

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“CARACTERIZACION DEL PODER DE INICIACIÓN DE
MULTIPLICADORES”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN MINAS

Presentada por:

MILTON ARMANDO JARA CAISAGUANO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO

2000

AGRADECIMIENTO

A mi director de tesis, Dr. Paúl Carrión por sus sugerencias y atención prestada.

A los profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid:
Profesor José Ángel Sanchidrián y Dr. Alfonso Maldonado por su guía técnica y
colaboración.

A la empresa Unión Española de Explosivos, S.A. por permitirme realizar ésta
investigación.

A mis padres, hermanos y amigos que estuvieron siempre apoyándome.

A todas las personas que de manera directa o indirecta colaboraron en la realización
de ésta tesis.

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MIS AMIGOS

TRIBUNAL DE GRADUACION

Ing. Edison Navarrete C
DECANO DE LA FICT

Dr. Paúl Carrión.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Jorge Velasco
VOCAL

Ing. Hugo Eguez
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Milton A. Jara Caisaguano

RESUMEN

El documento define en principio las diferentes materias explosivas que se utilizan en la elaboración de explosivos industriales, además, otras sustancias que de por sí no son explosivas sino al ser mezcladas con otras.

También se mencionan los diferentes explosivos industriales utilizados en minería y su proceso de fabricación. Así como también los accesorios de voladura que sirven para iniciarlos y asegurar su correcta detonación.

El punto central es definir un índice de poder iniciador de explosivos insensibles al detonador, a partir de ciertos explosivos altamente sensibles. Para ello se realizaron ensayos para determinar el índice apropiado, analizando cada uno de los resultados obtenidos en cada caso particular y comparar de esta manera cada índice.

Como última etapa se establece la influencia de las voladuras en el medio ambiente en forma de vibraciones, onda aérea y proyecciones. Se detalla también un estudio económico sobre la realización del presente trabajo.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL	III
INTRODUCCION	1
I. BASES DE PARTIDA.....	3
1.1 SUSTANCIAS Y MEZCLAS EXPLOSIVAS	3
1.1.1 Sustancias explosivas primarias o iniciadores	4
1.1.2 Sustancias explosivas secundarias	5
1.1.3 Sustancias no explosivas susceptibles de detonar	7
1.1.4 Explosivos gelatinosos	10
1.1.4.1 Análisis de las características y propiedades	10
1.1.4.2 Descripción del proceso de fabricación de los explosivos gelatinosos.....	13
1.1.5 Explosivos pulverulentos	14
1.1.5.1 Análisis de las características y propiedades	14
1.1.5.2 Descripción del proceso de fabricación de los explosivos pulverulentos	17
1.1.6 Explosivos a base de nitrato amónico	19
1.1.6.1 Nitrato amónico.....	19

1.1.6.2 Mezclas ANFO.....	22
1.1.6.2.1 Propiedades de las mezclas anfo	23
1.1.6.2.2 Aplicaciones de las mezclas anfo.....	26
1.1.7 Hidrogeles	28
1.1.7.1 Análisis de las características y propiedades	28
1.1.7.2 Clases de hidrogeles.....	30
1.1.7.3 Sensibilidad de los hidrogeles.....	35
1.1.7.4 Descripción del proceso de fabricación de los hidrogeles	36
1.1.8 Emulsiones	41
1.1.8.1 Análisis de las características y propiedades	41
1.1.8.2 Anfo denso (heavy anfo).....	43
1.1.8.3 Descripción del proceso de fabricación de las emulsiones	45
1.1.9 Explosivos de seguridad.....	48
1.1.10 Pólvora negra	51
1.1.11 Explosivos utilizados en Ecuador	54
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPLOSIVOS	56
1.2.1 Potencia Explosiva.....	57
1.2.2 Poder rompedor.....	59
1.2.3 Velocidad de detonación	60
1.2.4 Densidad de encartuchado.....	61
1.2.5 Resistencia al agua	62
1.2.6 Humos	63

1.2.7 Sensibilidad	63
1.2.8 Estabilidad química	67
1.3 INICIACION DE EXPLOSIVOS	68
1.3.1 Descomposición y explosión térmica	69
1.3.2 Calentamiento local por choque: puntos calientes	71
1.3.3 Propagación de la detonación.....	74
1.3.3.1 Zona de reacción en explosivos heterogéneos	74
1.3.3.2 Diámetro crítico	76
1.3.3.3 Velocidad de detonación	80
1.3.3.4 Influencia del confinamiento.....	81
1.3.4 Iniciación por ondas de choque.....	82
1.3.4.1 Iniciación subimpulsada.....	83
1.3.4.2 Iniciación sobreimpulsada.....	87
1.3.4.3 Influencia del diámetro de la carga iniciadora	87
1.4 SISTEMAS DE INICIACION	89
1.4.1 Mecha lenta	89
1.4.2 Cordón Detonante	90
1.4.2.1 Aplicaciones del cordón detonante	91
1.4.2.2 Conexión del cordón detonante.....	93
1.4.3 Detonadores de mecha u ordinarios	94
1.4.4 Detonadores eléctricos	95

1.4.4.1 Potencia de los detonadores eléctricos	98
1.4.4.2 Mecanismo de encendido	98
1.4.4.3 Características eléctricas de los detonadores	101
1.4.4.4 Clasificación de los detonadores eléctricos.....	103
1.4.5 Otros Sistemas de Iniciación No Eléctricos	108
1.4.5.1 Relés de microrretardo	108
1.4.5.2 Detonadores no eléctricos	110
1.4.6 Multiplicadores	112
1.4.6.1 Multiplicadores colados	113
1.4.6.2 Multiplicadores con base de nitroglicerina	121
1.4.6.3 Multiplicadores Especiales.....	122
1.4.7 Sistemas de Iniciación utilizados en Ecuador	123

**II. DETERMINACION DEL PODER DE INICIACION DE
MULTIPLICADORES124**

2.1 ANALISIS TEORICO	124
2.1.1 Presión de detonación	125
2.1.2 Energía	126
2.1.3 Resistencia al agua	127
2.2 INDICES DE PODER DE INICIACION	127

III. PROCESO EXPERIMENTAL139

3.1 OBJETIVO.....	139
3.2 MÉTODO DE ENSAYO	139
3.2.1 Materiales.....	140
3.2.2 Método para medir la velocidad de detonación	141
3.2.2.1 Con cordón detonante (Método Dautriche)	141
3.2.2.1.1 Descripción	141
3.2.2.1.2 Materiales.....	142
3.2.2.1.3 Método operatorio.....	143
3.2.2.1.4 Cálculos.....	144
3.2.2.1.5 Expresión de los resultados.....	144
3.2.2.2 Con contador de tiempo	145
3.2.2.2.1 Descripción	145
3.2.2.2.2 Materiales.....	146
3.2.2.2.3 Método operatorio.....	147
3.2.2.2.3.1 Con sondas de cobre.....	147
3.2.2.2.3.2 Con fibra óptica.....	148
3.2.2.2.4 Expresión de los resultados.....	149
IV. ANALISIS DE RESULTADOS.....	151
4.1 INTRODUCCION	151
V. INFLUENCIA EN EL MEDIO AMBIENTE.....	165

5.1 INTRODUCCION	165
5.2. VIBRACIONES	166
5.2.1 Tipos de perturbaciones por vibraciones y análisis del movimiento ondulatorio	166
5.2.2 Cuantificación de la energía sísmica y ley de transmisión	169
5.2.2.1 Daños provocados por vibraciones	173
5.2.2.2 Consideraciones en el diseño de voladuras	173
5.3 Onda Aérea.....	174
5.3.1 Daños provocados por onda aérea	176
5.4 Proyecciones	176
VI. ESTUDIO ECONOMICO	177
6.1 CONSIDERACIONES INICIALES	177
6.2 COSTES DE PERSONAL.....	178
6.3 COSTES DE EQUIPOS Y MATERIALES	178
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	181
BIBLIOGRAFÍA.....	184

ABREVIATURAS

CJ	Chapaman-Jouguet (estado CJ)
ETSIMM	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid
g	gramo
Kg	kilogramo
NA	Nitrato Amónico
NC	Nitrocelulosa
NG	Nitroglicerina
NMMA	Nitrato de monometilamina
PETN	Pentrita
RDX	Hexógeno
TNT	Trilita

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Carga de fondo de un barreno con cartuchos de Goma 2-EC en mediano calibre y cordón detonante de 12 g.	12
Figura 1. 2 Fabricación de explosivos gelatinosos. Teller Mixer	14
Figura 1. 3 Carga de un barreno de pequeño calibre de interior con explosivo pulverulento sensibilizado con nitroglicerina	17
Figura 1. 4 Fabricación de explosivos pulverulentos con Mezcladoras Werner.....	18
Figura 1. 5 Camión de Nagolita en labores de carga de barrenos de gran calibre	27
Figura 1. 6 Riogel 2 en mediano calibre	35
Figura 1. 7 Esquema de Fabricación de Hidrogeles.....	40
Figura 1. 8 Riomex E 20 en mediano calibre.....	45
Figura 1. 9 Proceso de fabricación de emulsiones explosivas	48
Figura 1. 10 Galería de pruebas para explosivos de seguridad. Campo de tiro de ATXE	49
Figura 1. 11 Cebado de un cartucho para voladura de arranque de carbón	51
Figura 1. 12 Carga de barrenos para extracción de rocas ornamentales mediante pólvora de mina y mecha lenta.....	53
Figura 1. 13 Potencia Explosiva. Péndulo Balístico	59
Figura 1. 14 Poder Rompedor, Método de Hess	59
Figura 1. 15 Medidor de velocidad de detonación.....	61
Figura 1. 16 Resistencia al agua.....	62
Figura 1. 17 Ensayos de sensibilidad a la onda explosiva	65
Figura 1. 18 Ensayo al martillo	66
Figura 1. 19 Sensibilidad al roce.....	67
Figura 1. 20 Zona de reacción en dos etapas en los explosivos heterogéneos. (Según Faunquignon 1995).	75
Figura 1. 21 Frente de detonación curvo en una carga cilíndrica	78
Figura 1. 22 Velocidad de detonación en función del diámetro de algunos explosivos	82
Figura 1. 23 Iniciación subimpulsada. (a) explosivos homogéneos; (b) Explosivos heterogéneos.....	85
Figura 1. 24 Propagación de la detonación en un explosivo poco sensible para varios diámetros de carga iniciadora.....	89

Figura 1. 25	Accesorios para pega con mecha lenta: punzón, tenacillas, mecha lenta y detonadores.	90
Figura 1. 26	Cordones detonantes de 6 g (amarillo), 12 g (azul) y 20 g (blanco) ...	92
Figura 1. 27	Cordones detonantes de 40 g (verde) y 100 g (rojo)	92
Figura 1. 28	Nudo de conexión entre ramales de cordón detonante	94
Figura 1. 29	Seccionado de dos detonadores eléctricos: instantáneo y retardado	96
Figura 1. 30	Detalle de la cerilla de un detonador eléctrico tipo S y de su ventana antiestática.....	99
Figura 1. 31	Características, clasificación y código de colores de los diferentes detonadores eléctricos fabricados por Unión Española de Explosivos en su fábrica de Galdácano (Vizcaya).....	101
Figura 1. 32	Secuenciación de una voladura a cielo abierto con relés de microrretardo de 15 ms. (color rojo).....	110
Figura 1. 33	Detonadores RIONEL	111
Figura 1. 34	Multiplicador de pentolita de 400 g.....	112
Figura 2. 1	Índice de poder iniciador 1 (IPI1).....	132
Figura 2. 2	Índice de poder iniciador 2 (IPI2).....	133
Figura 2. 3	Índice de poder iniciador 3 (IPI3).....	134
Figura 2. 4	Índice de poder iniciador 4 (IPI4).....	135
Figura 2. 5	Índice de poder iniciador 5 (IPI5).....	136
Figura 2. 6	Índice de poder iniciador 6 (IPI6).....	137
Figura 2. 7	Índices de poder iniciador (IPI)	138
Figura 3. 1	Índice de poder iniciador	140
Figura 4. 1	Índice de poder iniciador 1 (IPI1).....	154
Figura 4. 2	Índice de poder iniciador 2 (IPI2).....	155
Figura 4. 3	Índice de poder iniciador 3 (IPI3).....	156
Figura 4. 4	Índice de poder iniciador 4 (IPI4).....	157
Figura 4. 5	Índice de poder iniciador 5 (IPI5).....	158
Figura 4. 6	Índice de poder iniciador 6 (IPI6).....	159
Figura 4. 7	Velocidad de detonación de Nagolita iniciada con diferentes explosivos.....	164
Figura 5. 1	Perturbaciones originadas por las voladuras de rocas	166

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Efecto del diámetro de las gotas de la fase dispersa	42
Tabla 2.1	Indice de poder iniciador teórico de diferentes explosivos.....	130
Tabla 4.1	Indice de poder iniciador experimentales de diferentes explosivos.....	153
Tabla 4.2	Velocidad de detonación de ANFO y RIOGEL2.....	160
Tabla 4.3	Velocidad de detonación de ANFO con RIOGEL2.....	160
Tabla 4.4	Velocidad de detonación de ANFO y GOMA 2E-C.....	160
Tabla 4.5	Velocidad de detonación de ANFO con GOMA 2E-C.....	160
Tabla 4.6	Velocidad de detonación de ANFO y RIOMEX E20	161
Tabla 4.7	Velocidad de detonación de ANFO con RIOMEX E20	161
Tabla 4.8	Velocidad de detonación de ANFO y RIOMEX E24	161
Tabla 4.9	Velocidad de detonación de ANFO con RIOMEX E24	162
Tabla 4.10	VOD de ANFO con multiplicador de PENTOLITA de 150	162
Tabla 4.11	VOD de ANFO normalizada iniciado con diferentes explosivos	163

INDICE DE FOTOS

Foto 3.1	Contador de tiempo.....	146
Foto 3.2	Preparación de la carga explosiva.....	149
Foto 3.3	Ensayo para medir la velocidad de detonación de Anfo.....	150

INTRODUCCION

El presente trabajo trata de resumir mi experiencia como estudiante en el tema de explosivos, esto lo pude realizar gracias a una beca otorgada por Unión Española de Explosivos, S.A. (UEE), dentro del convenio entre la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid (ETSIMM) y la Escuela Superior Politécnica del Litoral, como estudiante de ésta última.

Todo este proyecto lo realicé en España, teniendo como tutor designado por la ETSIMM al catedrático Profesor José Angel Sanchidrián y como tutor nombrado por UEE a D. Francisco Javier Pizarro (D. Andrés Martínez). La duración fue de aproximadamente 6 meses, siendo los costos de alojamiento y alimentación cubiertos por la empresa.

El tema se enmarca dentro del Comité Europeo de Normalización, por lo adquiere importancia ya que se quiere establecer ciertos parámetros que nos indiquen el aprovechamiento de algunos explosivos dentro de ciertas características específicas.

Para la realización de los ensayos correspondientes, tuve que trasladarme a los laboratorios de la empresa, efectuando las pruebas necesarias para verificar los cálculos teóricos que anteriormente había realizado.

Debo destacar y agradecer las facilidades y apoyo otorgadas por la UEE, ETSIMM y por mis tutores, ya que la realización de este proyecto no la habría cumplido dentro de las expectativas deseadas.

Puedo concluir que a más de ser un proyecto de fin de carrera, la experiencia tanto práctica como personal me llena de satisfacción. Por lo que destaco la importancia de adiestrarse en nuevas técnicas que nos ayudan a crecer como profesional, así como también el conocer otra cultura y relacionarse con personas de otro país nos ayuda a tener mente abierta a ideas y pensamientos muy diversos.

Como principal objetivo es el establecer un índice de iniciación de explosivos insensibles al detonador, que nos indicará el tipo de multiplicador adecuado según el tipo de sustancia explosiva que estemos utilizando.

Un buen índice de iniciación nos garantizaría una detonación que preserve las características de los explosivos, con el fin de asegurar una detonación segura, confiable y completa.

CAPITULO I

BASES DE PARTIDA

1.1 SUSTANCIAS Y MEZCLAS EXPLOSIVAS

Teniendo en cuenta su composición existen dos tipos principales de materias explosivas: las sustancias y las mezclas explosivas. Las sustancias explosivas son sustancias químicas susceptibles de reaccionar violentamente al disociarse sus moléculas y reagruparse luego en forma más estable. Sus moléculas se descomponen luego de activadas en gases como CO_2 , H_2O , N_2 , etc., con la liberación de energía que lleva este proceso.

