivos, disminuir los costos finales de voladura (Incluyendo perforación y explosivo) o cuando requerimos aumentar la productividad.

Variables del sistema bulk (Productos a granel)

En general podemos dividir el sistema Bulk en cuatro variables, relacionadas con los diferentes materiales explosivos a manejar, así como las diversas mezclas que podrán ser cargados a los barrenos por gravedad o por bombeo, dependiendo del diámetro de los barrenos y de las condiciones de humedad.

Las cuatro variables del sistema son :

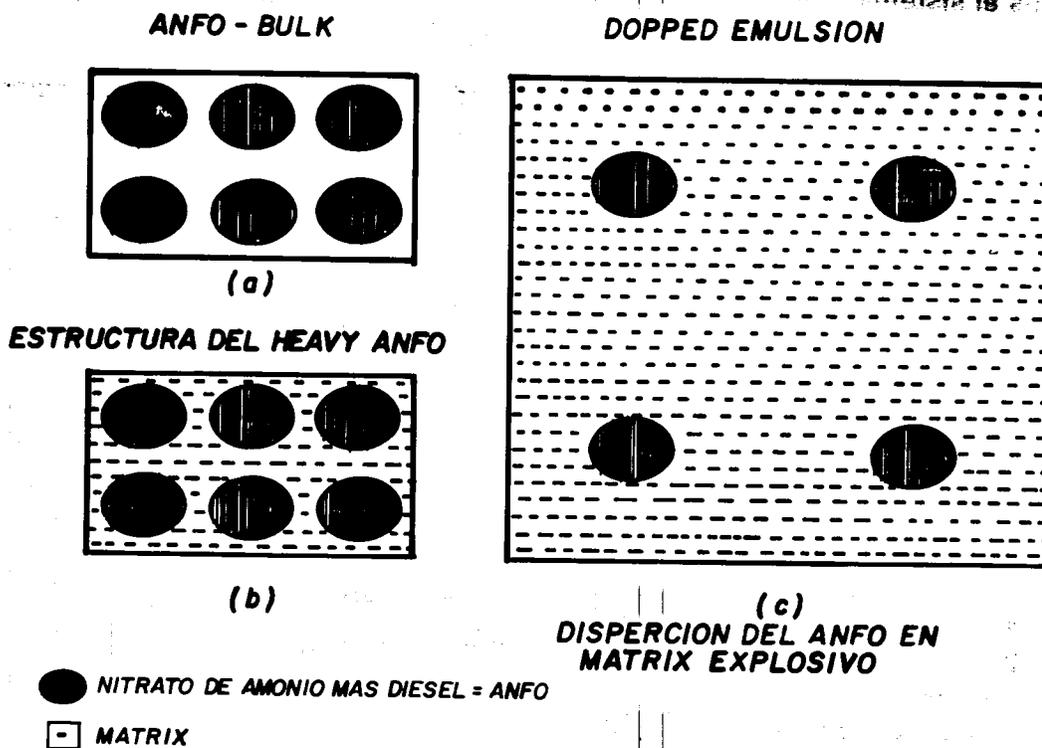
- 1.- Anfo Bulk
- 2.- Emulsión bombeable
- 3.- Heavy anfo (anfo pesado)
- 4.- Dopped emulsión

1) Anfo bulk

La mezcla de nitrato de amonio más diesel (Figura 10.4) a producto a granel, algunas compañías mineras de México lo utilizan desde hace más de 15 años: SICARTSA, Peña Colorada, MICARE, HYLISA, Mexicana de Cobre, Real de Angeles, etc., no así en operaciones de construcción, donde algunas por su tamaño y magnitud lo ameritan.

Todas las características físicas y químicas del anfo-bulk y del anfo empacado son iguales: clases de gases, resistencia al agua, sensibilidad, confinamiento, densidad, velocidad de detonación, RWS, RBS, requerimiento de un cebo (alto explosivo) para ser iniciado en su detonación, etc.

La única diferencia de estos productos es que el anfo-bulk es fabricado en el sitio y el Anfo empacado es fabricado en las instalaciones de las compañías proveedoras de explosivos.



10.4 Estructuras del anfo-bulk, heavy anfo y dopped emulsión.

2) Emulsión bombeable (Emulsión 100%)

Es una emulsión no sensitiva compuesta por una mezcla de oxidantes combustibles y un emulsificante.

Se mencionó anteriormente este sistema en el tema emulsión no-sensitiva (Matrix).

3) Heavy anfo

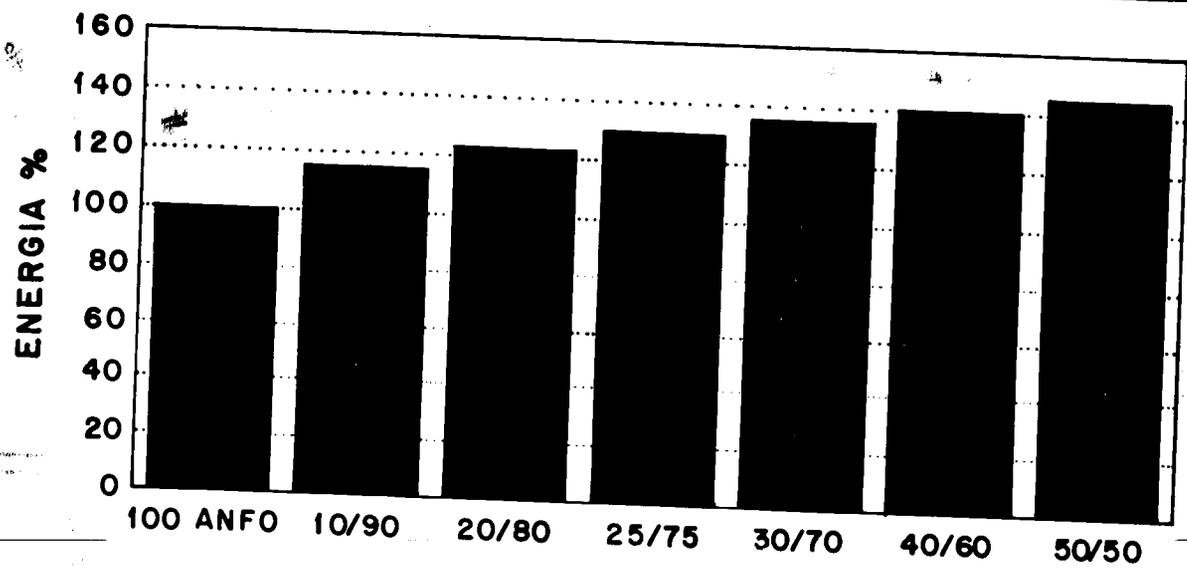
Es una mezcla de nitrato de amonio (a granel) más diesel, más Matrix en relaciones menores al 50:50 % (Matrix:Anfo), figuras 10.4b, 10.5 y 10.6.

Relaciones:

	Matrix -	Anfo
De	10% -	90%
Hasta	50% -	50%

ANFO PESADO (HEAVY ANFO)

PRODUCTOS EN DIFERENTES MEZCLAS



■ MEZCLA MATRIX / ANFO

Figura 10.5

DIFERENCIA FISICA ENTRE ANFO Y MATRIX/ANFO

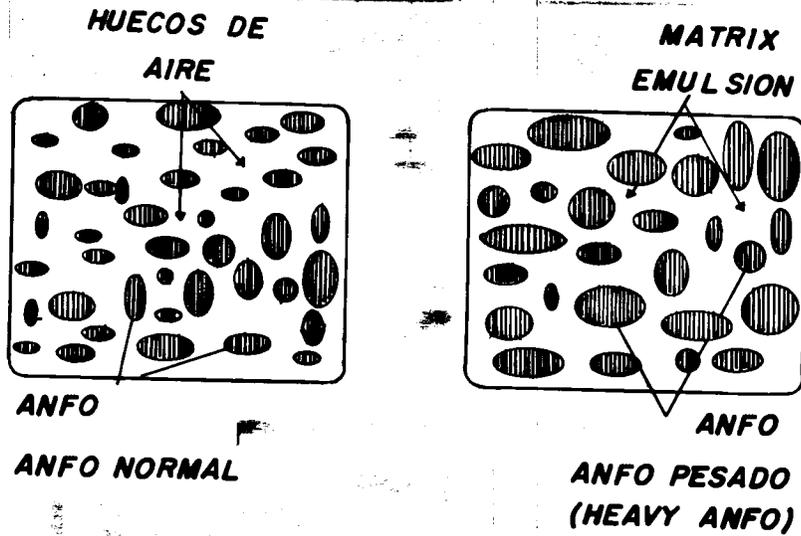


Figura 10.6

RWS (POTENCIA RELATIVA AL PESO)

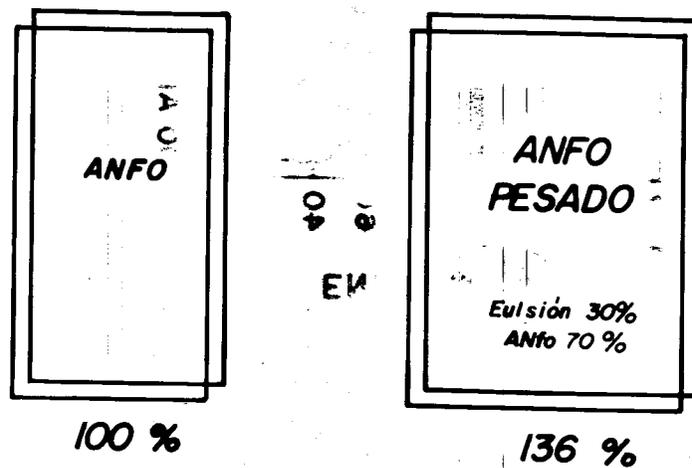


Figura 10.7

ANFO Y EMULSION

Este sistema es aplicable en operaciones con barrenos secos.