En cambio las mezclas explosivas se componen de sustancias combustibles y otras oxidantes, por tanto, son aptas para reaccionar entre sí. Las sustancias que la constituyen pueden ser explosivas o no y gran parte de los explosivos industriales pertenecen a ésta clases como anfo, emulsiones, dinamitas, gomas, etc.

Se establece una división de las materias explosivas de acuerdo a su sensibilidad, por lo que se clasifican en tres categorías, según la magnitud del impulso energético necesario para iniciar su detonación: Sustancias explosivas primarias o iniciadores, sustancias explosivas secundarias y sustancias no explosivas susceptibles de detonar.

1.1.1 Sustancias explosivas primarias o iniciadores

Son sustancias que por la debilidad de sus enlaces, resultan altamente sensibles e inestables. Debido a su gran sensibilidad, cuando son puros, dependiendo en gran medida de su estructura cristalina y su granulometría. Aunque sea una pequeña cantidad de estas sustancias ya es sensible a la ignición debido a su pequeña masa crítica. Por lo que se emplean para fabricar los elementos iniciadores de la detonación como detonadores. Pueden ser iniciados por un pequeño estímulo externo como llama, corriente o descarga eléctrica, radiación, fricción, impacto, choque, etc.

Dentro del tipo de sustancias primarias tenemos el fulminato de mercurio y la azida de plomo. Los que se caracterizan por la debilidad de sus enlaces O-N, Hg-O y N-Pb. También el trinitrorresorcinato de plomo se utiliza en combinación con los anteriores para aumentar su sensibilidad y reduce la higroscopicidad del fulminato, que, por absorción de agua pierde sensibilidad a la llama.

1.1.2 Sustancias explosivas secundarias

Las sustancias explosivas secundarias requieren para su iniciación y detonación, comparados con las sustancias explosivas primarias, una mayor cantidad de explosivo y un mayor impulso energético.

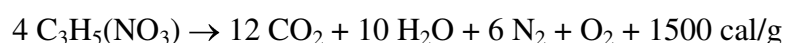
Estas sustancias representan la totalidad de los explosivos utilizados en aplicaciones militares y civiles utilizan, sin contar a las sustancias primarias. Además, en estas sustancias debe distinguirse aquellas que se constituyen de una sola sustancia química y los que están formados de una mezcla de sustancia, alguna de ellas o todas explosivas.

Tienen elevada densidad y velocidad de detonación, además, su energía de detonación es elevada. Se emplean como carga base en los detonadores, también como cebos para iniciar explosivos de baja sensibilidad y en mayor ó menor proporción, forman parte de la composición de muchos explosivos comerciales.

Dentro de las sustancias explosivas secundarias tenemos:

La **nitroglicerina**, que es muy sensible al choque ó la fricción debido a la debilidad del enlace N-O y a la reactividad de los grupos NO_2 , que están cerca. Al ser expuesta a la intemperie, es muy inestable, ya que podría descomponerse por hidrólisis soltando NO_3H , que es una reacción exotérmica, produciendo en

muchos casos su inflamación y detonación espontánea también inestable. Al congelarse origina dos formas cristalinas: una rómbica (estable) a 13,2 °C y otra triclinica (inestable) a 2,2 °C, y su descongelación puede ser de riesgos para los que estén cerca. Su densidad es 1,6 con un balance de oxígeno positivo y detona según reacción que se describe:



A una presión de detonación de 250.000 atm y una velocidad de detonación de 7.926 m/s aproximadamente.

El **nitroglicol**, esta sustancia por su bajo punto de congelación (-20 °C), se añade a la nitroglicerina para bajar al punto de congelación de ésta y así sea más estable.

El **trinitrotolueno**, llamada también trilita, es menos sensible que la nitroglicerina por su menor debilidad del enlace N-C y la mayor separación de los grupos NO₂. Además, es más estable, pues no sufre hidrólisis y tiene un balance de oxígeno negativo.

La **pentrita** es muy estable por la estructura simétrica de la forma química que posee.

La **nitrocelulosa**, es una mezcla de ésteres nítricos, con un porcentaje de 11% a 13% de nitrógeno que insensibiliza algo la nitroglicerina y la gelatiniza al mezclarse con ésta ó con el nitroglicol. Se tiene una variedad de bajo punto de congelación que es el **nitro almidón**.

1.1.3 Sustancias no explosivas susceptibles de detonar

Estas sustancias son generalmente no explosivas pero en determinadas circunstancias y ante un impulso energético suficientemente alto por la detonación de otro explosivo, son propensas de explotar.

Dentro de ellas tenemos el nitrato sódico, sobre todo, del nitrato amónico, sustancia empleada comúnmente como fertilizante que, añadiéndole combustible que corrija su balance de oxígeno positivo, forma parte importante de la mayoría de los explosivos industriales que se utilizan. Es un producto muy inactivo y por lo cual su manejo es seguro, se sensibiliza añadiendo un combustible generalmente gasoil en la proporción 94/6 en peso. Se logró su descubrimiento como explosivo debido a dos accidentes ocurridos en Texas City y Hamburgo en los años 40, que revelaron la posibilidad de ser sensibilizarlo. Se trata de un producto barato, pero tiene el problema en su elevada higroscopicidad y solubilidad en agua, por lo que la detonación puede ser insensibilizada.

En estado puro el nitrato amónico tiene un calor de explosión de sólo 380 cal/g, aproximadamente una cuarta parte del correspondiente a la nitroglicerina. No obstante, si se le añade un combustible que compense el exceso de oxígeno, el calor de explosión se puede incrementar hasta superar las 900 cal/g. Tiene una sensibilidad, velocidad de detonación y diámetro crítico que varían de acuerdo a la densidad y el tamaño de carga de partícula que tenga.

A continuación vamos a definir a los explosivos industriales que están constituidos por mezclas de sustancias explosivas o no y a veces por sustancias puras.

Muchas de las sustancias explosivas (nitroglicerina, pentrita, etc.) son muy sensibles para su utilización directa en una voladura. Además, su precio es muy elevado para ser utilizados en labores de extracción de material.

En la mayoría de estas sustancias el balance de oxígeno es negativo, como la NG, cuyo balance es algo positivo que es una excepción, esto posibilita mejorar su potencia con sólo añadir oxidantes para obtener un balance de oxígeno nulo. De esta forma se contribuye a que la mezcla explosiva obtenida sea más barata, pues los oxidantes empleados en esta industria –nitrato amónico, nitrato sódico, etc.- son más baratos que las sustancias propiamente explosivas.

Al mezclar ciertos ingredientes se logra dar al producto unas propiedades determinadas como densidad, consistencia, potencia, insensibilidad, resistencia al agua, etc., de acuerdo con las condiciones de utilización de las que carecen las sustancias explosivas que existen.

Se pueden clasificar a las mezclas explosivas industriales en dos grandes grupos: los explosivos convencionales y los agentes explosivos. En los explosivos convencionales se caracteriza el empleo de sustancias explosivas como sensibilizadores de las mezclas, en cambio en los agentes explosivos no suelen llevar productos esencialmente explosivos en su elaboración.

Puede clasificarse a los explosivos convencionales en dos grupos, los sensibilizados con NG y los sensibilizados con otras sustancias, principalmente TNT, si bien cabe clasificarlos, además, por su consistencia, en explosivos gelatinosos y explosivos pulverulentos.

Se conoce a los explosivos convencionales sensibilizados con nitroglicerina con el término genérico de dinamitas, no obstante la dinamita descubierta por Nobel era un producto pulverulento, mientras que la categoría más importante de los productos sensibilizados con NG son los explosivos gelatinosos que se conocen.

Los agentes explosivos, agentes de voladura, se destaca las mezclas ANFO, formadas por nitrato amónico y aceite combustible; el ANFO es el explosivo más

utilizado en el mundo de aplicaciones civiles. También en las mezclas ANFO, existen dos familias de agentes de voladura, con la característica común de contener agua en su composición: los hidrogeles y las emulsiones.

Además, se tiene una mezcla explosiva muy particular que es la pólvora negra, el primer explosivo empleado por el hombre y el único hasta los descubrimientos de Nobel en la segunda mitad del siglo XIX. Sin embargo, es de uso limitado en el arranque de roca, la pólvora negra sigue utilizándose en nuestros días, siendo utilizado en ciertas labores mineras.

1.1.4 Explosivos gelatinosos

1.1.4.1 Análisis de las características y propiedades

Recibe su nombre por su consistencia gelatinosa ya que están constituidos por nitroglicerina (NG) gelatinizada con nitrocelulosa (NC). A la “gelatina explosiva”, llamada en España “goma pura”, y es una mezcla del 93% de NG y 7% de NC. La preparó por primera vez por Nobel en el año 1875, al descubrir que la NG disolvía a la NC y cuando la NC de alta viscosidad era añadida a la NG en la proporción ya indicada se obtenía una sustancia gelatinosa que es la nitroglicerina. De esa manera, además de inmovilizarse la NG líquida, se adquiere un balance de oxígeno de la mezcla nulo, por lo que la energía desarrollada es aún superior a la de la NG pura. Este producto obtenido es una sustancia gelatinosa de

consistencia plástica, muy apropiada para su uso en labores de voladura por adaptares bien al barreno, debido precisamente a consistencia plástica que adquiere.

El tipo de explosivos gelatinosos que llevan en su composición nitrato amónico como oxidante se llama gelatinas especiales. Actualmente, casi todos los explosivos gelatinosos se fabrican con NA, debido a su mayor potencia a igualdad en contenido de NG en comparación con otros oxidantes. Los inconvenientes de su menor resistencia al agua (el NA es muy higroscópico), con respecto a las gelatinas con nitrato sódico, pueden ser superadas con la ayuda de productos especiales, tales como jabones metálicos, goma guar, etc., que al agregarse en su composición mejoran mucho su resistencia al agua.

Una característica de los explosivos gelatinosos es su potencia elevada, también tienen una alta densidad, esto les hace adecuados para su aplicación en rocas duras y como carga de fondo de barrenos. Asimismo, su buena resistencia al agua los ha hecho, hasta hace poco, útiles en trabajos con agua.

Un inconveniente que tienen los explosivos gelatinosos es que presentan un fenómeno de envejecimiento rápido, disminuyendo su velocidad de detonación muy rápidamente con el tiempo, de tal modo que un explosivo gelatinoso, que recién fabricado puede tener una velocidad de detonación de unos 5000 m/s, sólo llega a 2500 m/s a los dos meses de su elaboración.

Otro problema clásico de estos explosivos es su cierta toxicidad, debido a la acción vasodilatadora en el organismo humano de la nitroglicerina, y especialmente del nitroglicol que reemplaza, total o parcialmente, a la nitroglicerina en estos explosivos gelatinosos. Además, otro inconveniente es la elevada sensibilidad de estos productos a los estímulos accidentales (impactos, roces, calor, etc.), por lo que su consumo se ha reducido considerablemente en la mayor parte de los países occidentales últimamente.



Figura 1. 1 Carga de fondo de un barreno con cartuchos de Goma 2-EC en mediano calibre y cordón detonante de 12 g. (Cortesía de UEE, S.A.)

1.1.4.2 Descripción del proceso de fabricación de los explosivos gelatinosos

Los explosivos gelatinosos se fabrican en dos fases: la preparación de la pasta explosiva y el encartuchado.

Para mezclar se hace por lotes, tras pesado y dosificación de los diferentes componentes en una cuba móvil que se alimenta a las máquinas mezcladoras, o amasadoras. Las máquinas son de tipo planetario, verticales (tipo Drais) u horizontales (tipo Tellex, de la empresa Fr). Niepmann, G.m.b.H).

Se tiene la pasta explosiva, de aspecto consistencia semejante a la masa de pan, que transportar en cantidades reducidas a las máquinas encartuchadoras. Una máquina muy eficaz y seguro en el encartuchado de explosivos gelatinosos es la Rollex . La pasta se extiende en ella en una lámina sobre una cinta transportadora; un brazo automático toma la cantidad precisa de pasta y la deposita en la lámina de papel parafinado, que pasa a ser la envuelta del cartucho de goma.

En grandes calibres, los cartuchos se hacen comúnmente de plástico. Aquí la pasta se alimenta mediante un sinfín en el interior del tubo de plástico; al ser dosificada la cantidad precisa de pasta, se grapa el final del cartucho y el principio del siguiente y se corta el plástico separando un cartucho del posterior.

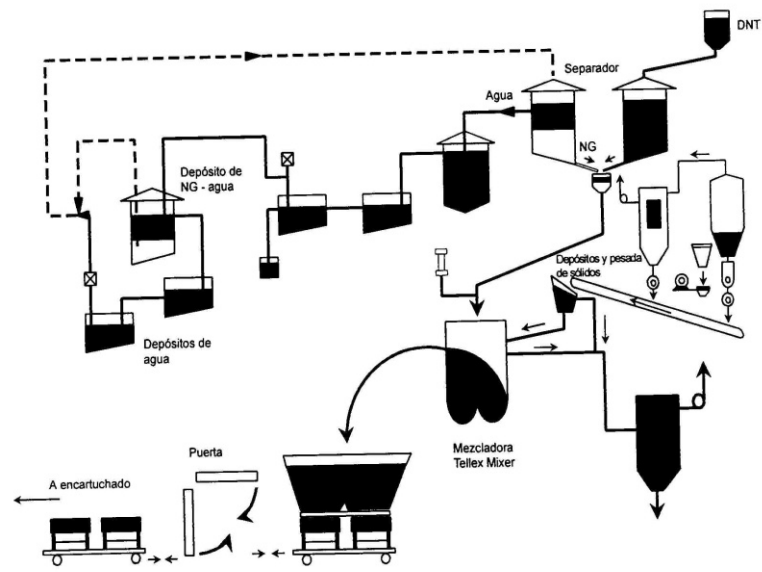


Figura 1. 2 Fabricación de explosivos gelatinosos. Teller Mixer (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

1.1.5 Explosivos pulverulentos

1.1.5.1 Análisis de las características y propiedades

Los explosivos convencionales pulverulentos pueden ser sensibilizados con nitroglicerina o con otras sustancias explosivas, siendo la más empleada entre éstas la trilita (TNT). Además, existe un tipo de explosivos pulverulentos llamados clorados, por llevar en su constitución oxidante basándose en cloratos y percloratos. Pero esta clase de explosivos no se utilizan actualmente, debido a la peligrosidad de su fabricación y manipulación, así como a sus características explosivas muy pobres.

Si el contenido de NG de las mezclas sensibilizadas con este explosivo baja del 15%, la consistencia del producto pasa a ser pulverulento, alcanzándose la categoría de los explosivos pulverulentos sensibilizados con NG. Para contenidos del 15% al 22% de NG, la consistencia del explosivo varía de gelatinosa a pulverulenta, recibiendo estos productos el nombre de semigelatinas, hoy en día muy poco utilizadas por las dificultades de su encartuchado automático, por no adaptarse bien a las máquinas de encartuchar explosivos gelatinosos ni a las de encartuchar explosivos pulverulentos. También su uso puede sustituirse bien por explosivos gelatinosos en lugares húmedos o bien por explosivos pulverulentos en lugares secos, es decir, sin presencia de agua.

Se puede sustituir la NG parcial o totalmente por TNT, lo que lugar en el caso de NG a los explosivos conocidos como sabulitas, y en el caso de TNT a categorías mixtas conocidas en España con el nombre comercial de ligamitas. El tipo de explosivos pulverulentos sensibilizados con NG constituye el grupo, llamado de las “dinamitas”, que pueden ser de base inerte o base activa.

Las descubiertas por Nobel el año 1867 están formadas por NG y kieselghur que es tierra de diatomeas o tierra de trípoli, formada por caparazones de radiolarios y valvas de diatomeas, compuestas por sílice, de una gran porosidad, calcinada, de gran poder absorbente. Estaba constituida la dinamita de Nobel por un 75% de NG y 25% de tierra de diatomeas. Se emplearon en todas partes hasta los años

veinte, siendo sustituidas progresivamente por las de base activa, que Nobel también las descubrió.

La cantidad de NG de estas dinamitas de base activa era de hasta el 22%, produciéndose, con contenido de este tenor, frecuentes exudaciones, muy peligrosas, de NG, lo cual llevó a utilizar cantidades pequeñas de NC a la NG, para retenerla. Esto trajo como consecuencia una relativa insensibilización del producto, que fue considerado entonces como negativa por ser la sensibilidad de la dinamita uno de los factores más deseados.

El factor de seguridad fue cada vez más requerido, por lo que en los años 40 empezó la gelatinización parcial de la NG en los explosivos pulverulentos con contenido en NG mayor al 12%.

Luego se empezó a sustituir el nitrato sódico por nitrato amónico, lo que permitió aumentar su potencia al sustituir una sal puramente oxidante (nitrato sódico) por un oxidante pseudo explosivo, el cual es el nitrato amónico. Actualmente todos los explosivos convencionales pulverulentos están fabricados con NA a pesar del inconveniente de su menor resistencia al agua con respecto a los que contenían nitrato sódico. La inclusión de aditivos especiales, tales como jabones metálicos, carboximetilcelulosa sódica, guar, etc., que mejoran ligeramente su resistencia a la humedad y al agua ha permitido superar en parte este problema.

El tipo de explosivos pulverulentos se caracteriza por tener una potencia y densidad inferiores a las de los explosivos gelatinosos, tienen poca resistencia al agua. Se emplean en voladuras de rocas semiduras o blandas y como carga de columna de los barrenos. Por su baja densidad y resistencia al agua no son apropiados para trabajos donde exista agua. Los explosivos a granel, tipo ANFO, ha desplazado a estos explosivos pulverulentos, cuya utilización es limitada a ciertas labores.

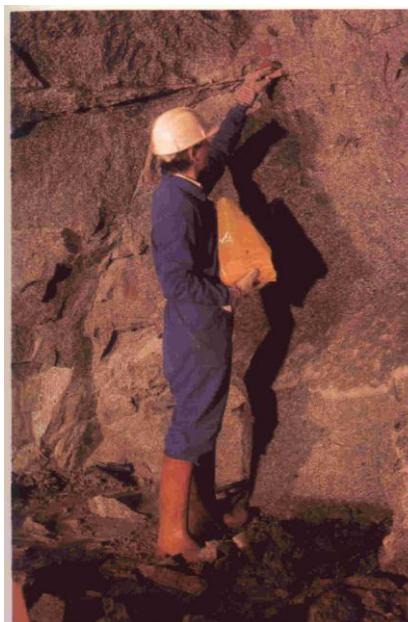


Figura 1. 3 Carga de un barreno de pequeño calibre de interior con explosivo pulverulento sensibilizado con nitroglicerina (Cortesía de UEE, S.A.)

1.1.5.2 Descripción del proceso de fabricación de los explosivos pulverulentos

Su fabricación es parecida a los explosivos gelatinosos, cabe diferencia la fase de mezclado, o fabricación de la pasta explosiva, y el encartuchado. El mezclado, no

se diferencia mucho de lo expresado anteriormente; un tipo de mezcladora clásica de estos explosivos es la tipo Werner (horizontal, con dos ejes que llevan palas espirales), también se lo puede realizar con mezcladoras Draiss.

Se puede realizar el encartuchado de los explosivos pulverulentos por gravedad, debido a sus características de fluencia. El cartucho se prepara previamente en una máquina “canutera”, y se alimentan a la encartuchadora con un extremo abierto. Para llenar el cartucho se lo realiza mediante un husillo que dosifica e introduce verticalmente, por gravedad, la pasta en cada cartucho.

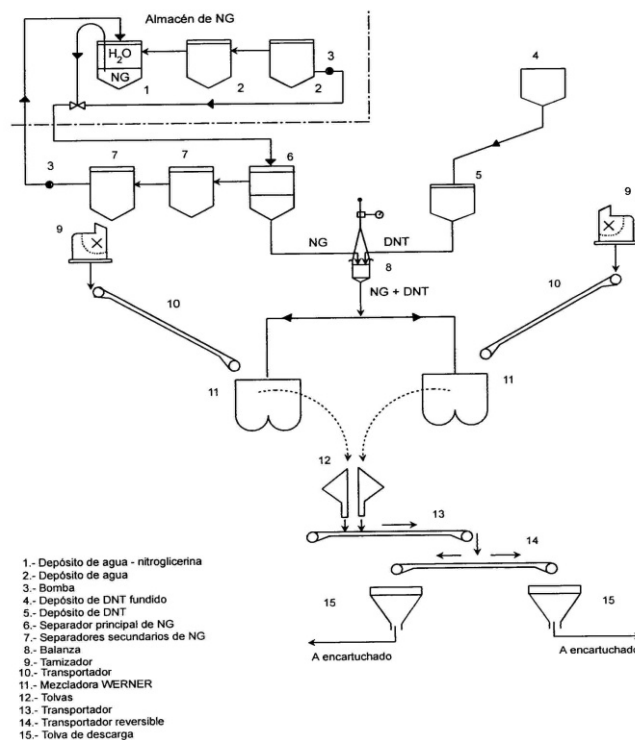


Figura 1. 4 Fabricación de explosivos pulverulentos con Mezcladoras Werner (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

1.1.6 Explosivos a base de nitrato amónico

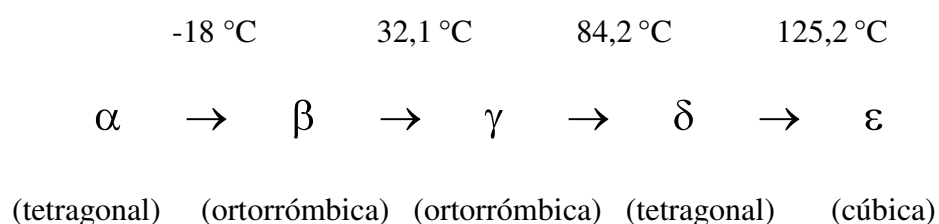
1.1.6.1 Nitrato amónico

El nitrato amónico (NA) fue descubierto a mediados del siglo XVII, pero a fines del siglo XIX empezó a adquirir importancia como ingrediente de los explosivos, ya en el año 1867 los suecos Ohlsson y Norrbein patentaron un explosivo basándose en nitrato amónico y combustibles llamado por ellos “pólvora de amoniaco”. El problema era su gran higroscopicidad, el mismo que se resolvió luego debido al descubrimiento por Alfred Nobel de las gelatinas explosivas, en el año 1875, que al recubrir a los granos de nitrato amónico los protegía de la humedad. Luego el nitrato amónico ha ido adquiriendo gran importancia creciente como componente de explosivos, hasta llegar a ser actualmente un ingrediente importante de todos los explosivos industriales.

La presentación del nitrato amónico comercialmente es en forma de cristales, esferas o granos. Las esferas se obtienen por pulverización de una solución concentrada de nitrato amónico, que cae desde la parte superior de una torre encontrándose con una corriente de aire ascendente inflado desde la base de aquella. La caída de la solución hace que se enfríe y el NA solidifica en gránulos redondos o “prills” del tamaño esperado.

- **Propiedades físicas del nitrato amónico**

La temperatura de fusión del nitrato amónico es de 169,6 °C y es muy soluble en agua, creciendo la solubilidad con la temperatura. Para el estado sólido se presentan cinco formas cristalinas que se distinguen por sus temperaturas de transición:



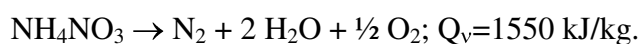
La transición a la temperatura de 32 °C, que va acompañada de un aumento de volumen de los cristales del 3,6%. Luego de esto los cristales se rompen en otros menor, a la vez que el agua, como consecuencia de la humedad superficial de los granos, disuelve mayor cantidad de NA. Al enfriarse, los pequeños cristales tienden a aglomerarse por efecto de la humedad, debido a que la solución de NA concentrada que rodea los granos precipita NA, que une unos granos con otros, formándose grandes trozos endurecidos.

El endurecimiento puede reducirse modificando el hábito cristalino del NA, mediante la adición de ciertos tipos de colorantes en cantidades pequeñas. Además, actúan como agentes modificadores el fosfato amónico y las aminas alifáticas de cadena larga, como el acetato de laurilamina.

El nitrato amónico tiene una elevada higroscopicidad, convirtiéndose en líquido en contacto con aire con humedad relativa del 60%.

- **Propiedades explosivas del nitrato amónico**

En ciertas condiciones el nitrato amónico puede detonar, descomponiéndose según la reacción:



Esto supone una producción de 980 litros de gases por Kg. de producto.

En largo tiempo el nitrato amónico ha sido visto como una de las materias explosivas más difíciles de hacer detonar, lo que dio lugar a que en su manejo no se guarden muchas precauciones. Esto dio como resultado grandes catástrofes en la historia de la fabricación y utilización de este producto.

Estos accidentes mostraron que el nitrato amónico es un explosivo capaz de detonar bajo un estímulo suficiente, siendo su sensibilidad mayor cuando menor sea su densidad aparente de este explosivo.

- **La sensibilización del nitrato amónico por adición de combustibles**

Cuando el nitrato amónico está puro, sin sustancias orgánicas, detona con mayor dificultad que cuando las contiene. La adición de pequeñas cantidades de combustible, del orden del 1%, el NA que en estado puro es muy poco sensible, forma mezclas muy sensibles como para que se pueda provocar su explosión por la acción de un iniciador corriente.

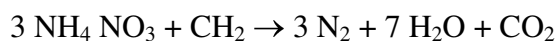
Fuera de los aceites minerales, todas las sustancias combustibles mezcladas con el nitrato amónico lo sensibilizan de cierta manera. En el caso del carbón, el azufre en polvo, los metales finamente divididos, tales como el aluminio y el zinc, etc., ocurre esto. Las propiedades explosivas de la mezcla del nitrato amónico con aceites minerales originaron al ANFO.

1.1.6.2 Mezclas ANFO

El nitrato amónico por el año 1945, para uso agrícola, se producía en torres de granulación a partir de una solución de NA prácticamente anhidra. Con el fin de reducir su coste, se pasó a utilizar soluciones con mayor contenido de agua, que era retenida y se produjeron granos de gran porosidad.

La porosidad permite a los combustibles líquidos mezclarse más íntimamente con el NA y, al exponer una mayor parte de su superficie a la reacción química, se reduce el diámetro crítico, incrementándose su sensibilidad a la detonación por la reacción de un iniciador.

La mezcla el NA con un combustible, como el fuel-oil, en proporción estequiométrica, da la siguiente reacción de descomposición:



Generándose 927 kcal/kg y un volumen de gases de 970 l/kg. Esta mezcla estequiométrica corresponde a un 94,5% de NA y un 5,5% de aceite mineral y representa el desprendimiento máximo de energía, varía ligeramente según el tipo de aceite que se utiliza.

1.1.6.2.1 Propiedades de las mezclas anfo

- **Contenido de aceite mineral**

Al variar la energía desprendida con relación al porcentaje de fuel, se observa que la energía aumenta rápidamente con el contenido en combustible, hasta el porcentaje correspondiente a la mezcla estequiométrica, luego del cual vuelve a disminuir, de forma lenta.

El contenido en combustible ejerce una notable influencia en la cantidad de gases nocivos desprendidos en la detonación. Mediante pruebas realizadas se desprende que el contenido de monóxido de carbono aumenta muy rápidamente con el contenido en fuel, mientras que disminuye el contenido de óxidos de nitrógeno, se

deduce entonces que desde este punto de vista las composiciones más favorables son las correspondientes a la mezcla estequiométrica resultante.

La cantidad de combustible afecta a la velocidad de detonación, aumentando rápidamente al crecer el contenido en fuel, hasta llegar al máximo de velocidad, con la mezcla estequiométrica, disminuyendo lentamente al sobrepasar el 5,5% del aceite que contiene.

La influencia del contenido de gasóleo en la sensibilidad del ANFO, da como resultado el NA poroso y el denso. El NA poroso tiene una sensibilidad que aumenta rápidamente con el contenido en aceite, obteniéndose la máxima sensibilidad con menos del 1%, manteniéndose la misma sensibilidad hasta el 7% del gasóleo; luego de este valor, el contenido de la mezcla sé flegmatiza rápidamente.

En el caso de prills de NA denso, la sensibilidad máxima se obtiene con el 2% del fuel-oil, bajando a partir de este valor. Esto se debe a que el fuel no puede filtrarse en el interior del grano, como ocurre en los prills porosos, por cuyo motivo, a partir del 2% sé flegmatiza.

- **Tamaño de grano**

El nitrato amónico tiene un tamaño de grano que influye en la sensibilidad del ANFO como en la velocidad de detonación.

- **La humedad**

El NA es muy higroscópico y soluble en agua, entonces la cantidad de humedad contenida en el ANFO tiene marcada influencia sobre sus propiedades explosivas. Si el contenido en humedad es mayor a un 4%, la velocidad cae muy rápidamente y cuando alcanza el 8-9% ya no detona. Lo que se debe al consumo de energía para evaporar el agua y para calentar el vapor hasta la temperatura de detonación.

Asimismo, la humedad afecta a en contra de otras características del ANFO, como la potencia, que disminuye con el contenido en agua, de forma parecida a la velocidad, así como el contenido en gases nocivos, especialmente los óxidos de nitrógeno, que aumentan con la cantidad en agua.

- **El diámetro**

La influencia del diámetro de los barrenos en la velocidad de detonación es importante, aumenta con el diámetro hasta un cierto valor, que es característico del tipo de nitrato amónico, por arriba del cual se mantiene constante.

Para valores al diámetro crítico, característico del tipo de nitrato amónico, la detonación no se puede mantener. En el caso del nitrato amónico poroso el diámetro crítico es de 40 ó 50 mm.

- **Propiedades adicionales**

El aspecto del ANFO es granular de aspecto similar al del NA con que ha sido fabricado. Tiene una potencia, de más de e 65% de la potencia de la goma pura que le hacen apropiado para un gran número de aplicaciones, especialmente para el arranque de rocas de dureza media, al agregarse aluminio aumenta el calor de explosión y la potencia.

La velocidad de detonación es de 2000 a 3000 m/s, en función del diámetro y el confinamiento, tiene una densidad de 0,8 a 1,0 g/cm³, en función del tipo de NA utilizado. El anfo tiene un diámetro crítico, que varía en función del tipo de NA utilizado en su fabricación que es superior a 45 mm de diámetro. Este explosivo es insensible al detonador # 8, mala resistencia al agua y muy insensibles a los estímulos accidentales, lo que asegura en manipulación.

1.1.6.2.2 Aplicaciones de las mezclas anfo

La potencia del anfo es alta con su gran fluidez que permite la carga a granel de los barrenos, que quedan llenos a toda sección con un buen acoplamiento entre el

explosivo y la roca. Debido a la seguridad en su manejo y bajo precio, comparado con otros explosivos, ha hecho que el uso de este producto se haya extendido en todas partes. Aunque tiene mala resistencia al agua y baja densidad, constituye más del 60% del consumo total de explosivos, principalmente en países de clima seco, como España, donde tiene un consumo mayor al 70%.



Figura 1. 5 Camión de Nagolita en labores de carga de barrenos de gran calibre (Cortesía UEE, S.A.)

Al combinarse su buen fluidez con su baja sensibilidad a los estímulos accidentales ha permitido el desarrollo de procesos que favorecen su carga mecanizada en los barrenos, lo que ayuda a la realización de voladuras de grandes

dimensiones. Debido a su densidad y potencia es el explosivo ideal para la carga de columna de los barrenos, pero su mala resistencia al agua lo limita en ciertos lugares con agua.

1.1.7 Hidrogeles

1.1.7.1 Análisis de las características y propiedades

El anfo con su baja densidad y velocidad de detonación, y su mala resistencia al agua, hacen que sea un explosivo inadecuado para muchas labores. Todo esto motivó la investigación de otros productos, de éstas investigaciones se descubrieron los hidrogeles por el Dr. Melvin Cook (llamado slurries, en inglés lodo). Por primera vez Cook preparó una mezcla explosiva con nitrato amónico, aluminio, agua y goma guar (agente gelificante y entrecruzante), logrando un producto resistente al agua, de elevada densidad y con una velocidad de detonación muy alta.

Estos explosivos llamados hidrogeles se caracterizan principalmente por tener una importante cantidad de agua en su composición, lo que constituye un hecho insólito en las formulaciones utilizadas hasta su aparición. Se forman dispersiones en las que la fase continua está formada por una solución acuosa saturada de nitrato amónico, con o sin otros oxidantes inorgánicos como nitrato sódico, perclorato sódico, etc. La fase dispersa está formada por combustibles sólidos y el

resto de los oxidantes sólidos que no han podido disolverse en la solución de oxidantes, además, pueden contener sustancias explosivas como sensibilizantes. Estos explosivos llevan en su composición agentes espesantes y gelatinizantes, para estabilizar su reología, evitando la que los constituyentes se segreguen.

El hecho de contener cantidades de agua elevadas se compensa por permitir un contacto más íntimo entre oxidantes y combustibles que cuando el explosivo es una mezcla de sólidos.