Este producto (Heavy y Anfo) para ser iniciado requiere de un iniciador de alta presión de detonación.

En operaciones donde hay agua se requiere bombearla y posteriormente cargar los barrenos con este producto.

4) Dopped emulsión

Es la mezcla de Matrix más anfo a granel en relaciones mayores de 60:40 % (Matrix:Anfo).
Figura 10.4c.

Relaciones:

	Matrix -	Anfo
De	60%	40%
Hasta	90%	10%

Es el sistema aplicable en operaciones con barrenos húmedos o con agua, donde no se desee no se pueda bombear, o no se cuente con el equipo apropiado.

En esta variable del sistema se requiere agregar el agente sensibilizador en la mezcla Matrix-Anfo en el momento de cargar los barrenos.

Este producto (Dopped Emulsión) para ser iniciado requiere de un iniciador de alta presión.

Las diferencias de estas variables del sistema se podrían resumir en que una vez logradas las mezclas Anfo-Bulk y Matrix en los porcentajes mencionados anteriormente, los productos tipo Bulk tienen velocidades de detonación alrededor de 5000 m/s y las velocidades de cargado en los barrenos (Por ser automatizados) son desde 350 a 750 kg/min, en equipo para grandes operaciones.

(Casos Heavy Anfo y Dopped Emulsión)

Haciéndose una reconsideración, el Sistema Bulk se puede resumir en tres tipos :

- a) Productos No-Bombeables.
- b) Productos Bombeables.
- c) Combinación de ambos.

¿Dónde y cuándo se puede utilizar este sistema?

En cualquier tipo o tamaño de operación, donde los volúmenes de consumo lo justifiquen, tomando en cuenta los diámetros de perforación, volumen de roca a mover por día, distancia de la obra a los depósitos de almacenamiento, etc.

El tamaño de los equipos e instalaciones requeridos dependerá por supuesto del tamaño y las características de la propia operación.

Sin embargo, podemos decir que se podrán adaptar a casi todas las operaciones medianas y grandes, tanto de la industria de la construcción a cielo abierto como apertura de túneles, en las canteras o pedreras, minería a cielo abierto y minería subterránea.

Existe una gran versatilidad en el tipo de equipo que permiten el acceso a todo tipo de lugares y que garantizan el suministro de los productos explosivos.

Algunos equipos para el suministro de producto a granel son:

- Anfo - A través de gusanos helicoidales
- Camión Bombeador - Gel Master, SBR
- Camión Mezclador - Gusanos helicoidales
- Camión Mezclador - Con equipo de bombeo (Gelmaster, Blendmaster, Triplex)
- Aplicaciones especiales - Cabra (Bombeo), Oso (Bombeo)

Instalaciones y equipo en sitio (En la operación).

Las instalaciones y el equipo requerido para operaciones que utilizan el sistema Bulk consisten de :

- a) Silo(s) de Nitrato de Amonio (Almacén)
- b) Depósito(s) de diesel.
- c) Camiones tanque (Pipas) para transportar Matrix de planta a operación.
- d) Depósito(s) para almacenamiento de Matrix (Bulk).
- e) Camiones para trasladar y mezclar Matrix-Nitrato de Amonio-Diesel (Bulk).
- f) Garage(s) para mantenimiento de camiones.
- g) Oficinas.

Como ya se comentó anteriormente el equipo e instalaciones son tan grandes como la propia operación lo requiera.

Secuencia lógica del manejo de la matrix en su transportación, almacenamiento y uso final en la carga de barrenos

- 1.- Una vez fabricada en la planta de Explosivos Mexicanos en Cuatrociénegas, Coah., el producto será transportado en pipas hasta los lugares donde se requiera, conservando sus características no explosivas.
- 2.- En el lugar el producto será vaciado de las pipas a los depósitos mediante el uso de bombas especiales, manteniendo el producto a una temperatura superior a los 30° C.
- 3.- Una vez que se tiene la emulsión en el depósito del sitio, el producto será cargado al camión mezclador a través del mismo sistema de bombeo.
- 4.- Después de cargar la emulsión en el compartimiento especial del camión mezclador, la siguiente operación consiste en cargar el nitrato de amonio y diesel de los depósitos correspondientes.

En el caso de usar solamente emulsión la operación es mucho más rápida y sencilla.

- 5.- Hasta este momento los materiales transportados en el camión no son sensitivos a la cápsula 6 ó iniciadores convencionales.
- 6.- Una vez cargadas las materias primas se transportarán en el camión hasta el lugar de la voladura, donde los barrenos serán cargados.
- 7.- En el sitio de la voladura se mezclarán los 3 materiales que transportó el camión, es decir:
Emulsión-Nitrato de Amonio-Diesel, obteniéndose en este momento un producto explosivo no sensitivo a la cápsula 6 e iniciadores convencionales.

Cuando se trata solamente de la emulsión, la sensibilidad se le da en el momento de cargar el producto al barreno.

- 8.- Para lograr la detonación del producto en la voladura, se requiere un iniciador de alta presión, el cual será colocado en el fondo del barreno o uno en el fondo y otro en la parte media del barreno, dependiendo de la operación y de la longitud de los barrenos.

Aplicación en campo:

Las proporciones de las mezclas Emulsión/Anfo pueden fácilmente cambiarse y ajustarse en el mismo momento de su carga en los barrenos, esto porque la mezcla se hace con un camión que puede ser regulado en el mismo lugar.

El anfo tiene las limitaciones que todos conocemos, como son su propiedad higroscópica y la falta de resistencia al agua; es decir se disuelve fácilmente al contacto con el agua, perdiendo sus características de detonación.

A pesar de lo anterior, el anfo es el agente explosivo más popular en las operaciones a cielo abierto, cuando los barrenos no presentan condiciones de humedad o cuando la cantidad de agua en los barrenos puede ser bombeada, para posteriormente introducir el anfo en bolsas de polietileno.

Por años se ha tratado de incrementar la energía y eficiencia del anfo, mezclándolo con diferentes ingredientes como aluminio y nitropropano; sin embargo, los resultados que se han encontrado no han sido aplicables en el campo.

Actualmente cuando se encuentra agua en los barrenos y no puede ser bombeada, normalmente se carga con explosivo resistente al agua, hasta cubrir esta parte del barreno y posteriormente se carga con un Anfo regular (sólo en caso del abatimiento del agua), esto desde luego podría hacerse de la misma forma usando una mezcla de anfo pesado (Heavy anfo) que sea resistente al agua (40/60 ó 30/70) y posteriormente cargar anfo a granel (Bulk).

Sin embargo, esto impide que se aprovechen al 100 % las ventajas de utilizar un anfo pesado (Heavy Anfo con un mayor RWS (potencia relativa al peso) que el Anfo normal, esto quiere decir que se conservaría el mismo patrón de perforación utilizando sólo la característica de resistencia al agua (Figura 10.7).

En algunas operaciones, por la dificultad que se presenta al mover grandes volúmenes de explosivos, puede ser más viable cargar los barrenos con una emulsión bombeada.

En general el sistema Bulk (Productos a granel) se puede adaptar a casi todas las operaciones de excavación, incluyendo las subterráneas en minería o a túneles de obras civiles, pedreras, cantera y minas a cielo abierto, y cortes de roca en la construcción de carreteras, etc.

Ventajas del sistema bulk

Las ventajas del uso de este sistema para los usuarios de explosivos son las siguientes:

- Mayor productividad
- Carga rápida
- Acoplamiento de los explosivos al barreno
- Mejor fragmentación
- Menor número de empleados requerido para la carga de explosivos.
- No se requieren inventarios por parte de la obra, mina o cantera.
- Control de la cantidad de carga de explosivos
- Control de Taco
- Posibilidad de entrega de más productos al barreno.
- Sistemas de control de carga disponible.
- Eliminación de manejo de cajas.
- Condiciones especiales.
- Etc.

Otros beneficios para el cliente usuario de productos a granel.

- Sistema BRAD (Revisión y desarrollo de negocios)
- Productos explosivos de acuerdo a sus necesidades específicas.
- Sistema de seguridad apegados a normas de alto nivel de seguridad.
- Sistema de entrega de alta tecnología
- Sistema de entrenamiento a usuarios.
- El costo por explosivo puede ser alto, pero se tienen que evaluar los costos y beneficios totales.

Conclusiones

1.- Productividad

La productividad de la operación se puede incrementar notablemente por la velocidad y facilidad de la carga de explosivo.

2.- Seguridad

La seguridad del manejo de explosivos a granel se lleva a cabo con los más altos estándares y normas.

3.- Inventarios

El costo por inventarios sería por parte del proveedor, la entrega es a tiempo y directamente al barreno.

4.- Fragmentación

Al lograr una carga uniforme y acoplada en los barrenos, los resultados de las voladuras son mejores que los de una voladura con producto empacado.

5.- Costos

Los costos totales por perforación y voladura, carga, acarreo y movimientos de roca con Buldozer podrán ser inferiores a los obtenidos con una voladura tradicional con producto empacado.

6.- Inversiones

Normalmente son por cuenta del proveedor.

7.- Personal

El personal especializado en voladuras lo proporciona el proveedor.

8.- Adaptable

Aplicación en todo tipo de operaciones.

10.4. La técnica de las voladuras controladas

Hoy en día las técnicas de voladuras controladas se han generalizado tanto en minería como en trabajos de obras públicas. La finalidad del precorte es en general la minimización tanto de la sobreexcavación inherente a cualquier voladura como de la facturación y el daño provocado por la acción del explosivo en la masa de roca remanente más allá de la línea del diseño de la excavación. En este subcapítulo se describen dichas técnicas en forma general y profundiza en la técnica del precorte por ser la más utilizada entre ellas.

Cuando se requiere controlar la sobre excavación en los cortes de roca, preservar las condiciones mecánicas de resistencia de los taludes, o de las paredes finales de la excavación, o donde por razones ambientales se pretenda dejar la excavación final con una estética predefinida, se utilizan técnicas diseñadas para controlar la voladura. A estas técnicas se les conoce como voladuras controladas.

Los resultados en el control de la excavación en roca dependen de las condiciones físicas específicas de la misma. Los estudios geológico y mecánico del área de la voladura, clasificando y definiendo los tipos de roca, su orientación y distribución de las discontinuidades, que permiten identificar los problemas y aplicar el mejor criterio para el diseño de los taludes, dándole capacidad a la roca para permanecer estable cuando se someta a la energía de las ondas de choque, causadas por las voladuras de producción.

Un área de excavación presentará muchas condiciones geológicas diferentes a otra, lo que hace muy difícil predecir los sistemas de discontinuidades, estructuras irregulares, orientación de las juntas, relleno y alteraciones. A pesar de existir condiciones geológicas desfavorables en la roca, que sin duda alguna afectan el mecanismo de control; se ha comprobado que la aplicación de la técnica de voladuras controladas es la forma más eficiente de preservar la resistencia natural de los taludes finales en las excavaciones.

Las técnicas de voladura controlada se utilizan con frecuencia en obras civiles tales como: carreteras, presas, canales, túneles, cimentaciones de edificios, etc.; en donde cubren generalmente los propósitos antes descritos.

En trabajos de minería a tajo abierto el uso de voladuras controladas añade un factor costo, ya que el papel de dichas voladuras esta relacionado a la capacidad de incrementar los ángulos de inclinación de los taludes finales, para reducir la razón de excavación general de la mina. Dado que la razón de excavación limita la geometría del tajo a un margen de beneficio fijo preestablecido, se requiere una constante optimización de las operaciones de excavación para lograr el objetivo, con el propósito de alcanzar niveles de producción más profundos, lo cual en la mayoría de los casos se logra únicamente a través de la utilización de voladuras controladas.

En la minería subterránea la utilización principal de las voladuras controladas está dirigida a proteger y preservar los límites de la excavación, para mantener su resistencia mecánica, sanear paredes y techo, evitando los posibles derrumbes.

En forma práctica, entenderemos por voladuras controladas aquellas que se realizan con el propósito de provocar una superficie de discontinuidad en el terreno de acuerdo a un perfil predefinido, ya sea que esta se realice previamente a la voladura principal o posteriormente.

Estas voladuras se clasifican en cuatro grupos o métodos que presentan variaciones en su ejecución, a continuación se definen:

Voladuras en línea. - Es la más antigua de las técnicas de voladuras controladas y consiste en crear un plano de debilidad a lo largo de la línea de excavación, por medio de una serie de barrenos de pequeño diámetro perforados en un espaciamiento muy corto. Estos barrenos se detonan con muy poca carga explosiva, suficiente para provocar el cizallamiento de la roca entre los barrenos sin que provoque daño alguno a la roca.

Este método se utiliza en canteras de roca ornamental para producir grandes bloques de roca y su uso queda restringido a rocas masivas, homogéneas, o bien consolidadas con un mínimo de defectos geológicos en su estructura. El mayor inconveniente de este método es su costo debido al gran número de perforaciones precisas que se requieren.

Voladuras de recorte. - Consiste en arrancar una estrecha faja de roca después de realizarse la voladura principal y de remover los escombros. El objetivo de estas voladuras es el de arrancar la roca que quedó afectada por la voladura principal, dejando una superficie expuesta más estable.

Las voladuras de recorte son muy frecuentes en los trabajos de excavación de galerías subterráneas, túneles, excavación de pozos y en aquellos otros donde la aplicación del método sea conveniente o aconsejado. El control de la sobreexcavación se efectúa a lo largo del perímetro de la excavación principal y en general estos barrenos son los últimos que se disparan de la secuencia de la voladura, usando retardo de la serie de periodo largo.

Voladuras amortiguadas. - Estas se consideran como una variación de las voladuras de precorte y consisten en la combinación de barrenos de pequeño diámetro entre perforaciones de mayor diámetro. Los barrenos de pequeño diámetro no se cargan y sirven como guía al cizallamiento producido en la roca por la detonación de los barrenos de mayor diámetro.

Voladuras de precorte. - Es el método más generalizado tanto en minería como en trabajos de ingeniería civil u obras públicas. La finalidad del precorte es en general una minimización tanto de la sobreexcavación inherente a cualquier voladura como del daño provocado por la acción del explosivo en el macizo rocoso remanente, más allá del perfil de diseño, aumentando consecuentemente la estabilidad mecánica del mismo (Figura 10.8).

Como resultado de un precorte cabe esperar lo siguiente :

- a) Frente mecánicamente mucho más estable.
- b) Menor agrietamiento y fracturación del macizo rocoso. En caso de presentarse algún acuífero disminuye notablemente el flujo a través del talud.
- c) Reducción del nivel de vibración producido por voladuras de producción cercanas, debido al apantallamiento que supone la discontinuidad formada por el precorte.
- d) Mejora de la estética general del talud mediante frentes más uniformes.
- e) Reducción de la sobreexcavación más allá del perfil del diseño de la explotación y consecuentemente la disminución de la cantidad del material a mover por este concepto.



Figura 10.8 Resultados de una voladura de precorte

La creencia de que la técnica de precorte es una opción costosa para el usuario representa su mayor inconveniente. Sin embargo, el ahorro económico que resulta del uso del precorte es considerable, cuando se considera la operación en su conjunto, especialmente en explotaciones con problemas de control de taludes.

Mecanismo de precorte

Inmediatamente después de la detonación del explosivo en un barreno, se genera una onda de choque que alcanza las paredes del barreno y se transmite dinámicamente a la roca circundante como onda de tensión. Después del paso de esta onda, la roca se ve sometida a la presión del gas confinado en el barreno. Este campo de presión es el responsable de la activación, crecimiento y coalescencia de las fracturas desactivadas por el paso de la onda de tensión (Figura 10.9).

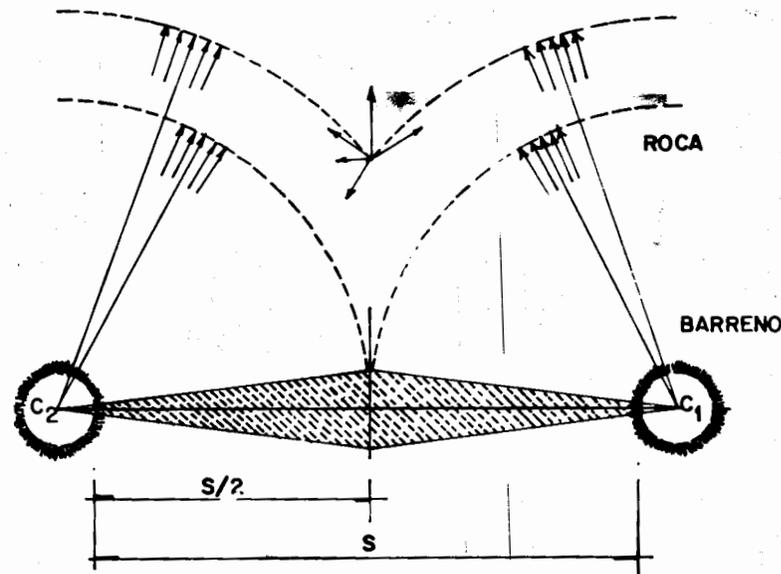


Figura 10.9 Estado de tensiones generado por las ondas de choque producidas por la detonación simultánea de dos barrenos

El mecanismo por el cual las grietas progresan con la amortiguación de la onda de choque, es mediante un frente de fractura sostenido por la presión del gas, actuando a manera de cuña y propagando uniformemente las grietas que se producen alrededor del barreno. Si en vez de un único barreno se considera que es una fila de barrenos la que se hace detonar, el número de grietas y su extensión alrededor del barreno se reduce considerablemente. Las grietas más grandes tienden a seguir la dirección del plano de corte y eventualmente se unen para formar la superficie de fractura (Figura 10.10). Las grietas crecen y se desarrollan simultáneamente formando un patrón regular en el plano que une a los barrenos. Cuando las fracturas no son coplanares, todavía puede conseguirse continuidad en la fractura mediante solapamiento de grietas a manera de escalones.