La dispersión de oxidantes y reductores en la solución saturada de oxidantes, se espesa, gelatiniza y estabiliza, por medio de diversas sustancias químicas, logrando una consistencia viscosa, más o menos fluida, que permite rellenar perfectamente los recipientes que las contienen.

Los hidrogeles tienen características muy variadas, que van desde elevada potencia y densidad, sensibilidad al detonar y buena velocidad de detonación, etc. de esta forma se pueden obtener productos cuyas potencias relativas varían del 40% al 85% de la goma pura y velocidades de detonación que van de 2000 m/s a 5000 m/s. La sensibilidad de los hidrogeles puede variar desde los que pueden ser iniciados con un detonador # 8 hasta otros muy insensibles, que requieren el uso de un multiplicador para que su iniciación sea apropiada. Además, tienen una buena resistencia al agua contraria a lo que ocurre con el anfo.

1.1.7.2 Clases de hidrogeles

Se tiene tres tipos de hidrogeles:

- a) Sensibilizados con una sustancia explosiva.
- b) Sensibilizados con aluminio.
- c) Sensibilizados con nitrato de amina.

a) **Hidrogeles sensibilizados con explosivos**

Constituyen los preparados por Cook y se caracterizan por estar sensibilizados por una sustancia básicamente explosiva, normalmente TNT, PETN o una mezcla de ambos, o también se ha utilizado pólvoras de nitrocelulosa.

Lo que ocurre en las mezclas explosivas convencionales es diferente a la sensibilidad de estas composiciones que aumenta con el tamaño de las partículas de TNT. Esto puede explicarse por el efecto insensibilizador del agua sobre la superficie de las partículas de TNT.

De manera inversa a lo que ocurre con el resto de los hidrogeles, su sensibilidad aumenta con la densidad. Esto es debido a la disminución de la densidad que está

relacionada con la cantidad de burbujas de aire taponado en la pasta y éstas se interponen entre los granos del explosivo sensibilizador, por lo que dificulta la iniciación de estas partículas por otras del mismo tipo.

La sensibilidad de los hidrogeles aumenta con el contenido en TNT, siendo válida esta afirmación hasta un contenido de este producto del 50%, estos hidrogeles no son sensibles al detonador.

Debido a razones de económicas, el contenido de TNT no sobrepasa el 30%, por cuyo motivo los diámetros críticos de los hidrogeles sensibilizados con trilita eran superiores a 75 mm en la mayoría de los casos, que es una limitación de este tipo de hidrogeles.

Las características de este tipo de hidrogel son:

- Alta densidad (1,4 – 1,5 g/cm³).
- Buena fluidez, permite la carga a granel de los barrenos.
- Baja energía, con un gran diámetro crítico y coste relativamente alto, lo que su uso ha decrecido.

b) Hidrogeles sensibilizados con aluminio

Son hidrogeles, también desarrollados por Cook en las primeras experiencias con slurries, pero, por ser este elemento muy electronegativo, reaccionaba con el agua a temperatura ambiente desprendiendo hidrógeno, con elevación de la temperatura. Lo que ocasionaba un riesgo, razón por la cual fue preciso sensibilizar los hidrogeles con otras sustancias explosivas. Luego se descubrió que esta reacción podía inhibirse recubriendo las partículas de aluminio con productos hidrófugos, se lo utilizó como sensibilizador.

Con la finalidad de mejorar más la sensibilidad de estos hidrogeles, Cook incluyó pequeñas burbujas de gas distribuidas en su masa que se comportan también como puntos calientes al igual que las partículas de aluminio; la sensibilidad aumenta con el contenido en gas. Se puede lograr este efecto mediante la adición de microesferas huecas de vidrio o perlita.

Algunas características de este tipo de hidrogel son:

- Se sensibilizan con el detonador # 8, incluso en diámetros pequeños (32 mm).
- Al gasificarse tienen una viscosidad y fluidez inferior a los del grupo anterior, para poder retener las burbujas, esto impide su carga a granel en los barrenos. Cuando contienen microesferas de vidrio, su fluidez puede ser mayor, permitiendo entonces la carga a granel de los barrenos.

- Tiene un pequeño contenido de gases nocivos en sus productos de explosión, lo que los hace aptos para su uso en labores de minería subterránea.

c) Hidrogeles sensibilizados con nitrato de amina

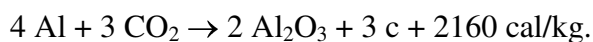
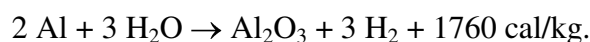
Este tipo de hidrogeles sensibiliza con combustibles constituidos por sales orgánicas solubles en agua, sin que contengan, al igual que los de la segunda generación, ningún otro componente explosivo. Con la finalidad de mejorar su sensibilidad y poder ser usado en pequeños diámetros, estos hidrogeles también necesitan microesferas de vidrio bien de burbujas de gas. También puede llevar en su composición aluminio grado pintura, lo que contribuye a mejorar su sensibilidad de buena forma.

Son sensibilizados con una sal orgánica, por lo que, al igual que los del grupo anterior, no tienen ningún ingrediente explosivo. Tienen una excelente aptitud a la detonación y son sensibles al detonador # 8 y pueden utilizarse en cartuchos de hasta 22 mm de diámetro, son muy utilizados en diámetros pequeños.

Si son gasificados son pocos fluidos, lo que no permite su carga a granel en los barrenos, pudiéndose conseguir composiciones más fluidas utilizando microesferas de vidrio para su sensibilización, lo que facilita la carga a granel de los barrenos.

Los hidrogeles sin explosivos en su composición se caracterizan por la elevada seguridad en su fabricación y utilización, buena propagación de la detonación, incluso en pequeños calibres, posibilidad de modificar su densidad, potencia y velocidad de detonación, buenos humos de voladura y excelente resistencia al agua.

La presencia de agua influye en la energía desprendida por el explosivo, pero se puede compensar añadiendo aluminio, debido a las siguientes reacciones, fuertemente exotérmicas, producidas por este componente en la detonación:



Lo que explica que la potencia aumente con el contenido en aluminio, aun en composiciones con balance de oxígeno negativo.

En la práctica los hidrogeles pueden sustituir, en la mayoría de los casos, a los explosivos convencionales, menos a los de seguridad, con la ventaja de su mayor seguridad en el manejo y no causar dolores de cabeza. Debido a su consistencia física, se adaptan muy bien a los barrenos, además, sus humos de voladura son mejores que los producidos por los explosivos convencionales.

1.1.7.3 Sensibilidad de los hidrogeles

Se puede definir la sensibilidad como la relativa facilidad de un explosivo para detonar. Una elevada sensibilidad supone una ventaja de cara al funcionamiento del explosivo en su aplicación, pero, a su vez, puede implicar riesgos a detonar bajo cualquier estímulo accidental.

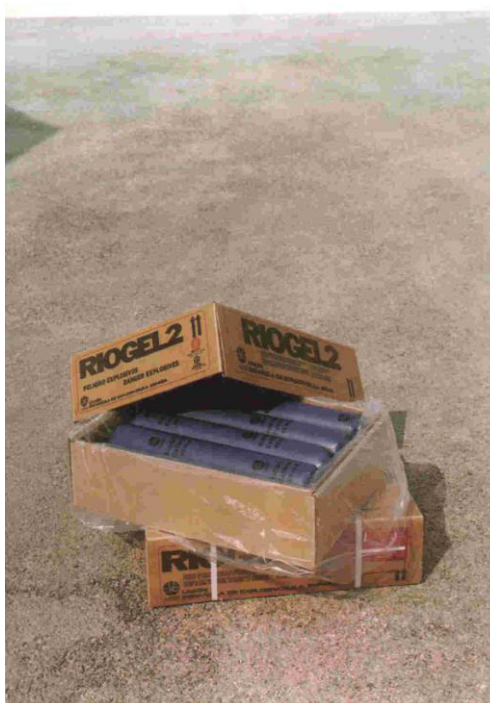


Figura 1. 6 Riogel 2 en mediano calibre (Cortesía de UEE, S.A.)

En el caso de los hidrogeles, también de las emulsiones, el camino ha sido el diferente, se parte de componentes no explosivos, insensibles, mezclándolos de tal modo que se alcance el grado de sensibilidad requerido para que sean sensibles al

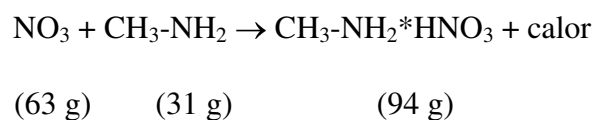
detonador o a un multiplicador. Con esto se logra la sensibilidad deseada, reduciendo así la sensibilidad indeseada por golpes, fuegos, rozamiento, etc.

La disminución de la sensibilidad, representada por el aumento del diámetro crítico, al aumentar la densidad, como resultado de la disminución de la porosidad ya sean burbujas o microesferas que constituyen puntos calientes. El resultado de una mala iniciación y transmisión de la detonación al aumentar la densidad se explica con una disminución de la velocidad de detonación.

1.1.7.4 Descripción del proceso de fabricación de los hidrogeles

La mayoría de los hidrogeles utilizan en su composición, como combustible sensibilizador, nitrato de monometilamina (NMMA). Al utilizarse este producto la ventaja es que, al ser soluble en agua, permite un contacto más íntimo entre el combustible y la solución de oxidantes que al utilizar combustibles sólidos.

Se logra obtener el nitrato de monometilamina ($\text{CH}_3\text{-NH}_2\text{*HNO}_3$) a partir de la monometilamina ($\text{CH}_3\text{-NH}_2$), que es un producto gaseoso en condiciones normales. Esta es una simple reacción de neutralización con ácido nítrico, similar a la de éste con el amoníaco para formar nitrato amónico:



Cuyo rendimiento es de $94/31 = 3,03$ g de nitrato de monometilamina por gramo de monometilamina.

Se utiliza ácido nítrico diluido, por cuyo motivo se obtiene una solución acuosa de nitrato de monometilamina, ya que este producto es muy soluble en agua. El producto de nitrato de monometilamina puro es un sólido, cuyo peso molecular es 94,1 y cuya energía de formación es 861 kcal/kg, que se funde a los 111 °C y su densidad es de 1,251 g/cm³.

La monometilamina en estado seco es explosivo, aunque muy insensible, pero no se inicia con el martillo de 5 Kg a la altura máxima de caída. Para ser iniciado da un ensanchamiento Trauzl de 325 cm³. Este es higroscópico y delicuescente, disolviéndose en el agua que absorbe del ambiente. En estado húmedo es muy difícil de hacer detonar, considerándose como no explosivo cuando el contenido en agua supera al 14%.

Pese a que puede fabricarse a partir de soluciones acuosas de monometilamina, este proceso necesita la concentración del producto obtenido, por lo que el procedimiento de fabricación más utilizado es a partir de monometilamina anhidra. Se hace borbotar en un reactor, lleno de ácido nítrico, gas de monometilamina, alcanzándose una solución acuosa de nitrato de monometilamina cuya concentración depende de la del ácido nítrico. Cuando el pH de la solución se acerca a 7, la reacción se da por terminada. En el reactor se

tiene un agitador que permite homogeneizar su contenido y aumentar el contacto entre las fases líquida y gaseosa, y un sistema de refrigeración, ya que la reacción es fuertemente exotérmica, lográndose tener la temperatura de la reacción entre 60 y 80 °C. Por lo que la reacción se lleva controlando cuidadosamente la temperatura y el pH.

Con una concentración de la solución de nitrato de monometilamina del 84 al 86% se tienen buenos resultados, ya que representa la máxima concentración no explosiva, esto permite disponer de una mayor cantidad de agua para la solución de oxidantes. Si la solución de nitrato de monometilamina del 86%, es preciso mantenerla por encima de los 38 °C para conservarla en estado líquido.

Para la fabricación de los hidrogeles o “slurries” sensibilizados con nitrato de monometilamina se basa en la mezcla de una solución acuosa de oxidantes, nitratos sólidos, mezclas de combustibles y aditivos líquidos

Cuando se tiene la mezcla, se descarga a una tolva desde la que se bombea a la línea de encartuchado, luego los cartuchos se colocan en cajas y se envían a los polvorines. La fase de fabricación comienza con la preparación y acondicionamiento de los componentes que se van a ser dosificados a la mezcladora.

Al emplear nitrato de monometilamina con concentraciones del 84% al 86%, su punto de cristalización es de 33 a 39 °C, debido a esto hay que mantener la solución por arriba de esta temperatura para mantenerla en estado líquido.

La solución de oxidantes es una solución de nitratos amónico y sódico en agua; contiene casi toda el agua y la mayor cantidad de sales del producto final. Además, se añade a esta solución parte de las gomas para disponer de un sistema muy viscoso, que evite la segregación de los ingredientes sólidos después de la mezcla.

La sensibilización de los hidrogeles se hace con gasificación química, se añade tiourea a la solución para acelerar la reacción de gasificación y no alargar el proceso.

Para la operación de mezclado se realiza de forma continua o discontinua en una mezcladora dotada de un agitador con velocidad variable, para utilizar la más apta para cada formulación específica.

Para el mezclado se inicia adicionando a la mezcladora los aditivos líquidos ya mencionados, añadiéndose a continuación los componentes sólidos. Los componentes sólidos previamente mezclados, se alimentan a la mezcladora mediante un dosificador, o bien pesándolos automáticamente en las cantidades adecuadas a una operación de mezclado.

A continuación el producto mezclado se descarga por gravedad en una tolva que alimenta a la bomba que lo impulsa al sistema de encartuchado.

Para el encartuchado se emplea un sistema automático; se realiza en una máquina que forma un tubo a partir de un filme de polietileno o poliéster. Este filme se suelda longitudinalmente por calor o por medio de un adhesivo apropiado.

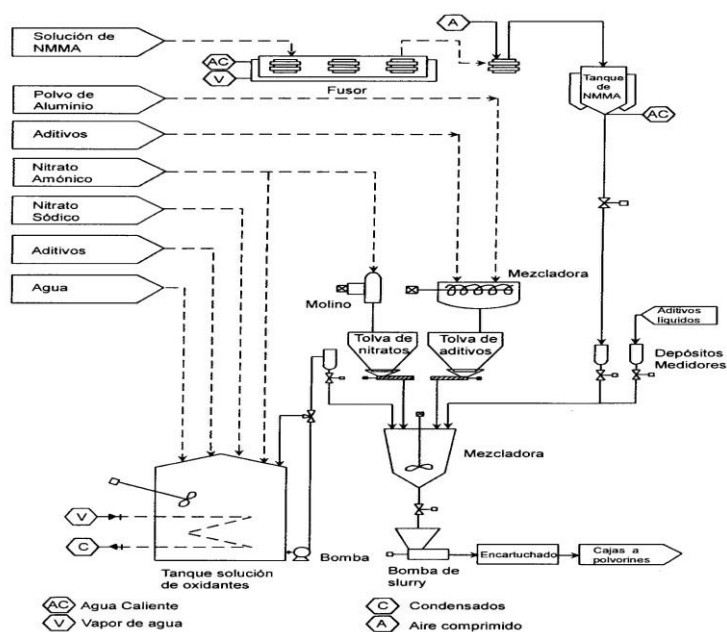


Figura 1. 7 Esquema de Fabricación de Hidrogeles (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

La dosificación del hidrogel se hace en el interior del tubo de forma continua, por medio de una bomba dosificadora de desplazamiento positivo cuyo caudal se acomoda en función del diámetro y de la velocidad lineal de formación del tubo plástico. La función de un cabezal móvil es de grapar doblemente el tubo, mientras lo acompaña, cortando el plástico entre el doble grapado.

1.1.8 Emulsiones

1.1.8.1 Análisis de las características y propiedades

La emulsión se define como una dispersión estable de dos fases líquidas inmiscibles entre sí, en la que una de ellas se dispersa en forma de pequeñas gotas en la otra, una de las fases en la mayoría de los casos es agua.

La formación de emulsiones con líquidos inmiscibles puros se requiere la presencia de un agente emulsificante o emulgente y de una gran agitación mecánica.

Un agente emulsificante es un producto que se posicionan frecuentemente en la interfase de los dos líquidos inmiscibles disminuyendo su tensión interfacial y permitiendo que se forme la emulsión cuando se da un buen grado de agitación.

Al producirse una emulsión siempre hay una fase continua en la que se distribuyen las gotas del otro líquido inmiscible, que constituye la fase dispersa.