El efecto de desacoplamiento, tal como queda ilustrado en la figura 10.11, es fundamental en el precorte. La densidad, rugosidad, forma y tamaño de las grietas radiales se ven afectadas por el grado de desacoplamiento. Un alto grado de desacoplamiento promueve en general el desarrollo de una mínima cantidad de grandes grietas radiales y una notable reducción del número y extensión de las pequeñas grietas.

Espaciamiento de los barrenos

El parámetro crítico del que depende la fractura entre dos barrenos cercanos es el espaciamiento. Las tres situaciones típicas que pueden presentarse son las siguientes:

a) *Espaciamiento subcrítico*

La superficie de fractura no presenta marca de escalones ni es concoidea. La rotura se produce exclusivamente por la interacción de las ondas de choque de tensión produciendo un movimiento de partícula radialmente divergente que supera la resistencia dinámica a la tracción del material. Estas tensiones son suficientes como para activar microfracturas en la matriz de la roca dentro de una banda relativamente estrecha entre los barrenos. La rotura repentina de la roca no da tiempo a los gases a actuar, así pues, la acción de cuña de los gases y las grietas radiales tienen una importancia que puede considerarse marginal en la formación de la fractura.

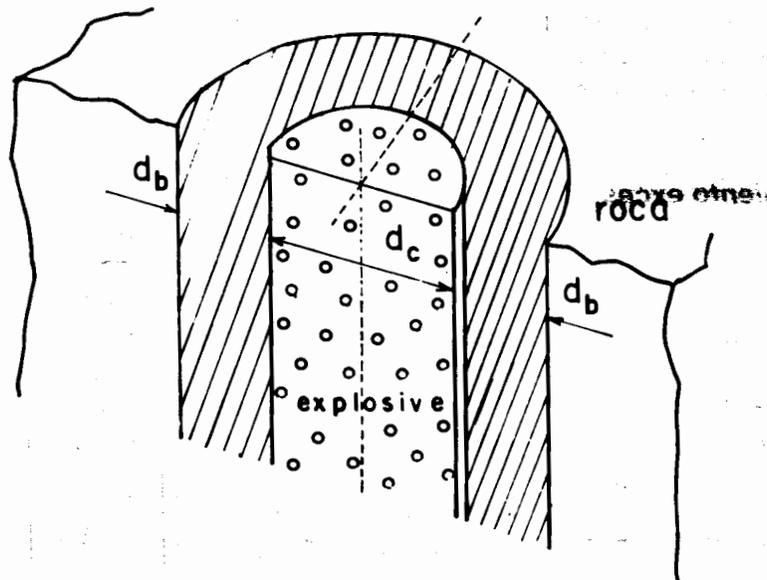


Figura 10.10 Propagación de grietas tras la detonación simultánea de dos barrenos

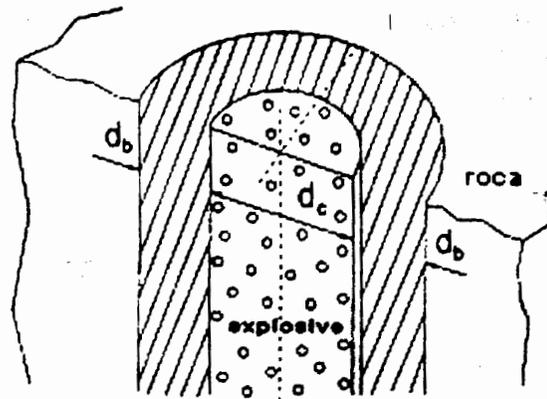


Figura 10.11 Estado ideal de desacople

b) *Espaciamiento crítico*

La atenuación rápida que sufren las ondas de choque con la distancia no permite que el efecto de rotura subcrítica se produzca a partir de cierto espaciamiento. El mecanismo dominante es el de los gases actuando en conjunto con las grietas radiales formadas. La superficie presenta fracturas concoideas suaves, delimitadas por marcas parabólicas bien delineadas, envolviendo otras marcas menores concéntricas. Estas formas concoideas se desarrollan independientemente y eventualmente se unen para formar la superficie final de la fractura.

c) *Espaciamiento excesivo*

Es una superficie formada a base de bastas e irregulares formas concoideas con saltos en escalón, que se han propagado irregularmente a partir de las grietas generadas por la onda de choque, y la acción posterior de los gases hasta solaparse y formar la fractura entre barrenos. La superposición de ondas no es suficiente para provocar la iniciación de fracturas en la zona central entre las perforaciones. Las fracturas en este caso se inician cerca de cada barreno y se propagan en el plano de los mismos hasta que se encuentran, resultando un perfil irregular.

Determinación de los parámetros de precorte

La voladura con explosivos es un complejo proceso tridimensional, que comprende las interacciones entre lo que se podría considerar un cierto número de explosiones, una roca en general anisótropa, efectos de cara libre, etc. Es conveniente simplificar el problema y considerarlo como un fenómeno que se desarrolla en el plano normal al eje del barreno. Se asume que el barreno tiene un diámetro mucho más pequeño que su longitud y que está lo suficientemente lejos de caras libres. Se considera adicionalmente que la detonación se produce simultáneamente a lo largo del barreno.

A) Método práctico

Es posible realizar un cálculo aproximado de los parámetros de precorte, basándose en los resultados de la experiencia práctica acumulada durante los años que se lleva utilizando. Como todas las consideraciones derivadas de la práctica habitual de cualquier técnica, estas no son más que una simplificación de los múltiples factores involucrados en el fenómeno. La principal ventaja de estas reglas prácticas es su sencillez y la facilidad de aplicación.

En lo que al precorte se refiere, se pueden admitir dos reglas básicas, suponiendo condiciones media de roca, explosivo, etc. estas son:

(1)

$$E_0 = \frac{5}{100} d_b^{(2/3)}$$

(2)

$$C_s = \frac{1}{125} d_b$$

Donde E_0 : Espaciamiento óptimo entre barrenos de precorte (m)

d_b : Diámetro del barreno

C_s : Carga de explosivos por unidades de superficie a precortar (Kg/m^2)

En cargas continuas puede estimarse un diámetro de carga adecuado según:

(3)

$$d_{cc} = \sqrt{\frac{8}{5 \pi \rho e}} d_b^{(2/3)}$$

Donde d_{cc} : Diámetro del cartucho con carga continua

P_e : Presión externa

De la misma forma puede determinarse el grado de discontinuidad para cargas espaciadas.

b) Selección del explosivo

Sin lugar a dudas el precorte puede considerarse como una técnica donde son fundamentales la geometría y la simetría en todo el proceso. El explosivo, parte crucial del éxito en su uso, debe seleccionarse en consonancia. Dado que la discontinuidad del precorte se produce en la práctica con espaciamentos supercríticos, en los que el mecanismo actuante es fundamentalmente la acción de los gases, es recomendable la utilización de un explosivo cuya velocidad de detonación sea la adecuada para minimizar en lo posible el daño dinámico a la roca y que a la vez produzca un alto volumen de gases.

El efecto de desacoplamiento en el barreno es tanto mejor cuanto más próximo esté a la situación ideal de la Figura 4. Por crítico de este efecto es poco recomendable el uso de cargas espaciadas, ya sean acopladas o desacopladas dentro del barreno, tanto por razones teóricas de un pobre efecto de desacoplamiento como por razones prácticas de facilidad de carga. Por lo tanto es recomendable el uso de explosivo continuo a lo largo del barreno.

c) Técnica de uso

Casi todas las técnicas de voladura controlada, y en particular las de precorte, consisten en perforar una línea de barrenos que coincida con el plano final y el ángulo diseñado como límite en la excavación. Siempre que sea posible, es aconsejable realizar el precorte con cierta inclinación puesto que la superficie ligeramente inclinada es mucho más estable, la característica peculiar del precorte es que este plano de barrenos se dispara previamente a la voladura del macizo contiguo. Este tipo de voladura implica un confinamiento extremo del explosivo, ya que por definición no existen caras libres.

Los diámetros de perforación que se utilizan normalmente varían en el intervalo de 50 a 150 mm, la carga de la línea de barrenos se realiza con algún explosivo adecuado y bien distribuida a lo largo del barreno.

A veces, y sobre todo con los diámetros más grandes, se utilizan barrenos guía sin carga para dirigir la formación de la discontinuidad según el perfil deseado. También es recomendable y usual colocar en el fondo del barreno alguna carga concentrada más potente para lograr una buena acción de corte en fondo, donde el confinamiento es máximo y la simetría de la perforación es más pobre.

Como en cualquier voladura de contorno la alineación de los barrenos es crucial para la obtención de un buen resultado. Lo máximo que se puede conseguir en el precorte depende de lo bien que se haya dispuesto la perforación. En la práctica la longitud del precorte está limitado por la profundidad a la que se puede llegar con la perforadora sin excesiva desviación.

Como límite práctico se admiten 10 m. La situación ideal para desarrollar precortes es la disposición rectilínea de los barrenos. Pueden realizarse también precortes en esquina con barrenos guía sin cargar, disparando en forma independiente ambas secciones.

Para conseguir una mínima sobreexcavación la carga debe llegar hasta la boca del barreno, para que el efecto del corte sea franco en la zona más susceptible a la sobreexcavación, como sucede en la parte superior del banco figura 10.12.

Para desacoplamientos de carga superiores al 50% es recomendable retacar el barreno al menos en una longitud del orden de 10 diámetros y así lograr la efectividad requerida de los gases de explosión. Para desacoplamientos menores del 50% es incluso conveniente evitar el retacado, de esta manera no se fuerza a los gases a través de las fracturas preexistentes en el terreno.