Cuando la emulsión se ha formado, la repulsión electrostática contribuye a mantener separadas las gotas, lo que estabiliza la emulsión.

En la medida que las gotas de la fase dispersa son menores, será mucho mayor la superficie de contacto entre los dos líquidos. La consecuencia del diámetro de las gotas sobre la superficie de contacto expresado en metros cuadrados / gramo de fase dispersa se muestra en el siguiente cuadro.

ϕ (mm)	m ² /g de fase dispersa
1	0,006
0,1	0,06
0,01	0,6
0,001	6
0,0001	60
0,00001	600

Tabla 1. 1 Efecto del diámetro de las gotas de la fase dispersa (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

Una emulsión tiene viscosidad que está influida por la proporción de la fase dispersa, de la emulsión y por el tamaño de las gotas. En el momento que el volumen total de la fase dispersa aumenta y el tamaño de las gotas disminuye aumenta la viscosidad de la emulsión, variando entre la de un líquido poco viscoso y la de una grasa espesa. Las gotas en las emulsiones explosivas tienen un tamaño micras. Además, tiene influencia en la viscosidad la naturaleza de la fase continua y del agente que realiza el papel de emulsificante.

Las emulsiones explosivas de agua en aceite se caracterizan por tener un contacto íntimo entre combustibles y oxidantes, lo que permite convertir el sistema en explosivo. Poseen una buena resistencia al agua, al quedar recubiertas las gotas de la solución de oxidante por una capa de envolvente continua de la fase aceite que las impermeabiliza y evita su disolución en el agua que se encuentra en el interior del barreno. Además, poseen un sistema de espesamiento simplificado, al no tener que usar gomas ni féculas, que requieren hidratación y tienen un precio elevado.

En los emulsificantes, se debe lograr la proporción de aceite/emulsificante según las características que se deseen en la emulsión final y el tipo de emulsificante utilizado. La proporción es de 2:1 a 3:1, si la proporción de emulsificante es inferior puede haber rechazo de aceite.

Mediante las emulsiones explosivas se pueden crear productos que pueden sustituir favorablemente a los explosivos gelatinosos y a los hidrogeles en todas las situaciones.

1.1.8.2 Anfo denso (heavy anfo)

Las emulsiones pueden mezclarse con el anfo en todas las proporciones lo que constituye una de las características más importantes de este tipo de explosivo.

Cuando se rellenan los intersticios de los granos de anfo con emulsión se obtiene un producto con mayor densidad, de ahí su nombre. Si la proporción de emulsión es enormemente elevada, la emulsión recubre los granos de nitrato amónico, impermeabilizándolos, lo que mejora su resistencia al agua, superando así el anfo denso los dos inconvenientes más importantes del anfo.

El resultado de estas mezclas es obtener productos cuyas propiedades varían entre las del anfo y las de las emulsiones, en función de la proporción entre ellos. De donde se obtiene una gran variedad de productos que van desde aquellos con baja densidad, velocidad de detonación y resistencia al agua, si la proporción de emulsión es pequeña, hasta los de elevada densidad, velocidad de detonación y resistencia al agua, si la proporción de emulsión es alta. Estas mezclas son tan seguras en su manipulación como cada uno de sus ingredientes por separado, lo que permite su empleo a granel y la carga mecanizada de los barrenos en una voladura. Por lo que estos productos explosivos son muy utilizados actualmente en todas partes.

La densidad aumenta desde la emulsión al añadir anfo, a pesar de la menor densidad de éste; lo que resulta porque el nitrato amónico en prills del anfo actúa como sensibilizante de la mezcla, requiriéndose una menor proporción de microesferas o gasificación. Como resultado se tiene que la energía por unidad de volumen aumenta mucho.



Figura 1. 8 Riomex E 20 en mediano calibre. (Cortesía de UEE, S.A.)

1.1.8.3 Descripción del proceso de fabricación de las emulsiones

El proceso de fabricación convencional de los hidrogeles consta de cuatro fases:

- a) Preparación de la emulsión básica.
- b) Refino de la emulsión básica.
- c) Mezclado de la emulsión básica con otros productos sólidos para la obtención del producto final.
- d) Encartuchado del producto final.

a) Preparación de la emulsión básica

La preparación de la emulsión básica es a partir de una fase acuosa oxidante, una fase orgánica reductora y un agente que sirve de emulsificante.

Consta la fase oxidante acuosa de una solución de sales inorgánicas en agua. Entre las sales predomina el nitrato amónico, y se disuelven en agua por medio de agitación y calefacción, formando una solución concentrada y caliente de 80 a 90 °C de temperatura.

En la fase orgánica reductora suelen estar presentes gasóleo, parafinas y otros aceites minerales, a los que se adicionan los agentes emulsificantes.

Las dos fases que son dosificadas en proporciones adecuadas, se bombean a un agitador donde se prepara una emulsión grosera. En este proceso se produce una rápida agitación fuerzas de cizalladura elevadas que rompen la interfase de los líquidos inmiscibles, formando gotas de la fase acuosa que se dispersan en la fase oleosa, que forma la fase continua. La operación puede producirse en forma discontinua o por medio de un mezclador continuo.

b) Refino de la emulsión

El objetivo del refinado de una emulsión es reducir el tamaño de las gotas de la fase acuosa, desarrollando su estabilidad y homogeneidad, incrementando al mismo tiempo su sensibilidad, al permitir un contacto mejor entre el combustible y el oxidante.

El proceso utilizado consiste en hacer pasar la emulsión por un molino coloidal, el mismo que tiene un rotor troncocónico que gira a gran velocidad en el interior de un cilindro o estator, ambos son de acero inoxidable

c) Mezclado de productos sólidos con la emulsión

Cuando se tiene la emulsión refinada o emulsión matriz, se pueden adicionar a ella algunos ingredientes sólidos, como aluminio, agentes reductores de densidad que pueden ser microesferas de vidrio, etc., para darle al producto propiedades especiales, sin que se cambie la consistencia gelatinosa del producto final. El proceso se realiza en una mezcladora horizontal, a la que se lleva la emulsión mediante bomba dosificadora, o por gravedad desde el molino coloidal, quedando el producto final preparado para que sea encartuchado.

d) Encartuchado y embalaje

Este proceso es semejante al de los hidrogeles.

e) Emulsiones a granel

De igual forma que las emulsiones encartuchadas se las puede utilizar a granel, por lo que es una de las características más interesantes de estos productos. También las emulsiones se bombean en los barrenos desde camiones cisterna, lo que facilita la carga de los mismos, desde barrenos de 50 mm de diámetro.

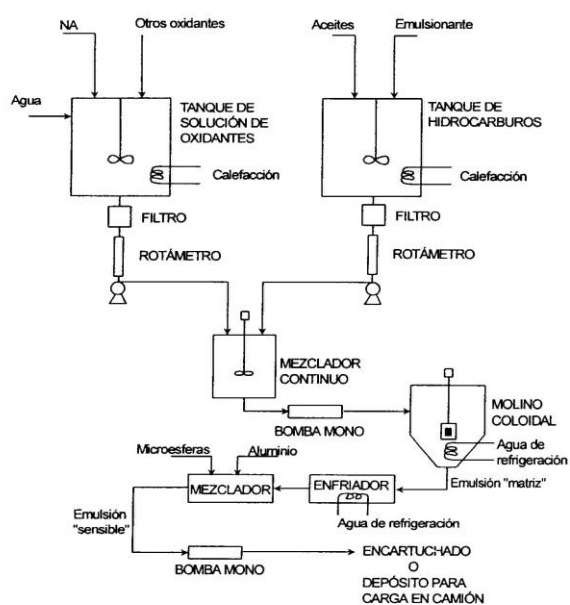


Figura 1. 9 Proceso de fabricación de emulsiones explosivas (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

1.1.9 Explosivos de seguridad

Por el peligro de explosiones en las minas de carbón debido a mezclas metano / aire o polvo de carbón / aire obliga a una infinidad de precauciones en minería. Los equipos y materiales, desde lámparas a motores eléctricos, y principalmente

los explosivos, deben estar diseñados para minimizar el riesgo de dichas explosiones, que casi siempre son desastrosas. Influyen muy también los procedimientos de trabajo y las normas a aplicar son específicos de este tipo de trabajos mineros.

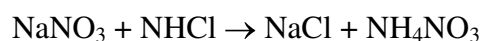
Todos los países tienen un reglamento de normativa para minería de carbón, que obliga a llevar a cabo pruebas especiales a todos los materiales empleados en estas labores. Los explosivos deben tener unas características especiales para poder ser utilizados en minas de carbón; dichas características, consistentes principalmente en su baja capacidad de inflamación de grisú y polvo de carbón, son verificadas de forma minuciosa por laboratorios oficiales mediante amplias baterías de ensayos antes de ser autorizados para que puedan ser utilizados. En España se denominan a estos explosivos como explosivos de seguridad.



Figura 1. 10 Galería de pruebas para explosivos de seguridad. Campo de tiro de ATXE (Cortesía de UEE, S.A.)

Los explosivos de seguridad se clasifican en dos grupos. En el primero en su composición se encuentra un aditivo que tiene el papel de inhibidor de la explosión, comúnmente cloruro sódico, que según su granulometría, porcentaje, etc., aumenta con mayor o menor intensidad el grado de seguridad frente a una atmósfera potencialmente inflamable.

En el segundo grupo, recientemente elaborado se los denomina de Seguridad Reforzada o de Intercambio Iónico, consiguen rebajar la temperatura de explosión mediante diversos ingredientes que al reaccionar en el momento de la detonación forman al inhibidor en ese mismo instante. Son explosivos que suelen estar constituidos por un pequeño porcentaje de NG, un combustible, y el par salino nitrato sódico-cloruro amónico. Tienen la reacción siguiente:



En la reacción se nota que el nitrato amónico actúa después como oxidante y el cloruro sódico en estado naciente tienen gran poder refrigerante, que es muy mayor que en los explosivos de seguridad tradicionales.

Aunque un cartucho de explosivo de intercambio iónico detona al aire o bajo condiciones de confinamiento débiles, los resultados que tienen lugar son la descomposición explosiva de la nitroglicerina y la acción inhibidora del cloruro amónico ya que no se produce la reacción del par salino. De todas maneras se

evita la deflagración que sería muy peligrosa en una atmósfera inflamable como grisú.

Los explosivos de seguridad tienen las siguientes características una potencia media o baja, velocidades de detonación entre 2000 y 4500 m/s, densidades entre 1 y 1,5 g/cm³ y mala resistencia al agua, que puede darse en algún caso.



Figura 1. 11 Cebado de un cartucho para voladura de arranque de carbón (Cortesía de UEE, S.A.)

1.1.10 Pólvora negra

La pólvora que se utiliza en minería no es un producto propiamente explosivo ya que su reacción deflagra en lugar de detonar. Tiene una característica importante este producto como es su gran volumen de gases de combustión. La pólvora es una mezcla que tiene la siguiente composición: Nitrato Potásico (75%), Azufre (10%) y Carbón (15%). Por lo general siempre granulada y grafitada que por su

carácter conductor evita la formación de cargas electrostáticas y, además, aporta una acción lubricante con lo que se logra una buena fluidez. Tiene dimensiones que oscilan entre 0,1 mm y 4 mm y envasada generalmente en bolsas de 1, 2,5 y 5 Kg.

La pólvora de mina provoca la rotura en la roca por empuje de sus gases, y no por el efecto rompedor de la onda de choque, además, tiene una alta temperatura de combustión.

Tiene una velocidad de reacción baja comparada con las velocidades de detonación de los explosivos de uso industrial. En ciertos calibres y debidamente confinada puede alcanzar los 5000 m/s de velocidad de detonación.

Desarrolla una potencia respecto a la goma pura del orden del 28%, y la energía específica de 23800 kgm/kg, con una temperatura máxima de unos 200 °C, pero tiene un inconveniente pues es muy mala la resistencia al agua.

La pólvora de mina es muy sensible al rozamiento por lo que necesita guardar las pertinentes medidas de seguridad en su manipulación. La iniciación de la pólvora no precisa del uso de un detonador, sino que basta con la acción de una llama o chispa como la que produce la mecha lenta. También se suele utilizar combinadas con el cordón detonante, siendo este un buen iniciador.

Los humos que se producen en la combustión de la pólvora son tóxicos, por lo que debe ventilarse adecuadamente en las aplicaciones de minería subterránea principalmente.

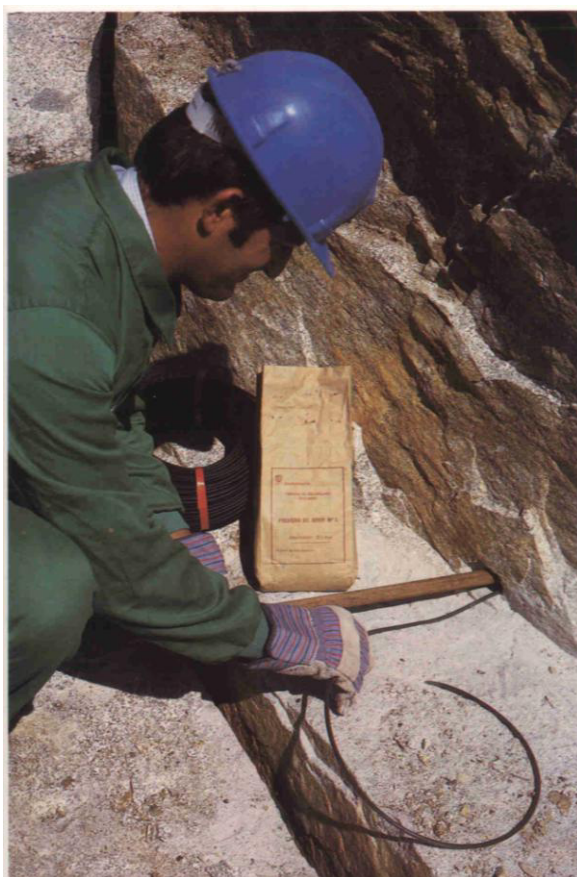


Figura 1. 12 Carga de barrenos para extracción de rocas ornamentales mediante pólvora de mina y mecha lenta (Cortesía de UEE, S.A.)

Actualmente las aplicaciones de la pólvora negra han quedado reducidas a la extracción de bloques de roca ornamental tales como granitos, mármoles, pizarras, etc., y al arranque de materiales muy elastoplásticos como los yesos. Todos estos rompen mejor bajo el efecto continuado de los gases que por una tensión puntual

instantánea. Con lo que se aprovecha el gran empuje de los gases más que el efecto rompedor que es bajo.

1.1.11 Explosivos utilizados en Ecuador

En Ecuador la empresa que fabrica y comercializa explosivos para minería es EXPLOCEN. Entre los explosivos que produce tenemos:

- **Dinamitas**

Dentro de este tipo de explosivos se tiene:

Dinamita gelatinosa: Dinamita Sísmica (Normal y Dirigida) y Dinamita

Semigelatinosa que comprende Explogel Amon, Explogel I, Explogel III y De contorno

- **Anfo**

Anfo Normal

Anfo aluminizado

TIPO DE EXPLOSIVO	DIAMETRO mm	LONGITUD mm	PESO APROX. G.	TIPO DE ENCARTUCHADO
Goma 1E-D	22	200	110	Papel parafinado
	26	200	150	Papel parafinado
Goma 2E-C	26	400	300	Papel parafinado
	29	200	175	Papel parafinado
	32	200	235	Papel parafinado
	40	240	420	Papel parafinado
	45	400	850	Papel parafinado
Goma 2E-C	50	450	1.250	Plástico flexible
	55	390	1.250	Plástico flexible
	65	530	2.500	Plástico flexible
	75	400	2.500	Plástico flexible
	80	440	3.125	Plástico flexible
	85	520	4.166	Plástico flexible
	85	620	5.000	Plástico flexible
Explosivos para Prospecciones sísmicas: Goma 2E-C Jumbo 40/70 Riogel Jumbo 40/70	50	450	1.000	Encartuchado "Jumbo" en Plástico rígido roscable
	55	450	1.000	
	65	200	500	
	65	365	1.000	
	65	620	2.000	
Amonita 2-I	26	200	120	Papel parafinado
Ligamita 1	32	200	175	Papel parafinado
Explosivo de seguridad n° 9	26	200	156	Papel parafinado
	32	200	220	Papel parafinado
Permigel 1	26	250	152	Plástico flexible
	29	250	187	Plástico flexible
	32	250	227	Plástico flexible
	32	200	200	Papel parafinado
Explosivo de seguridad n° 20 SR	26	200	130	Papel parafinado
Explosivo de seguridad n° 30 SR	32	200	200	Papel parafinado
Nagolita	55	526	1.000	Plástico flexible
	65	524	1.390	Plástico flexible
	75	443	1.565	Plástico flexible
	85	459	2.083	Plástico flexible
	125	509	5.000	Plástico flexible
Nagolita Alnafo Naurita	A granel	Sacos de plástico de 25 Kg.		
Riogel 2	26	250	152	Plástico flexible
	32	250	227	Plástico flexible
	40	350	521	Plástico flexible
	45	500	781	Plástico flexible
	50	500	1.190	Plástico flexible
	55	500	1.389	Plástico flexible
	65	535	2.083	Plástico flexible
	75	500	2.500	Plástico flexible
	85	500	3.125	Plástico flexible
	110	500	5.000	Plástico flexible

TIPO DE EXPLOSIVO	DIAMETRO mm	LONGITUD mm	PESO APROX. G.	TIPO DE ENCARTUCHADO
Riogel 2	125	535	7.000	Plástico flexible
	140	540	10.000	Plástico flexible
	160	500	11.000	Plástico flexible
	200	380	11.667	Plástico flexible
Riogur R	18	500	250(1)	Vaina rígida con manguitos de acoplamiento con aletas
Riogur F	17	80 m	250(1)	Manguera flexible
	22	60 m	418(1)	Manguera flexible
Riomex E 20/24	26	250	155	Plástico flexible
	32	250	230	Plástico flexible
	40	350	500	Plástico flexible
	55	500	1.389	Plástico flexible
	65	535	2.083	Plástico flexible
	85	500	3.125	Plástico flexible
Riomex V 20/24	A granel	Carga mecanizada		
Riomex V 150/154	A granel	Carga mecanizada		
Emunex 3.000	A granel	Sacos de plástico de 25 Kg ó carga mecanizada		
Em2unex 6.000/7.500/8.000	A granel	Carga mecanizada		

Tabla 1. 2 Pesos y Medidas de los explosivos encartuchados

(1) Pesos indicados por metro lineal de explosivo.