Este efecto es particularmente importante en rocas débiles y/o altamente fracturadas. Como regla práctica en general, si se obtiene una excesiva sobreexcavación, hay que disminuir la carga lineal; si lo que se obtiene es un contorno irregular se debe reducir el espaciamiento.

La fila de precorte ha de separarse de la voladura principal una cierta distancia, que debe estar comprendida entre $E/2$ y E . Como consecuencia de esta menor distancia, la fila de barrenos de la voladura principal más cercana a la línea de precorte ha de cargarse con una cantidad de explosivo ligeramente menor a la usual, para barrenos de producción, si se quiere evitar el agrietamiento y el daño a la roca remanente.



Figura 10.12 Barreno de precorte desacopiado

También es recomendable no sobreperforar en esta fila para no dañar la zona de asiento del banco. A veces a esta fila se le suele dar un doble retardo para provocar la liberación efectiva de la roca correspondiente. La figura 10.13 muestra un esquema genérico de precorte con los parámetros relevantes.

La determinación de la carga en esta fila puede calcularse iterativamente a partir de la figura 10.4, en la cual se ha considerado el cdg de la carga a tres diámetros de la parte superior de la columna explosiva :

$$C_a = \frac{10 - 3\pi d_b^2 \rho e (A_b + 3d_b \cdot 10^{-3} - 1.6\sqrt{c_a L_c})}{4 L_c} \quad (4)$$

Donde : C_a : Carga lineal máxima en los barrenos más cercanos al precorte.

A_b : Altura de banco (m)

L_c : Longitud de la carga de precorte (m)

La separación de la fila cercana puede estimarse mediante la adopción de un criterio conservador para el daño que se induce a la roca, manteniéndose por debajo de cierto umbral de deformación crítica, para una roca de tipo medio (hormigón) puede admitirse en torno a :

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{du}{dt}\right)}{c} = 140\mu \quad (5)$$

Donde : ε : Deformación volumétrica

c : Velocidad unidimensional de la onda de tensión en la roca (ms⁻¹)

μ : Velocidad de partícula debida a la reacción explosiva.

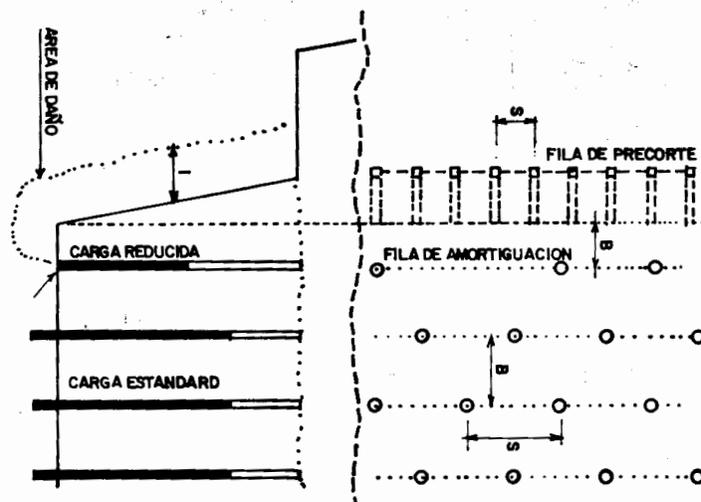


Figura 10.13 Esquema genérico del precorte

La deformación máxima admisible, para no producir daño a la roca se proporciona por la velocidad de vibración crítica supuesta, siendo conocida la velocidad sónica del macizo rocoso:

$$v = 0.14 c \quad (6)$$

Una vez obtenido el valor crítico de velocidad de vibración, la distancia umbral de daño a la roca producido por el propio precorte se puede estimar aproximadamente según :

$$l \leq \frac{10^3}{v} \sqrt[3]{c_i^2} \quad (7)$$

La fila de amortiguación inmediatamente cercana al precorte no debe producir un daño mayor que el del propio precorte; puesto que la energía producida por un explosivo es proporcional al cuadrado del diámetro, se considera la relación adimensional de distancia escalar para simetría plana.

En la distancia a la que hay que situar esta fila se obtienen :

$$\frac{l}{\sqrt{c_p}} = \frac{l+a}{\sqrt{c_a}} \quad (8)$$

Donde : l : Distancia a la que se extiende el daño producido por el precorte (m)
 C_p : Carga lineal en el barreno de precorte (kgm^{-1})
 C_a : Carga lineal máxima en los barrenos más cercanos al precorte.

En general la realización del precorte, independientemente de la voladura principal, proporciona resultados netamente superiores en comparación a los que resultan cuando se hace conjuntamente, adelantándolo a la misma.

d) *Iniciación*

Los barrenos de contorno deben dispararse simultáneamente para conseguir un claro efecto cortante, o independientemente antes de la perforación de la voladura principal, o conjuntamente con ella, retrasándola para que siga a la de precorte.

Siempre que no haya impedimento por los efectos de vibración en áreas cercanas, la iniciación de la fila de precorte debe hacerse instantáneamente. Si por alguna razón esto no es posible y es necesario utilizar secuenciación, ésta ha de ser la mínima posible (20-30 ms). La formación de la grieta de separación es mucho más basta en este caso, puesto que el mecanismo actuante no es el óptimo. En cualquier caso se debe detonar instantáneamente la máxima carga posible que no interfiera con los requerimientos medioambientales por el nivel de vibración.

En caso de usar detonadores se debe usar el número más bajo posible, teniendo en cuenta que cuanto más bajo es el número de la serie del detonador es también menor la desviación aleatoria respecto al tiempo nominal del mismo. No obstante, siempre que sea posible, es aconsejable el uso del cordón detonante en vez de detonadores para lograr simultaneidad en la iniciación.

e) *Efecto del precorte sobre vibraciones*

Puede considerarse que una voladura de precorte tiene una roca infinita y por lo tanto, un confinamiento superior en gran medida a cualquier voladura de producción. En general, y a la misma distancia reducida, la velocidad de partícula como consecuencia del precorte es mucho mayor que la producida por la voladura normal, debido principalmente al confinamiento extremo del explosivo en el precorte.

También resulta de general aceptación que la fractura de precorte supone un apantallamiento del macizo rocoso frente a la transmisión de las vibraciones y ondas de tensión. Sin que quepa la posibilidad de excluir este efecto, hay que resaltar que no es tan espectacular como generalmente se supone. La morfología de la grieta, con un contacto mutuo e interpenetración entre sus paredes, provocan únicamente una ligera atenuación del efecto de transmisión de ondas a través de la discontinuidad formada (Figura 10.14).



Figura 10.14 Grieta producida por una voladura de precorte

Ejemplo práctico, metodología

En cierta explotación se decide iniciar una rutina de precorte en todos los frentes finales. La voladura de producción se lleva a cabo con perforación de 165 mm en bancos de 10 m. El patrón de voladura es de 5 x 6 m, con sobreperforación de 1,5 m, retacado de 4 m y una carga por barreno de 130 kg de anfo. Se dispone de una perforadora de 89 mm, que se estima adecuada para las labores de precorte. Las características medias del macizo rocoso pueden admitirse como:

- Resistencia a compresión : 240 Mpa
- Resistencia a la tracción: 15 Mpa
- Velocidad sónica en el macizo : 3800 m/s

Dadas las ventajas, se pretende utilizar preferentemente un explosivo continuo, cuyas especificaciones resultan:

- Velocidad de detonación : 45 000 m/s
- Densidad: 1,2 g/cm

Como limitación medioambiental del nivel de vibraciones, la máxima carga por microretardo es de 500 kg de explosivo.

Se deberán determinar todos los parámetros necesarios para precortar con perforaciones de 89 mm y que diámetro de carga entre la gama comercial disponible en el mercado (22 mm, 26 mm, 32 mm, y 40 mm) es conveniente utilizar. Para resolver el ejercicio se seguirá la metodología indicada anteriormente como sigue :

En las condiciones dadas se obtiene directamente una buena aproximación del diámetro a utilizar:

(9)

$$d_{cc} = \sqrt{\frac{8}{5 \pi 1,2}} 89 \left(\frac{3}{2}\right) = 27,44 \text{ mm}$$

El diámetro comercial disponible más cercano a este valor resulta $d_{cc}=26$ mm, la presión que cabe esperar en el barreno es de (11):

(10)

$$P_b = 1.25 \times 10^{-4} 1.2 4500^2 \left(\frac{26}{89}\right)^{2.4} = 158.46 \text{ MP a}$$

Es netamente menor que la resistencia a la compresión de la roca. No obstante hay que tratar de conseguir la máxima carga posible del barreno sin que se alcance este límite de resistencia a la compresión, pues de esta manera puede abarataarse el precorte con espaciamientos mayores.

El siguiente diámetro a ensayar es el de 32 mm. De nuevo (11) se proporciona la presión en el barreno con este nuevo diámetro :

$$P_b = 1.25 \times 10^{-4} \cdot 1.2 \cdot 4500^2 \left(\frac{32}{89} \right)^{2.4} = 260.81 \text{ MPa} \quad (11)$$

Presión excesiva que supera con creces la resistencia a la compresión de la roca, así pues se descarta este diámetro en favor del de 26 mm, la marca lineal para este diámetro es:

$$c_p = 0.965 \text{ Kg m}^{-1}$$

El espaciamiento recomendable para este trinomio explosivo-perforación-roca se obtiene de :

$$E_o = 10^{-3} d_b \left(\frac{P_b + \sigma_r}{\sigma_r} \right) = 89 \left(\frac{158.46 + 15}{15} \right) = 1.029 \text{ m} \quad (12)$$

También resulta conveniente amortiguar la carga de la fila de barrenos de producción más cercana a la fila de precorte. Esta fila debe hacerse sin sobreperforación y situarse a una distancia tal que no produzca daño al macizo precortado.

La carga por barreno, en esta fila de amortiguación, se obtiene iterativamente a partir de la fórmula de voladura en cráter. Como valor inicial puede considerarse aceptable cuando dos iteraciones consecutivas coinciden en la primera cifra decimal:

$$C_a = \frac{10^{-3} \pi \rho_e d_b^2 (A_b + 0.003 d_b - 1.6 \sqrt{C_a L_c})}{4 L_c} \quad (13)$$

Que tras varias iteraciones con un valor inicial de $C_{a0} = 15 \text{ kg/m}$, proporciona:

$$C_a = 11.6 \text{ Kg m}^{-1} \quad (14)$$

El problema ahora es situar esta fila a la distancia adecuada de la fila de precorte. La velocidad de partícula por encima de la cual se produce daño a la roca se obtiene de :

$$v = 0.14 \cdot 3800 = 532 \text{ mm/s} \quad (15)$$

La extensión del daño como consecuencia del propio precorte se extiende hasta una distancia que viene dada por :

$$t = \frac{10^3}{v} \cdot \sqrt[3]{\frac{c_p^2}{532}} = \frac{1000}{532} \cdot \sqrt[3]{0.965^2} \approx 1.83 \text{ m} \quad (16)$$

La distancia ,a, de amortiguación entre el precorte y la fila con carga reducida se obtiene de :

$$\frac{1.83}{\sqrt{0.965}} = \frac{1.83+a}{\sqrt{11.6}} ; a = 4.52 \text{ m} \quad (17)$$

La carga total en esta fila de amortiguación se obtiene :

$$CB = (A_b - R) \cdot c_a = (10 - 4) \cdot 11.6 = 70 \text{ kg} \quad (18)$$

Teniendo en cuenta la limitación de 500 kg de explosivo por microretardo, el máximo número de barrenos de precorte por disparo resulta :

$$N = ENT \left(\frac{MCM}{c_p \cdot AB} \right) = ENT \left(\frac{500}{0.965 \cdot 10} \right) = 51 \quad (19)$$

Supuesto precorte independiente de la voladura principal, la longitud máxima a precortar por disparo resulta inmediata:

$$LMP = N \cdot E_0 = 51 \cdot 1.029 = 52.47 \text{ m} \quad (20)$$

Referencias

1. CARRASCO L.G. & SAPESTEIN L.W.. SURFACE MORPHOLOGY OF PRE-SPLIT FRACTURES IN PLEXIGLAS MODELS. INT. J. ROCK MECH. MIN. SCI. VOL. 14, PAGES. 261-275. PERGAMON PRESS 1977.
2. DOWDING C.H.. BLAST VIBRATION MONITORING AND CONTROL. PAGEL. 28, 260-263,268, PRENTICE HALL 1985
3. GUSTAFSSON R. BLASTING TECHNIQUE. DYNAMITE NOVEL WEIN. VIENNA 1981.
4. HUTCHINGS J.. BLASTHOLE DIAMETER AND ITS EFECT ON EXPLOSIVE DISTRIBUTION. FRAGBAST, BRISBANE 1990.
5. I.G.M.E.. MANUEL DE PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS. PAGES . 291-308. MADRID 1987.
6. KONYA C.J. ET AL. REMOVING SOME OF THE MYSTERY OF PRESPLIT BLASTING. SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS MAGAZINE.
7. LANGEFORS U. AND KIHSTROM B. THE MODERN TECHNIQUE OF ROCK BLASTING. JOHN WILEY & SONS, NEWYORK 1976.
8. MAHANTY B.. FRACTURE PLANE CONTROL BLASTS WITH SATELLITE HOLES. FRAGBLAST, BRISBANE 1990.
9. MONTORO, J.J. AND LAMPAYA, J.A.. EFECTIVE APPLICATION OF THE PRESPLITTING TECHINIQUE. AN OVERVIEW. ERT EXPLOSIVES AUSTRALIA 1994.
10. UEE. JORNADAS TECNICAS. VOLADURAS DE CONTORNO USANDO CORDON DETONANTE O RIOGUR.

11. U.S DEPARTMENT OF COMMERCE, BUREAU OF PUBLIC ROADS. PRESPLITTING. A CONTROLLED BLASTING TECHIQUE FOR ROCK CUTS. RESEARCH & DEVELOPMENT REPORT. U.S. GOVERNMENT PRINTING OFFICE. WASHINGTON, D.C. 1966.
- 12 WITTAKER B.N., SINGH R.N. & SUN G.. ROCK FRACTURE MECHANICS. PRINCIPLES, DESIGN AND APLPLICATIONS, PAGES. 443-480. ELSEVIER, NEW YORK 1992.

¿QUIUBO, Q'ONDA TRAIS CARNAL?

¿CÓMO ANDAN ESAS VIBRAS?

ME

Luis Viteez Utesa

Las vibras que el día de hoy nos interesan son las inducidas por Explosiones producidas por actividad humana.

Se trata de una "Sismicidad Técnica" o "Tecnológica" que guarda cierto parecido con la sismicidad natural.

Tiene, en Común con ésta, que la transmisión de la energía a través del subsuelo es mediante ondas elásticas.

Tiene, en común con ésta, que se produce una importante transferencia de energía al aire, la que se traduce en ondas de sobrepresión o de choque sónico. Además, como el confinamiento es mucho menor, se produce lanzamiento de partículas, polvo y gases.

Los niveles de energía que se manejan en la sismicidad técnica son varias ordenes de magnitud menores que la natural y asimismo los daños y afectaciones.

Sistema Vibratorio

La cadena energética, o cadena de acción vibratoria, activa, en ambos casos, el sistema vibratorio formado por:

Fuente-Trayecto-Receptor

Se trata de un proceso de transferencia de energía, en el que en cada eslabón de la cadena se expresa una versión particular de todo el proceso, una función de transferencia.

Efectos Inconvenientes

El Ingeniero debe conocer lo mejor posible el sistema vibratorio en cada caso.

En particular debe determinar, medir y controlar los niveles de vibración que puedan provocar trastornos o problemas en:

- Procesos productivos
- Estructuras y servicios
- La población en general

Para prevenir y evitar efectos inconvenientes el ingeniero debe:

MITIGAR	CONOCER		EN	FUENTE
	MEDIR			TRAYECTO
				RECEPTOR

Algunas consideraciones acerca del sistema vibratorio

- Fuente

Fuentes de Sismicidad

		Técnica		Natural
Longitud	≤	100 m	>	10 km
Profundidad	≤	500 m	>	1 km
Energía	≤	10E9joules	>	10E12joules

Hay fuentes naturales pequeñas que pueden dar lugar a vibraciones parecida a las que producen las más grandes explosiones o impactos.

Fuentes de sismicidad "Técnica", (Como llenado de embalses o colapsos grandes) dan lugar a sismos de magnitud pequeña o moderada.

Ejemplo. El derrumbe de una mina cerca de los montes Urales, el 5 de enero de 1995, provocó un sismo de magnitud 4.4 y, por tratarse de una fuente no natural, despertó gran interés en los expertos en el monitoreo de explosiones nucleares.

Con objeto de mitigar efectos inconvenientes de explosiones, el ingeniero puede intervenir en la fuente, para diseñarla o ajustarla, de manera que la energía que produzca no acarree consecuencias nocivas; este tipo de intervención no puede darse en los casos de sismicidad natural.

-Receptor

En el otro extremo de la cadena, en el receptor, también puede intervenir el Ingeniero, para:

- Definir e instalar los instrumentos más indicados al caso.
- Efectuar e interpretar las mediciones que dichos instrumentos registren
- Reducir o evitar daños a estructuras, procesos y servicios
- Procurar que las personas no manifiesten mayores objeciones por incomodidades, intolerancias o afectaciones.
- Reglamentar, exigir y controlar

Nota: En los casos de sismicidad natural es asimismo posible que el ingeniero intervenga en el eslabón receptor y para fines semejantes.

-Trayecto

En este eslabón intermedio de la cadena energética, el ingeniero tiene pocas o nulas posibilidades de intervenir, si acaso:

-Con el conocimiento de la estructura y composición geológica, y ayudado por mediciones de la conducta vibratoria a lo largo del trayecto, es capaz de establecer tanto leyes de atenuación de la energía, como efectos locales o de sitio en los que ésta se amplifica; con estos conocimientos, adquiridos en varios ensayos previos, estará mejor capacitado para diseñar el rearreglo o reorientación de la fuente definitiva y la construcción de eventuales barreras de disipación de energía que pueden mitigar algunos de los efectos inconvenientes en los receptores.

Nota: En los casos de sismicidad natural, el primer paso anterior puede darse, el segundo no es posible.