(a) Tomado del Manual de empleo de explosivos, UEE, S.A.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPLOSIVOS

Las sustancias explosivas mezcladas, unas oxidantes y otros combustibles, en diferente proporción constituyen los explosivos industriales, que al ser iniciadas producen una reacción química que da lugar a la producción de gases a alta temperatura y presión.

Dado que existen explosivos con composiciones específicas colocado en un barreno en forma de cartucho o a granel y con diferente confinamiento, lo que

supone que sus características son diferentes. Esto da como resultado que para aplicación específica se elija un tipo de explosivo de acuerdo a las necesidades particulares de cada persona.

Las características básicas de un explosivo son:

- Potencia explosiva.
- Poder rompedor.
- Velocidad de detonación.
- Densidad de encauchado.
- Resistencia al agua.
- Humos.
- Sensibilidad.
- Estabilidad química.

1.2.1 Potencia Explosiva

La potencia explosiva se puede definir como la capacidad que posee el explosivo para quebrantar y proyectar la roca, que está de acuerdo con su energía utilizable. La composición del explosivo va a ser la que determine esta característica que se puede aprovechar con un buen diseño de perforación y voladura. Para medir la potencia de un explosivo se emplean con mayor frecuencia:

- Péndulo balístico.
- Energía relativa por unidad de peso y de volumen.

El método del péndulo balístico mide la potencia de un explosivo en tanto por ciento relativo a la goma pura, se toma como base asignándole un valor de 100%.

Para medir la Energía Relativa por unidad de peso y de volumen se utilizan explosivos que son insensibles al detonador, es decir, que necesitan de iniciadores de alto poder explosivo. La potencia se define por:

- AWS: Energía absoluta por unidad de peso (cal/g)
- ABS: Energía absoluta por unidad de volumen(cal/cm³)

Una vez obtenido estos valores se calculan la Energía Relativa por unidad de peso (RWS) y por unidad de volumen (RBS) respecto al ANFO que se definen por las relaciones:

$$RWS = (AWS/AWS \text{ Anfo}) * 100$$

$$RBS = (ABS/ABS \text{ Anfo}) * 100$$

La última relación es la que mejor calcula el poder energético del explosivo en el barreno, dando de esta manera valores más cercanos a la realidad.



Figura 1. 13 Potencia Explosiva. Péndulo Balístico (Cortesía de UEE, S.A.)

1.2.2 Poder rompedor

El poder rompedor es una característica del explosivo que nos indica la capacidad de fragmentar un material, creando nuevas fisuras debida a la onda de detonación, y no al conjunto de la onda de detonación.

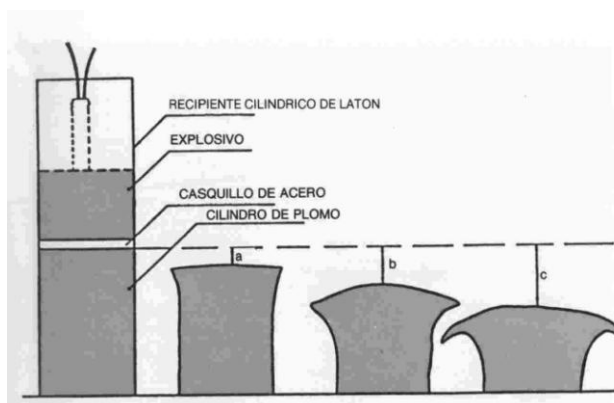


Figura 1. 14 Poder Rompedor, Método de Hess (Cortesía de UEE, S.A.)

También de notarse que ésta característica es fundamental para explosivos no confinado, cuyos gases no pueden ejercer grandes presiones como sucede en cargas huecas y de las cargas para taqueo. El método de Hess determina bien ésta característica.

1.2.3 Velocidad de detonación

El poder rompedor esta relacionado con la velocidad de detonación, ya que al aumentar la densidad de un explosivo también lo hace la velocidad de detonación y a su vez la presión de detonación.

Al detonar una fila de cartuchos de explosivo colocados en contacto, se provoca la transformación del explosivo en un gran volumen de gases a elevada temperatura y gran presión de gases. Todo esto se desarrolla a una velocidad que se denomina velocidad de detonación, ésta se puede medir en metros por segundo.

En el momento de realizar una voladura se debe tener en cuenta que tipo de explosivo utilizar considerando ésta característica. Una detonación lenta nos dará como resultado unos fragmentos de roca grandes y por el contrario con una rápida detonación se tendrá pequeños fragmentos de roca que en muchos casos es perjudicial.

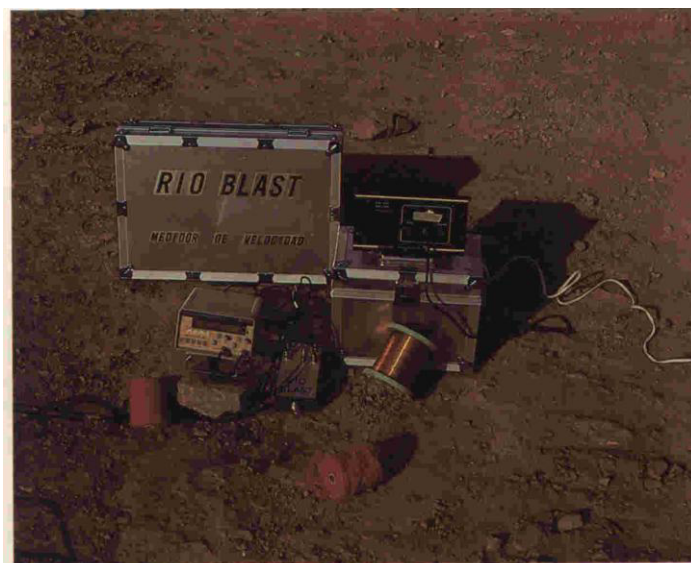


Figura 1. 15 Medidor de velocidad de detonación (Cortesía de UEE, S.A.)

1.2.4 Densidad de encartuchado

Es una característica positiva y muy importante de los explosivos industriales utilizados en minería. La composición del explosivo va a determinar su densidad y al ser mayor también lo será la concentración de carga en un barreno de diámetro empleado.

También, la densidad se toma en cuenta al cargar un barreno determinado en donde exista agua. En densidades inferiores a 1,1 donde existe agua la carga de explosivo flota dificultando de esta manera su llenado.

1.2.5 Resistencia al agua

La resistencia al agua es una característica por la cual un explosivo mantiene sus propiedades inalteradas durante un periodo de tiempo en contacto con la misma, esto debe ser sin necesidad de protección por algún material que lo cubra. Tenemos explosivos que resisten bien el agua como son los explosivos gelatinosos, hidrogeles y emulsiones, lo que hace necesario su empleo en barrenos que contienen agua.

La resistencia al agua de un determinado explosivo debe demostrarse al no disolverse y mantener sus características de encendido, sensibilidad y propagación de la detonación. Todo esto nos debe asegurar una buena voladura, para lo que se emplearán explosivos que cumplan todas estas exigencias.

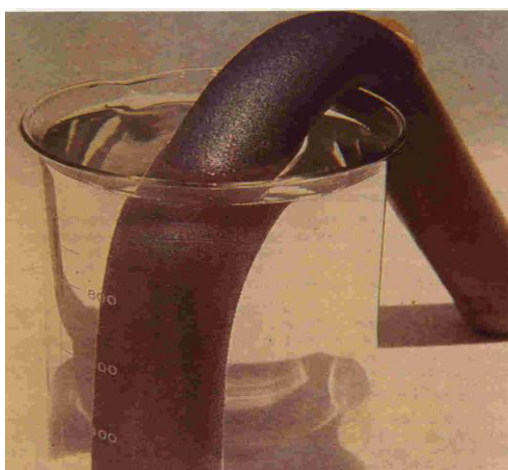


Figura 1. 16 Resistencia al agua (Cortesía de UEE, S.A.)

1.2.6 Humos

El conjunto de productos gaseosos resultantes de la reacción de detonación del explosivo se denomina humos, podemos citar algunos de ellos: vapores nitrosos (NO_x), vapor de agua, monóxido de carbono (CO), anhídrido carbónico (CO_2) y otros gases producto de reacciones de detonación.

En los últimos tiempos se han desarrollado explosivos de uso industrial cuya combustión y detonación no producen gran cantidad de gases nocivos, que sean perjudiciales a los seres vivos y al medio ambiente en general.

Sin embargo, la práctica se aleja mucho de lo teórico, ya que la producción de ciertos gases nocivos como (CO, NO_x ...) producidos en voladuras es grande lo que puede ocasionar malestar a las personas que se encuentren cerca de una explotación minera. Debido a esto se debe de tener una buena ventilación en caso de minería subterránea o esperar a que dispersen los gases en minería a cielo abierto.

1.2.7 Sensibilidad

Un explosivo desde su fabricación y carga en el barreno está sometido a golpes que pueden estimular su detonación. La sensibilidad de un explosivo es la mayor o menor grado de energía que hay que comunicarle para que se produzca la

explosión, su seguridad se tendrá cuando los estímulos para provocar su detonación sean elevados de acuerdo a la manipulación que vaya a tener.

Se tienen diferentes tipos de sensibilidad de los explosivos:

- Sensibilidad al detonador.
- Sensibilidad a la onda explosiva.
- Sensibilidad al choque y al rozamiento.

- **Sensibilidad al detonador.**

Para iniciar un explosivo industrial se emplea otro de elevada potencia de detonación provocando así su detonación. Para iniciarlo se puede colocar en un detonador, en cordón detonante, o en un multiplicador, que va a variar de acuerdo al tipo de cebado y material que se utilice.

Se tienen explosivos insensibles al detonador por lo que emplea un multiplicador que es un cilindro pequeño que contiene explosivo de elevada potencia, alta velocidad de detonación y que, además, sea sensible al detonador.

- **Sensibilidad a la onda explosiva**

Consiste en la capacidad de transmisión entre los cartuchos de explosivo, colocados en línea y uno a continuación del otro, y separados una determinada distancia lo que se puede llamar por simpatía.

Se determina esta característica con cartuchos situados, bien sobre placa de hierro o al aire. Si los resultados son buenos se obtendrán también buenos resultados en las voladuras, ya que al estar dentro de un barreno le da un buen ambiente de confinamiento para que se propaguen los gases producto de la reacción de detonación.

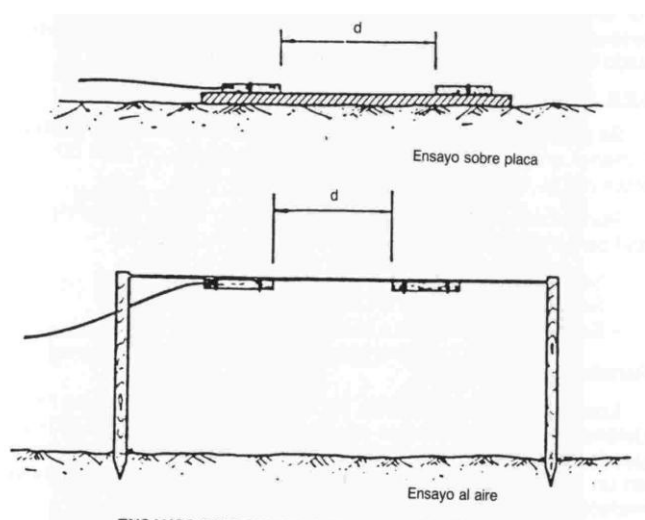


Figura 1. 17 Ensayos de sensibilidad a la onda explosiva (Cortesía de UEE, S.A.)

Esta característica de los explosivos no asegurarse su detonación en el caso de carga discontinua, es decir, cuando existen intervalos vacíos o inertes entre cartuchos. Por lo que se debe emplear cordón detonante o un sistema de iniciación

adecuado a lo largo de toda la carga. Además, al emplear espaciadores, éstos serán de material antiestático y que en ningún caso propague la detonación.

- **Sensibilidad al choque y al rozamiento**

Los explosivos industriales se inician a veces cuando son sometidos a la acción de impactos o fricción. La sensibilidad al choque de un explosivo se realizan ensayos normalizados que consisten en dejar caer un martillo sobre la muestra del explosivo situada en una superficie dura (yunque) y de esta manera se obtiene la altura de caída mínima que produce la detonación del explosivo.

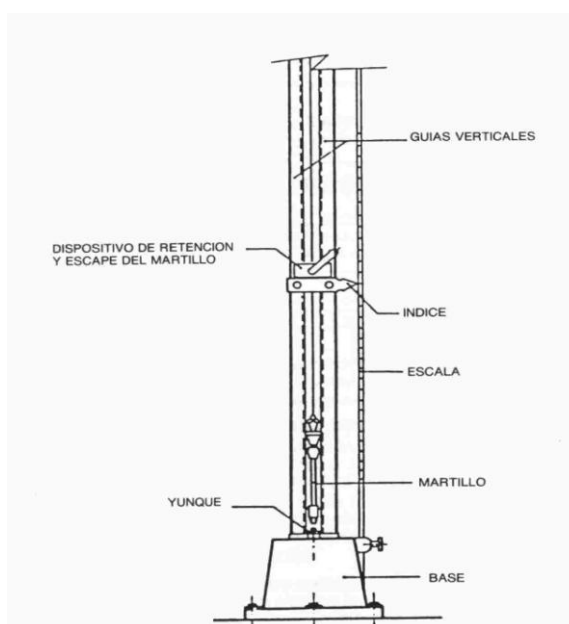


Figura 1. 18 Ensayo al martillo (Cortesía de UEE, S.A.)

La sensibilidad al rozamiento se prueba mediante el ensayo normalizado para valorar el rozamiento mínimo capaz de soportar el explosivo sin que se produzca su detonación. Se determina mediante ensayos, de manera que todos los explosivos soporten sensibilidades mínimas determinadas, para ello se hace rozar una muestra sobre una superficie áspera que puede ser porcelana sin barnizar.

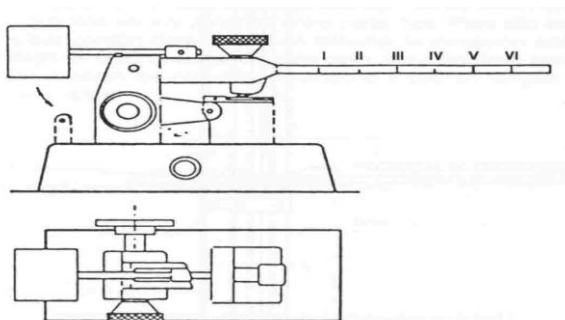


Figura 1. 19 Sensibilidad al roce (Cortesía de UEE, S.A.)