Parámetros de seguridad

En los casos de sismicidad técnica el ingeniero conoce, mide, controla y mitiga basándose en leyes semiempíricas, como:

La Ley de poder:

- v** Velocidad de partícula, en cm/seg.
- Q** Carga de explosivo en gramos por unidad de retardo
- D** Distancia entre el lugar de medición y el de la voladura, en metro
- n,m** Exponentes
- K** Constante, función del tipo de voladura y de terreno

n Es un exponente que afecta a la carga explosiva según el tipo de voladura; para voladuras confinadas (Subterráneas) $n=0,5$

m Es un exponente de amortiguamiento que depende de la conductividad energética del terreno (su grado de fracturación por ejemplo) y también de la duración de la impulsión de la onda de choque debida a la voladura.

Para $n=0,5$, que corresponde a voladuras confinadas, la experiencia da por resultado $1,2 < m < 3$, con un valor medio de 1,8

La teoría de la elasticidad, para el caso de ondas de choque esféricas, da $n=1/3; m=1,0$.

V La velocidad de partícula es un parámetro de seguridad generalmente aceptado.

Por retardo, y resulta la mejor expresión del potencial de vibración.

Deben efectuarse voladuras de prueba y mediciones correspondientes, para determinar, por métodos estadísticos, la Ley del amortiguamiento del sistema vibratorio en cuestión.

Se necesita, para definirla bien, un mínimo de unas 20 mediciones (4 ó 5 voladuras de prueba, con 4 estaciones de medición) y un coeficiente de correlación mayor de 0,8.

Existe una relación estocástica de causa-efecto entre la velocidad de partícula (variable aleatoria) y la distancia escalada (variable independiente).

Otro parámetro de seguridad. Es la frecuencia de vibración f , que afecta tanto la fisuración de inmuebles como a la sensibilidad de las personas.

Otro más, de uso más reciente, es el espectro de amplitud del movimiento vibratorio. Y el espectro de respuesta, que toman en cuenta el movimiento.

Vibratorio del terreno, tal como se desarrolla en el tiempo, así como las características dinámicas de un amplio rango de estructuras.

Estos dos últimos parámetros, y criterios de seguridad, son más precisos que el de velocidad de partícula, el cual reviste un carácter más arbitrario e incierto, pero se necesita aplicar tecnología experimentales más elaboradas, para definirlos.

En la mayor parte de los casos de sismicidad técnica, desde el punto de vista reglamentario, la mira se enfoca a respetar límites de servicio, es decir, no se llega a la necesidad de respetar límites de resistencia.

El criterio de seguridad debe ponderar, por una parte, un cierto factor de seguridad (por ejemplo 3) respecto a la velocidad de partícula que causa fisuración en los inmuebles de interés, y, por otra, los límites de vibración y de ruido aceptables para las personas que los ocupan.

Golpe de aire y lanzamiento de gases, polvo y partículas

En la sismicidad natural, por ser las fuentes muy profundas, la energía se transfiere principalmente al subsuelo y una parte de ella a la superficie.

En la sismicidad técnica, por ser las fuentes de poca profundidad o superficiales, una parte importante de la energía se transfiere al aire como ondas de choque sónico y de presión. El aire, así energizado, transfiere a su vez energía a la superficie del terreno y a cualquier otro receptor que encuentre a su paso.

El golpe de aire puede ser influenciado por fenómenos meteorológicos, entre los que destaca la velocidad y dirección del viento, y de eventuales ráfagas, en el momento de producirse el golpe y durante su transferencia y transmisión. De ahí que la predicción de su magnitud y el control de sus efectos suelen dificultarse.

El lanzamiento de polvo, gases y partículas ocurre al transferirse alta energía a un volumen de terreno próximo a, o en superficie, es decir, poco confinado.

En una voladura dada, se producirán estos tipos de pulsos o impulsos:

El de la presión de aire (PA) que es el que domina. Sólo es reducido en voladuras totalmente confinadas. Cada barreno de la voladura es una fuente de PA. A grandes distancias, o detrás de la fuente volada, la dispersión y las refracciones múltiples esmascaran, en las mediciones, los pulsos individuales y la secuencia de voladura se hace menos evidente. Los registros muestran menos picos y altas frecuencias asociadas que en las mediciones hechas cercanas o frente a la cara volada.

El de la presión de roca (PR) resultado de las componentes verticales de la vibración del terreno integradas al área total, la que actúa como un gran pistón. Aunque esta es la componente del golpe de aire de más baja amplitud, contiene las frecuencias más altas en congruencia con la velocidad de vibración vertical. Su arribo a los instrumentos de registro antecede al de la PA y es simultáneo al de la vibración vertical.

El de la expulsión de gas (EG) y el de la expulsión del taco (ET) son los más indeseables por su alto contenido de energía en alta frecuencia. Sin embargo, ambos se pueden controlar mejor que el (PA) y el PR mediante un diseño adecuado del patrón de voladura (taco, espaciamiento, bordo y velocidad de detonación).

El soplido o escopetazo de barrenos, en voladuras mal controladas o poco confinadas, producen EG y ET y en los registros instrumentales sus señales se superponen a las de PA.

En canteras el uso de anfo (baja velocidad de detonación), así como barrenos de diámetros pequeños, barrenos mojados, columnas largas y rocas con alta velocidad de propagación de ondas, contribuyen a incrementar el pulso ET.

El empleo de cordón detonante en voladuras de superficie es fuente de golpe de aire de alta frecuencia que, a distancias pequeñas a moderadas, pueden ser la causa principal de efectos inconvenientes. Puede controlarse fácilmente cubriendo con arena el cordón detonante y respetando una distancia mínima a los receptores (inmuebles, por ejemplo) que se desea proteger.

El parámetro de seguridad más común, en cuanto a golpe de aire, es la sobrepresión máxima, que se expresa en unidades de presión sobre la atmosférica (choque de aire) o en decibeles (choque sonoro), y se grafica en función de la distancia escalada a la fuente (normalizada respecto a la carga explosiva por retardo).

Se procura, en estos casos, evitar la rotura de vidrios y las vibraciones que causen fisuramiento en estructuras.

El ruido y las vibraciones consiguientes pueden provocar reclamaciones de personas que se encuentran o habitan a proximidad de las voladuras. Si estas personas no han sido informadas o prevenidas y si no aceptan como necesarias las operaciones que justifican las voladuras, ofrecerán un umbral de tolerancia muy inferior al de aquellas que estén en el caso contrario.

El diseño de voladuras debe considerar y monitorear ambos aspectos y ajustarse a sus restricciones, antes de emprender la explotación en toda forma.

Medio Ambiente

En voladuras confinadas (minas y obras subterráneas):

- El lanzamiento de partículas se reduce y controla con un buen diseño de la voladura y su secuencia de explosión, lo que, además, reduce las vibraciones resultantes.

-El polvo Se reduce rociando agua
 Se controla con ventilación forzada

-Los gases Se reducen utilizando explosivos con química Balanceada
 Se controlan con ventilación forzada

En voladuras a cielo abierto:

- El lanzamiento de partículas se reduce y controla con un buen diseño de la voladura y su secuencia de explosión, lo que, además reduce las vibraciones resultantes.

Para polvo y gases se cuentan con ventilación natural además, en lo posible, deben programarse las voladuras, para efectuarlas bajo condiciones meteorológicas favorables.

Efectos Ambientales

Si no se toman las debidas precauciones en cuanto a los aspectos antes señalados, estos llegan a convertirse en verdades a agresiones al medio ambiente. En este mismo caso pueden caer, en un momento dado, varias de las operaciones auxiliares relativas al almacenamiento, transporte y manejo de los explosivos.

La normatividad de protección al medio ambiente habrá de contemplar todas estas posibilidades.

La concepción, planeación, programación, aplicación y control de un sistema integral de calidad y seguridad que añada las restricciones de índole ambiental a las demás restricciones, conducirá a exigir y llevar a cabo diseños de sismicidad técnica balanceados en economía y seguridad, tal como los requiere la buena práctica de la ingeniería.

Esta sesión- La número 3 se va a enfocar a equipos de medición y a aspectos ambientales. Medición y aspectos ambientales juegan ese billar a tres bandas: Conocer-Medir-Mitigar, para prevenir y evitar que el sistema vibratorio: Fuente-Trayecto-Receptor, se salga de cause y cause daños o inconvenientes.

Escuchemos al técnico electrónico Robert Turnbull de CEO/INSTANTEL, quien nos hablará de equipos de medición.

Y el Antrop. Jesús Mendoza Neri, del grupo del Ing. Luis Montañez en CFE, quien tratará aspectos ambientales.

INTERVENCIÓN DEL ING. LUIS VIEITEZ UTEZA EN LA MESA DE CONCLUSIONES

La ingeniera Elizabeth Paniagua, que estuvo como secretaria en la sesión 3, y un servidor, comentamos "el punto" y concluimos lo siguiente:

El sistema vibratorio que pone en juego una voladura cualquiera, y que está constituido por la fuente, el trayecto y el (o los) receptor (es), es un sistema complejo: contiene un número importante de variables que se interrelacionan por medio de funciones de transferencias varias aún no del todo conocidas. Es por ello que el ingeniero que tiene el problema de diseño de voladuras, para obtener la producción máxima dentro de las restricciones de seguridad, nulos daños a inmuebles cercanos y aceptación de la población vecina, tiene que resolverlo con la aplicación de criterios semiempíricos; estos están basados en unas cuantas leyes de la Física y Química, en la experimentación (a base de pruebas, mediciones y ajustes), así como en la propia experiencia concluida una labor de convencimiento, a base de divulgación de la práctica de voladuras, con atenta consideración de las reacciones humanas de modo que sea generalmente aceptado que esa práctica no es nociva y se puede controlar.