1.2.8 Estabilidad química

Un explosivo tiene estabilidad química cuando sus características son adecuadas para mantenerse químicamente inalterado a través de un tiempo determinada, también va a depender del sitio donde esté almacenado.

Se deben garantizar las condiciones de almacenamiento y el período del mismo dentro de ciertos parámetros, que aseguren su correcta utilización sin riesgo alguno para las personas que están en constante manipulación de explosivos.

Cuando se almacenan por mucho tiempo y en malas condiciones de humedad, temperatura y ventilación, los explosivos pueden verse afectados en sus características. Al notarse que está en malas condiciones debe procederse a su destrucción, lo cual se procede mediante ciertos parámetros de manejo de explosivos.

1.3 INICIACION DE EXPLOSIVOS

La iniciación de un explosivo es provocar la detonación del mismo, utilizando para ello sustancias que debido a la debilidad de sus enlaces químicos resultan altamente sensibles e inestables.

Los explosivos que son sensibles al detonador se la puede hacer mediante la introducción de un detonador en el interior de un cartucho. A éste lo llamaremos cartucho cebo, el mismo que estará en contacto con el resto de la carga, o adosando un cordón detonante a la carga explosiva, que se inicia con un detonador, transmitiendo la energía de detonación al explosivo y que proceda a su detonación.

La energía de iniciación en los explosivos que son insensibles al detonador debe ser grande, por esto se utilizan multiplicadores para provocar su detonación. Los multiplicadores son explosivos sensibles al detonador, de alta velocidad y energía

de detonación cordón detonante, los mismos que serán iniciados por un detonador o cordón detonante.

La iniciación en si tiene un carácter térmico, pues para que se produzca la detonación debe haber un aporte de energía para que active la reacción química. Por lo que un explosivo puede ser iniciado por impacto, mediante un choque, fricción o elevación de temperatura.

La iniciación por choque para explosivos homogéneos (nitroglicerina líquida, sin impurezas ni aire incluido) produce una elevación uniforme de la temperatura en la masa del explosivo (en toda la superficie del frente) producida por el choque, que es la explosión térmica. En explosivos heterogéneos, en explosivos industriales, en los que existe huecos y discontinuidades, no se produce la explosión térmica en masa, sino que la gran elevación de temperatura y subsiguiente explosión se concentra en puntos de los enlaces atómicos de las moléculas de los explosivos.

1.3.1 Descomposición y explosión térmica

La temperatura hace que las reacciones químicas aumenten rápidamente. Las sustancias reaccionantes en un explosivo se encuentran presentes en su propia composición, de manera que la reacción tendrá lugar en todo momento. En bajas temperaturas (temperatura ambiente), la reacción se desarrolla lentamente que los

explosivos son en la mayoría de las veces estables, cuyo deterioro se producirá en mucho tiempo. A altas temperaturas la reacción puede ser bien rápida, reaccionando la materia explosiva en fracciones de microsegundo, de allí que resalta la incidencia de la temperatura.

La masa de un explosivo se puede descomponer químicamente bien sea de forma homogénea, uniformemente en toda su masa, o de forma localizada en una zona en contacto con un medio caliente, que puede ser una llama o los propios gases de combustión. Esto crea la descomposición de esa parte, mientras el resto del material permanece estable y sin alteración.

Cuando se almacena un explosivo se produce su descomposición química, también puede crearse un calentamiento peligroso si la materia explosiva se mantiene a temperaturas elevada durante un periodo de tiempo apropiado para que se produzca la reacción de detonación. Por efecto de la combustión se produce la descomposición local o superficial, como por ejemplo un propulsor, o en la iniciación por choque y en la detonación de los explosivos al realizar trabajos de minería.

Para describir la velocidad de reacción de los explosivos la ley de Arruines, con la dependencia exponencial de ésta con la temperatura, señala el comportamiento “metaestable” de los explosivos. Sea r la velocidad de reacción:

$$r = -\frac{d\lambda}{dt} = \lambda^n Z e^{-\frac{E^*}{RT}}$$

En donde λ es la fracción másica de explosivo sin reaccionar, valor que va desde 1 a 0 al consumirse el explosivo. Siendo $e^{-E^*/RT}$ la constante de velocidad; Z es el factor de frecuencia o pre-exponencial y E^* la energía de activación; n se llama orden de la reacción de detonación.

1.3.2 Calentamiento local por choque: puntos calientes

Existe dependencia del tiempo de descomposición, vida media, con la temperatura. Con los parámetros de la velocidad de reacción utilizados, de nitroglicerina, se han extrapolado lejos de su intervalo de verdadero, por lo que en sus extremos de la curva, las vidas medias pueden diferir de sus valores reales varios órdenes de magnitud; a pesar de esto, la curva da la pauta de cómo la vida media disminuye significativamente con la temperatura, lo que quiere decir que la velocidad de descomposición de forma análoga se lleva de la misma forma.

También debe notarse que la nitroglicerina es muy estable, en estado puro, temperatura ambiente y con una vida media de millones de años; pero a 700 °C, la vida media alcanza un nanosegundo (o, un microsegundo). La onda de choque de la nitroglicerina, progresando a 7500 m/s (velocidad de detonación) produce una detonación en la nitroglicerina, antes de que esta reaccione, de unos 35 GPa,

dándole una velocidad de partículas, u , de unos 3000 m/s; la energía interna del material, antes de reaccionar, es igual a la energía cinética, $u^2/2$ que será de 4500 kJ/kg. Mientras que el calor específico de la nitroglicerina es cerca de 1,5 kJ (kg*K), y su temperatura antes de reaccionar será de 300 °C. Bajo estos parámetros la velocidad de reacción resultará elevada como para que se produzca la reacción completa en todo el frente de detonación al mismo tiempo, entonces resultará muy estrecha la zona de reacción.

Los explosivos comerciales tienen por lo general la velocidad de detonación baja y la energía de compresión del choque también, de manera semejante (la energía cinética del material es proporcional al cuadrado de la velocidad). Por tanto, el mecanismo de choque y calentamiento homogéneo del frente no permite tener una temperatura suficiente como para que la reacción comience este frente. De manera inversa, el calentamiento se da localmente en unos puntos o centros de reacción, llamados puntos calientes que producen una reacción inducida térmicamente llamada detonación.

La heterogeneidad física, incluidos en explosivos químicamente homogéneos, actúa como punto caliente. Entre las heterogeneidades en los explosivos tenemos:

- Cavidades, como poros, burbujas de aire o gas, etc. Se introducen estas heterogeneidades en el explosivo durante su fabricación, mediante aditivos

productores de gas (“gasificación química”) o mediante pequeñas esferas (“microesferas”) de vidrio o plástico con aire en su interior.

- El efecto Munroe, que consiste en la aceleración de la superficie convexa de la cavidad que recibe el choque, que crea un chorro de velocidad varias veces mayor a la velocidad que adquiriría una superficie plana sometida al mismo choque. El choque del chorro con la parte opuesta de la cavidad puede crear la iniciación del explosivo en este sector. Este efecto se utiliza en cargas especiales llamadas “cargas huecas” para corte y perforación.
- Interacción de choques. Si el choque incide en las heterogeneidades, como partículas tanto de impurezas inertes como reactivas, bordes de granos y cristales de explosivo, pueden crearse choques reflejados y transmitidos, cuya combinación da lugar en algunos puntos a presiones muy elevadas y temperaturas que provocan la reacción local del explosivo.
- Calentamiento viscoso. Con la elevada velocidad másica (miles de metro por segundo) unida al choque da oportunidad a la disipación de energía producto de la viscosidad del material, formando zonas calientes en las que se realiza la explosión. Para explosivos cristalinos, la fricción entre cristales, o la deformación plástica de los granos al paso de una onda de choque podrían formar los puntos calientes.

La explosión de los puntos calientes produce una energía que se dispersa en el material sin reaccionar por medio de ondas de choque, iniciando al explosivo en su superficie. El desfase esférico de estos choques hace que se disipen rápidamente, debido a esto es necesaria la existencia de nuevos puntos calientes en las proximidades del material. Los nuevos puntos calientes pueden crearse por la interacción de choques procedentes de la explosión de puntos calientes activados primero.

1.3.3 Propagación de la detonación

1.3.3.1 Zona de reacción en explosivos heterogéneos

Los puntos calientes se crean de diferentes formas, entonces la zona de reacción de un explosivo heterogéneo es una secuencia de “microexplosiones”, que forma a su vez una rápida combustión del material hasta que la reacción termina.

En la zona de reacción se crean dos regiones. Para la primera zona, los puntos calientes activados por la onda de choque producen explosiones térmicas. La producción de la explosión térmica está en relación con el balance de la energía liberada por la descomposición del explosivo, a la que se suma la energía entregada por el choque, y las pérdidas por disipación calor. El análisis en cada punto caliente es bueno, solo si la dimensión del mismo es mayor que un valor determinado. El encendido de una cavidad calentada por una onda de choque de

presión P , radio crítico proporcional a $P^{-1/2}$. Si se asume que en el explosivo existe una distribución de tamaños de las “heterogeneidades”, potenciales puntos calientes. Para n_o que es el número de estas heterogeneidades por unidad de volumen, solo una parte n_i de estas pertenece a puntos calientes encendidos; n_i es mayor a medida que la presión de choque crece y menor cuando las heterogeneidades disminuyen.

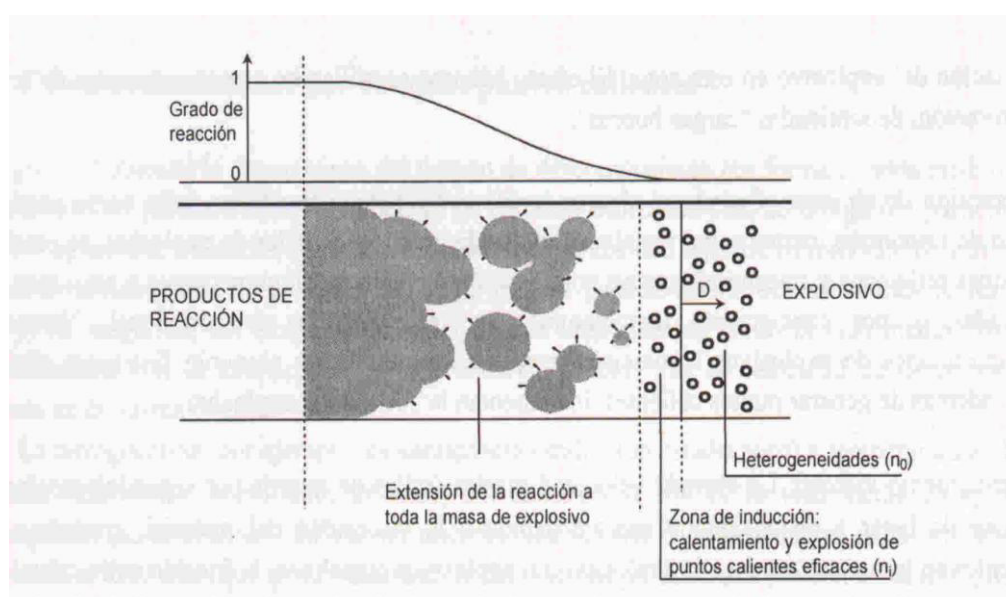


Figura 1. 20 Zona de reacción en dos etapas en los explosivos heterogéneos. (Según Faunquignon 1995, Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz).

En la parte posterior de esta zona de calentamiento y explosión de puntos calientes, se realiza la reacción del material activado por la energía de las explosiones en los puntos calientes. Debido a esto el material debe poder reaccionar a suficiente velocidad para que la reacción se realice antes que las ondas de relajación (rarefacciones, ondas de tracción) que provienen de los bordes de la carga puedan disminuir la presión, ya que la velocidad de combustión es

proporcional a la presión. Esto podría provocar que el material no reaccionara a suficiente velocidad, fracasando la detonación. Si la cantidad de puntos calientes activados, n_i , la separación entre ellos será menor, y se requerirá un tiempo menor para la reacción del material entre ellos, pero la reacción se completará y la energía del explosivo también se desarrollará.

1.3.3.2 Diámetro crítico

La detonación se propaga de forma sostenida y estable si la tendencia entre la liberación de energía en la reacción, y la llegada de las ondas de relajación desde los bordes de la carga se hace en la liberación de energía.

En las aplicaciones de los explosivos, la carga es de forma cilíndrica en las que se presentan los explosivos (cartuchos o columna de explosivo a granel en un barreno). Al producirse la detonación a lo largo de una carga cilíndrica, el frente de detonación no es plano, presenta una cierta divergencia hacia los laterales de la carga. Lo que se produce por la expansión radial que se crea en la superficie lateral, lo que tiende a decrecer tanto la presión como la temperatura. Aunque las ondas de relajación procedentes de los laterales interactúan con todo el frente, pero la influencia es menos pronunciada hacia el centro de la carga. El resultado es que la velocidad de detonación local en los bordes de la carga es inferior a la velocidad en el eje. Esto produce que el frente es convexo. El frente se moverá en forma estacionaria si se cumple:

$$D_r = D \cos \alpha = D \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}$$

En diámetro pequeño de carga, el efecto de borde se nota más fuertemente sobre todo el frente de detonación, debido a que las ondas de relajación alcanzan a una mayor parte del frente en el tiempo en que la reacción química culmina, éste presenta una curvatura mayor. Se tiene un valor del diámetro de la carga por debajo del cual la detonación es incapaz de progresar, ya que la presión en el frente se ve inmediatamente disminuida por las rarefacciones laterales, esto hace que la velocidad de las reacciones disminuye y no se libere suficiente energía de manera rápida como para que la detonación se sostenga. El diámetro mínimo para que se pueda mantener la detonación se llama diámetro crítico. Debe notarse que el radio de curvatura R del frente en las cercanías del diámetro crítico es aproximadamente igual al diámetro de la carga. En diámetros de carga grandes, el radio de curvatura del frente es 3,5 veces el diámetro de la carga aproximadamente.

La densidad es una parte importante en el valor del diámetro crítico de un explosivo. Se tienen dos tipos de comportamiento opuestos, que va de acuerdo a la naturaleza del explosivo: en algunos, el diámetro crítico disminuye con la densidad, y en otros aumenta con ella. Notándose que la densidad es indicativa de la energía disponible en el explosivo por unidad de volumen, y también del número de heterogeneidades que existen llamados potenciales puntos calientes.

Cundo se tiene mayor densidad aumenta el contenido energético, lo que da como resultado una gran energía disponible para mantener la onda de choque. Pero resulta que a mayor densidad, la porosidad debe ser menor, y también el número de cavidades, discontinuidades, poros, es decir, heterogeneidades que actúen como puntos calientes en el material.

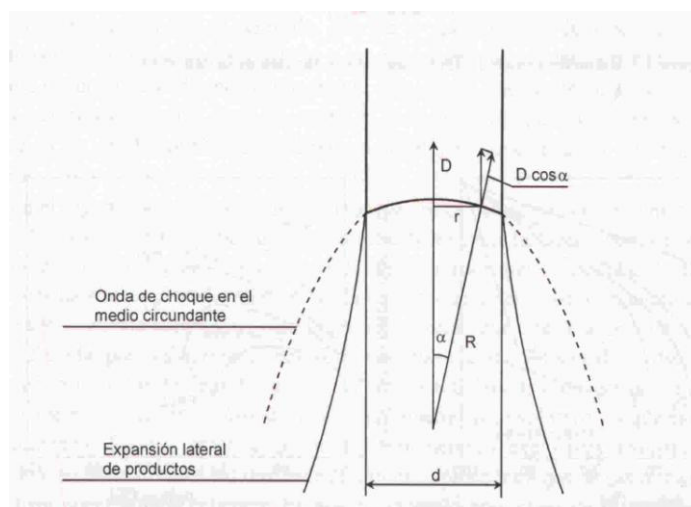


Figura 1. 21 Frente de detonación curvo en una carga cilíndrica (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz.)