El ingeniero, al dar su diseño, asume un riesgo, y éste debe ser un riesgo calculado, para ello es ingeniero. El riesgo calculado es una convulsión o un producto de tres factores: el peligro no amenaza; el valor de los bienes (inmuebles, personas...) eventualmente afectados; y la vulnerabilidad o susceptibilidad de sufrir daño dichos bienes, si se presentare la amenaza.

Debe, el ingeniero, predecir lo que va a, o puede, suceder; debe probar o ensayar a escala para observar, medir e interpretar lo que realmente sucede y así comparar los resultados con sus predicciones y confirmarlas o ajustarlas según el caso; todo esto antes de embarcarse en la operación a gran escala y definitiva. Debe, en suma, identificar los parámetros significativos, los que rigen el problema, y tener en todo momento control sobre ellos.

Tratándose de un problema complejo, intervienen en su solución enfoques y opiniones diversas, multidisciplinarias, como esta reunión lo ha hecho ver al convocar a expertos en explosivos, ingenieros mineros, civiles y geofísicos, usuarios y proveedores; y como se ha confirmado en la propia sesión 3, en la que participaron un técnico electrónico, un antropólogo y dos ingenieros civiles.

No está por demás recordar que convocatorias multidisciplinarias de este tipo tuvieron lugar ya a principios de los años 70s, y dieron por resultado tanto reuniones técnicas como cursos de actualización; éstos se impartieron en varias ocasiones en la División de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Participaron en aquel entonces Louis Oriard, de California (cuyo nombre, como han visto ustedes, aparece mencionado en algunas de las gráficas "velocidad de partícula-distancia escalada" que aquí se han mostrado); Arne Samuelson, ingeniero sueco que se aclimató en México asesorando en materia de voladuras en el túnel emisor del drenaje profundo del D.F. en el proyecto hidroeléctrico de Chicoasén, de CFE, y en otras obras; José Guerrero Arcocha,

conocido de muchos de ustedes y que representaba el conocimiento técnico del proveedor; así como otros ingenieros conocedores de la aplicación de explosivos a la construcción. Satisface constatar que lo que ustedes han presentado en esta reunión coincide muy razonablemente con lo que ellos manejaban entonces, lo que ustedes han presentado en esta reunión coincide muy razonablemente con lo que ellos manejaban entonces, lo que confirma que los conocimientos y los principios básicos aún son válidos, por lo que los criterios de aplicación que hay que poner en práctica en cada caso particular, si están bien fundados en ellos, darán resultados de ingeniería tan satisfactorios como los que los mencionados ingenieros lograron en su momento. El secreto está en la capacidad de predicción que unos y otros tengan, y ellos ya demostraron que la suya era de muy alta calidad y digna de una muy buena ingeniería.

En cuanto a protección del medio ambiente se refiere, en aquellas épocas quedaba implícita en esa buena práctica de la ingeniería. Hoy que se exige que dicha protección quede claramente explícita, quedarán también cubiertos los requisitos con una ingeniería de calidad. swin embargo, es importante que la Sociedad Mexicana de Mécanica de Rocas y los representantes de las disciplinas que han participado ben esta reunión, estén al tanto de los contenidos y de las implicaciones de la ley, las normas técnicas y los reglamentos que van, desde el punto de vista de protección al medio ambiente, regular el empleo de explosivos en la construcción, así como emitir con oportunidad los juicios pertinentes para no incurrir en exageraciones. Del lado de la ecología hay que reconocer que hay gente muy seria y conocedora, pero, por haber adquirido un cierto hábito reciente de urgencia, novedad y prestancia, se cuela también la charlatanería.

Una reflexión más: la demolición con explosivos intencionada y criminal del edificio de Oklahoma, (que, por cierto, quedó la vibración resultante grabada en los registros de los sismógrafos que existen en la región), revela la otra cara de la moneda, la de la destrucción y la violencia. La reunión técnica que hoy termina, nos ha mostrado, en cambio, que iguales herramientas se pueden emplear para construir, para edificar el bienestar. Ojalá que cundan y prevalezcan ejemplos como el de está reunión.

Consejo Directivo de Fundación ICA

Presidente

Ing. Bernardo Quintana

Vicepresidentes

Dr. José Sarukhán Kérmez

Dr. Guillermo Soberón Acevedo

Ing. Guillermo Guerrero Villalobos

Ing. Raúl López Roldán

Director Ejecutivo

Ing. Fernando O. Luna Rojas

Cuerpos Colegiados de los programas Operativos

Cómite de Becas

Ing. José Manuel Covarrubias Solís

Dr. Francisco Yeomans Reyna

Ing. Miguel Angel Parra Mena

Comité de Premios

Dr. Luis Esteva Maraboto

M.I. Mario Ignacio Gómez Mejía

Ing. Gregorio Farias Longoria

Comité de Publicaciones

Ing. José Iber Rojas

Dr. Oscar González Cuevas

Dr. Horacio Ramírez de Alba

M.I. Gabriel Moreno Pecero

Ing. Santiago Martínez Hernández

Comité de Investigación

Dr. José Luis Fernández Zayas

Dr. Bonifacio Peña Pardo

Dr. Ramón Padilla Mora

Dr. Roberto Meli P.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas

**XII Mesa Directiva
1996-1998**

**Presidente
Alfredo Sánchez Gómez**

**Vicepresidente
José Luis Garrido Uribe**

**Secretario
Jorge Castro Abonce**

**Tesorero
Manuel Sánchez García**

**Vocales
Jorge Castañeda Maza
Magdaleno Martínez Govea
Eliseo Padrón Fernández
Carlos Santana Palomino
Enrique Valencia Enríquez**

Distribución de la carga en el barreno.

Como se comentó con anterioridad, la mayor resistencia dentro de un barreno se encuentra al pie del mismo y por eso es recomendable que la carga del alto explosivo (comúnmente llamado «cebo») deba situarse en esta zona con un doble propósito; el primero consiste en iniciar confiablemente la columna de explosivo y el segundo en abatir la resistencia que se tiene al pie del barreno, en algunos casos especiales se utilizan cargas intermedias de alto explosivo, pero un porcentaje aproximado de alto explosivo a utilizar como cebo será del 40 al 50% del total y el demás explosivo se distribuirá a distancias iguales entre la carga del agente explosivo (Figura 6.14).

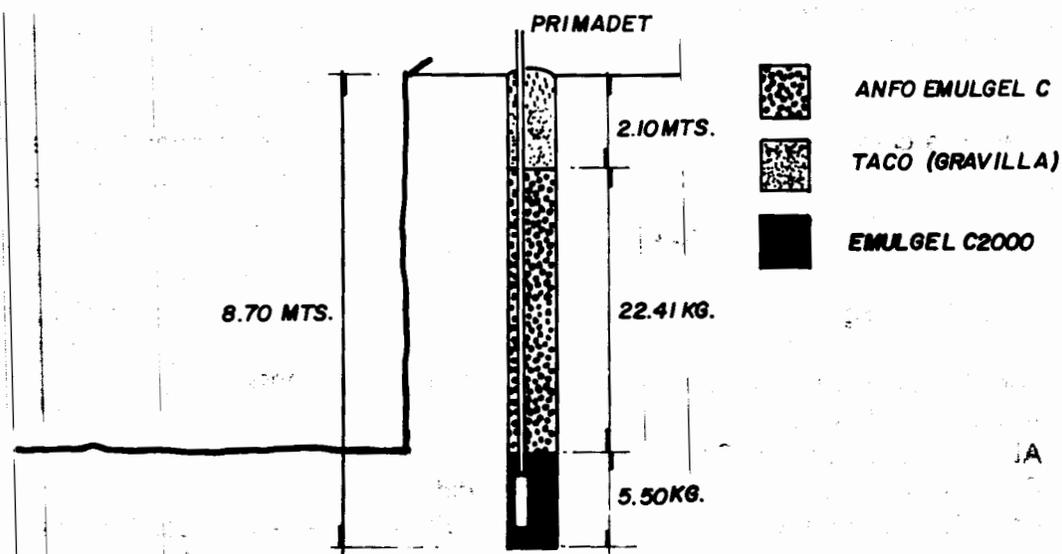


Figura 6.14 Distribución de la carga explosiva en el barreno.

Forma de cargado; es muy importante mencionar la forma de cargado de los barrenos para lograr el máximo resultado deseado, aunque en el párrafo anterior se describió la distribución de las cargas es preciso mencionar los siguientes pasos:

- 1) En el primer bombillo que se introduce en el barreno como carga de fondo, deberá insertarse el cápsul del primadet correspondiente a cada barreno (según diseño de retardos) y con el tubo de choque se efectuarán dos nudos perimetrales en el bombillo a manera de sujeción, después se hará llegar al fondo del barreno el bombillo de manera suave, para evitar cualquier golpe al iniciador. El tubo de choque del primadet deberá salir hasta el exterior del barreno, con el propósito de que pueda ser insertado el gancho «j» al cordón detonante y éste conduzca desde la superficie al primadet, la onda detonante que iniciará en el retardo correspondiente, iniciará a la carga de fondo y a su vez a la carga de la columna del barreno.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

USO DE EXPLOSIVOS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL

ING. FEDERICO ALCARÁZ LOZANO