En explosivos cuyo diámetro crítico disminuye con la densidad son de energía elevada como la trilita, hexógeno, pentrita, etc. Para estos explosivos la presión de detonación es muy alta, de manera que el número de puntos calientes activos es suficiente para desencadenar las reacciones, no importando que la densidad sea alta y existan pocos puntos calientes que se activarán por la gran presión. Si la densidad se eleva también la energía aumenta, con lo que la detonación se refuerza, produciéndose, además, en diámetros pequeños. Los explosivos industriales de este tipo son las gelatinas

Para el segundo grupo se tiene que la presión de detonación es menor para los explosivos comparados con los del primer grupo. Necesitándose un número grande de puntos calientes para que la reacción pueda activarse. La activación no está asegurada, por la poca presión como ocurre en los altos explosivos, esto hace que sea una condición importante, considerando la cantidad de energía que se libera en la reacción. La reacción comparada con los del primer grupo de explosivos no es muy baja. Por lo que, todo el mecanismo de la detonación se ve favorecido cuanto menor sea la densidad y en consecuencia mayor el número de puntos calientes, esto hace que se propague en menores diámetros cuando la densidad es menor. Los explosivos industriales en su mayoría se comportan de esta manera.

Se puede notar la influencia del tamaño de grano sobre el tamaño crítico y de la densidad. Si el tamaño de grano del explosivo es grueso, los puntos calientes son de mayor tamaño, además, es mayor el tiempo necesario para una reacción completa. Cuando el grano es fino sucede lo contrario. En consecuencia, la existencia de más puntos calientes, menor tamaño, favorece la iniciación y, además, las reacciones se completan más rápidamente. Entonces el diámetro crítico casi siempre disminuye cuando lo hace también el tamaño de grano.

1.3.3.3 Velocidad de detonación

La densidad influye mucho en la velocidad de detonación para los explosivos comúnmente utilizados. Así como sucede con el diámetro crítico, existen dos tipos de conducta de la velocidad de detonación frente a la densidad, como se nota en las dos clases de explosivos anotadas.

Para explosivos de elevada energía y presión de detonación su velocidad crece con la densidad, ya que existe una mayor energía por unidad de volumen para sustentar el choque, siendo menos importante el hecho de que al aumentar la densidad el número de puntos calientes disminuya.

Para el segundo grupo de explosivos, la etapa crítica es la reacción de puntos calientes activos; en densidades bajas, existen suficientes heterogeneidades para funcionar como puntos calientes, y el aumento de energía disponible al aumentar la densidad hace que la velocidad de detonación aumente, como en el primer grupo sucedía. Con cierta densidad, el número de puntos calientes deja de ser suficiente para iniciar bien la reacción, con lo que ésta se desarrolla a menor velocidad y las rarefacciones la afectan. Por consiguiente, la velocidad de detonación disminuye, llegándose a un valor de densidad en que la detonación deja de propagarse, por falta de suficientes puntos calientes que son necesarios. La densidad que se obtiene se denomina de “muerte” del explosivo, ya que se insensibiliza a éste. En la práctica común en numerosos explosivos industriales se

los sensibiliza haciendo disminuir su densidad mediante la introducción de burbujas de gas o microesferas, que, a su vez funcionan como puntos calientes. Cuando el explosivo pierde estas burbujas, ya sea por difusión del gas hacia el exterior o por compresión del mismo (debido, por ejemplo, a ondas de choque de barrenos próximos iniciados con anterioridad), su velocidad de detonación disminuirá por lo que puede fallar el explosivo.

La velocidad de detonación aumenta con el diámetro. La misma que es otra consecuencia importante de la interacción entre la zona de reacción y las ondas de relajación. Cuando se tiene mayor diámetro, estas últimas tardan más tiempo en llegar a la zona de reacción, y los hacen más atenuadas, con lo que se dispone de un tiempo mayor para que se complete la reacción antes de la llegada de las ondas de relajación. La velocidad de detonación aumenta constantemente con el diámetro, cerca a un valor límite, para diámetro infinito, conocido como velocidad de detonación ideal, similar al valor CJ obtenido en la teoría de la detonación

1.3.3.4 Influencia del confinamiento

Un material resistente que contenga explosivo hace que las ondas de relajación sean de menor intensidad que cuando la detonación se produce sin confinar, el confinamiento produce los siguientes efectos:

- El diámetro disminuye.

- La velocidad de detonación aumenta.

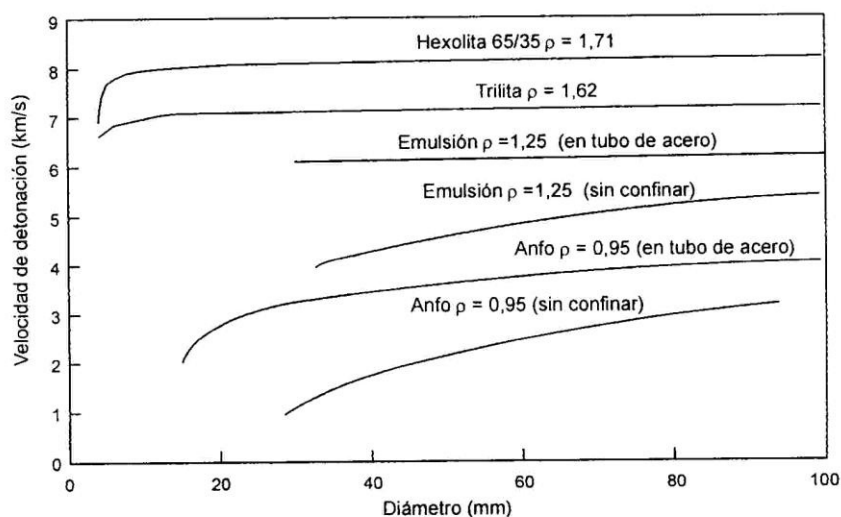


Figura 1. 22 Velocidad de detonación en función del diámetro de algunos explosivos (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

1.3.4 Iniciación por ondas de choque

La detonación viene a ser una onda de choque mantenida por una reacción química, en la que la compresión en el frente de choque inicia la reacción, ya sea de forma homogénea o en los llamados puntos calientes. Contrariamente que un choque no reactivo, cuya velocidad depende por completo de las condiciones iniciales, la detonación tiene una fuerte tendencia a aproximarse a una velocidad determinada, cuyo valor es poco independiente de las condiciones de contorno e iniciales. En una cierta velocidad la estabilidad de las detonaciones es obvia. La incidencia de las ondas de choque en la superficie de una carga, de mayor o menor

presión que la detonación estacionaria del explosivo, iniciarán las ondas que se convierten en detonaciones estacionarias a medida que crecen o decaen.

El explosivo inicialmente sometido al choque puede ser de mayor intensidad o presión, de igual intensidad o de intensidad menor que la de detonación CJ en el explosivo. Para el primer caso, la detonación se denomina sobre-impulsada, y su intensidad siempre decrece hasta que las condiciones CJ se alcanzan. Para el último caso, la detonación es sub-impulsada, y podrá llegar a crearse en detonación CJ o no, dependiendo de la intensidad inicial y las pérdidas de energía laterales en los bordes de la carga por ondas de rarefacción.

1.3.4.1 Iniciación subimpulsada

El comportamiento de un explosivo homogéneo como un gas, un líquido sin absolutamente ninguna impureza o un monocristal ante una onda de choque es diferente a un explosivo heterogéneo. Las discontinuidades que se presentan, es decir, heterogeneidades que es la condición común en el caso de explosivos sólidos, sean granulares o mezcla de fases líquidas y sólidas, caso éste típico de los explosivos industriales. Por referencia se estudia primero la iniciación de los explosivos homogéneos, y luego los heterogéneos.

- **Explosivos homogéneos**

Para un medio homogéneo, la onda de choque se propaga inicialmente como si el explosivo se tratara de un medio inerte, es decir, disminuyendo su presión y perdiendo velocidad en su avance, debido a la normal disipación de energía. Luego de un periodo de inducción, se inicia la detonación del explosivo, no en la posición que ocupa en ese instante el frente del choque iniciador, sino en la zona de entrada del explosivo. La detonación se produce, en consecuencia, en el explosivo precomprimido y calentado previamente por la onda de choque, que viajará a una velocidad superior a la CJ del explosivo en condiciones normales

La inducción de la iniciación tiene un tiempo que depende de la temperatura, al igual que la explosión térmica, que depende de la presión del choque. Es muy dependiente el tiempo de inducción, asimismo, de la temperatura inicial del explosivo, pues al aumentar ésta el tiempo disminuye.

En la mayoría de explosivos homogéneos se puede iniciarlos mediante choques de presión alrededor de la mitad, e incluso inferior, de su presión de detonación

- **Explosivos heterogéneos**

Los puntos calientes en el explosivo son formados por el paso de la onda de choque iniciadora. Cualquier heterogeneidad física en el explosivo puede actuar como centro de iniciación. Muchos de ellos harán explosión y generarán ondas de choque en el material circundante, dando lugar a la reacción en el explosivo.

El avance de la detonación en explosivos heterogéneos se produce como una transición relativamente suave desde una onda de choque, soportada por una reacción química local, hasta una detonación enteramente soportada. El proceso de la aceleración hasta detonación, en los que tiene lugar la mayor parte del crecimiento de la onda de choque, suele comprender una fracción pequeña de todo el proceso descrito. La parte del explosivo que queda entre el punto de entrada del choque y la zona en que se establece la detonación queda en su mayoría sin reaccionar; a veces, se ha notado que la detonación, cuando se establece, inicia a su vez este explosivo, formándose una segunda detonación moviéndose en sentido opuesto, consumiéndose el explosivo hacia el punto de entrada del choque, fenómeno llamado en ocasiones “retonación”.

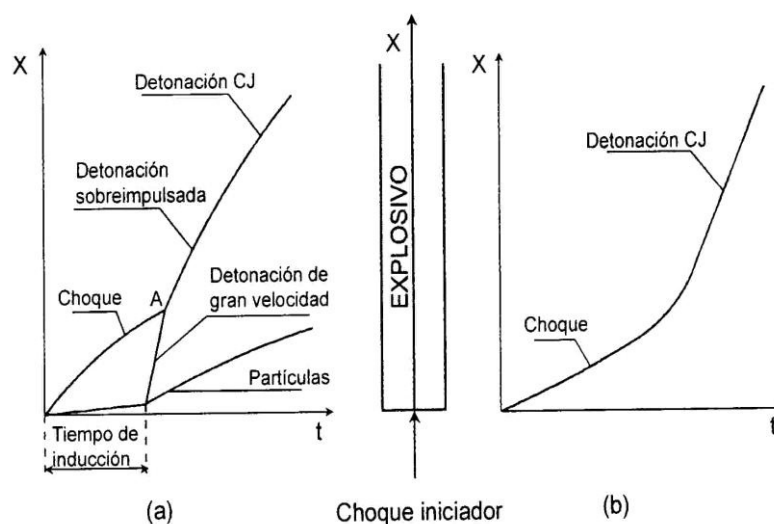


Figura 1. 23 Iniciación subimpulsada. (a) explosivos homogéneos; (b) Explosivos heterogéneos (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

El mecanismo de iniciación lleva las siguientes diferencias en dependencia con los explosivos homogéneos:

- En un explosivo heterogéneo la onda de choque inicial se acelera a su paso, mientras que en un explosivo homogéneo se atenúa.
- En un explosivo heterogéneo la transición a la detonación es relativamente ligera, progresiva, mientras que en un explosivo homogéneo es muy repentino.
- En un explosivo homogéneo la aparición de la detonación va acompañada, primeramente de una sobre-velocidad, lo que no acontece en explosivos heterogéneos.
- En explosivos homogéneos la detonación se origina en la zona de entrada del choque iniciador, en tanto que en explosivos heterogéneos la detonación se establece en el frente de choque.
- En la iniciación por choque las mezclas son muy sensibles que en los explosivos homogéneos. Las interacciones entre choques son provocadas por las heterogeneidades que producen calentamiento locales.

- En explosivos homogéneos la iniciación es mucho más sensible a las variaciones de la temperatura inicial y de la intensidad del choque inicial que en explosivos heterogéneos.

1.3.4.2 Iniciación sobreimpulsada

En el momento que la presión del choque iniciador es superior a la presión de detonación, la detonación en el explosivo receptor se inicia de inmediato en la superficie de contacto, en forma de detonación sobreimpulsada. Se nota que la energía suministrada por la reacción del explosivo es insuficiente para mantener la detonación a la velocidad y presión del choque inicial, y las rarefacciones procedentes de los bordes de la carga harán que aquella decaiga transformándose en una detonación CJ.

1.3.4.3 Influencia del diámetro de la carga iniciadora

Se puede concluir que existe una cierta presión umbral que debe superar la onda de choque iniciadora para establecer una detonación estable en la carga receptora explosiva.

Para carga iniciadora de pequeño diámetro, la detonación, si la presión es superior al umbral, se establece en la zona de explosivo receptor en contacto con aquella ó en sus proximidades, si la iniciación es sub-impulsada. También las pérdidas

laterales de energía en la detonación así establecida, para un pequeño diámetro, pueden provocar que aquella llegue a fallar, aunque el frente de detonación se expanda. Se debe notar que la detonación, establecida axialmente en la carga, no puede cambiar fácilmente de dirección, sólo en una distancia pequeña, pues su velocidad y presión en sentido radial son pequeños, insuficientes para iniciar al explosivo en su parte lateral.

La cantidad de explosivo lateral sin detonar y los bordes de la carga reflejarán los choques a que se ven sometidos en forma de ondas de tracción como rarefacciones, presiones “negativas” que hacen caer la presión y la temperatura en el frente de detonación cuando lo alcanzan, provocando una menor velocidad en la reacción química y pudiendo llegar, finalmente, a “apagarla”.

Para diámetro menor de la carga iniciadora, mayor debe ser la presión del choque, presión de detonación, para obtener una detonación equilibrada. Es posible obtener una detonación estable en el explosivo receptor aun con diámetros de carga iniciadora inferiores al diámetro crítico de aquél, pero en este caso la presión de iniciación debe ser convenientemente alta.

Se puede colocar la carga iniciadora, un multiplicador, total o parcialmente en el interior del explosivo receptor. Para este caso, el explosivo está sometido a la presión de los productos de la detonación lo largo de la superficie cilíndrica del multiplicador antes de que la detonación de éste alcance el extremo. Cuando la

presión en la superficie lateral es suficiente, se puede iniciar la detonación en el explosivo en esta parte, por lo que la superficie de iniciación del multiplicador es mayor que cuando solo está en la base en contacto. En cambio, si la presión lateral es insuficiente para la iniciación, resulta indiferente que el multiplicador esté o no sumergido en el explosivo a iniciar.

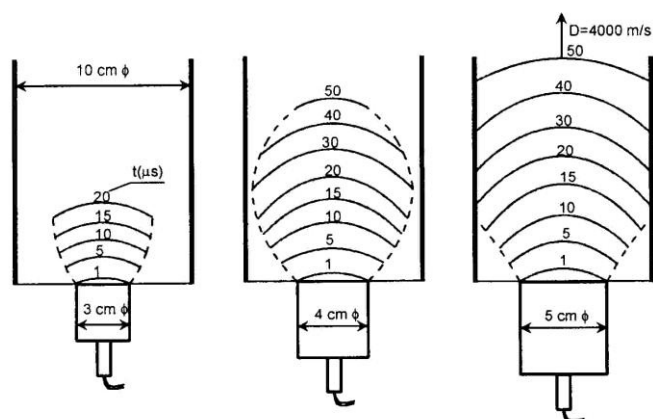


Figura 1. 24 Propagación de la detonación en un explosivo poco sensible para varios diámetros de carga iniciadora. (Curso de Tecnología de Explosivos, Sanchidrián/Muñiz)

1.4 SISTEMAS DE INICIACION

1.4.1 Mecha lenta

Esta constituida por un núcleo de pólvora negra rodeado de varias capas de hilados y materiales impermeabilizantes que la hacen resistente a la humedad, abrasión y esfuerzos mecánicos a los que puede estar sometido.

El fuego se transmite por la combustión de la mecha a una velocidad uniforme de dos minutos por metro lineal. Normalmente se utiliza para la iniciación de detonadores ordinarios y de la pólvora negra.



Figura 1. 25 Accesorios para pega con mecha lenta: punzón, tenacillas, mecha lenta y detonadores. (Cortesía de UEE, S.A.)

1.4.2 Cordón Detonante

Se puede decir que un cordón detonante es una cuerda flexible e impermeable que contiene en su interior un explosivo. Su núcleo explosivo es pentrita, cuya velocidad de detonación es de 7.000 m/s; el cordón detonante se emplea

principalmente para transmitir a los explosivos la detonación iniciada por detonador. Varios tipos de cordón detonante pueden utilizarse para realizar voladuras, siempre que sean pequeñas.

Su núcleo de pentrita, en cantidad variable según el tipo de cordón, va rodeado de varias envueltas de hilados y fibras textiles, y de un recubrimiento exterior de cloruro de polivinilo, que se le proporciona las debidas propiedades, tales como elevadas resistencias a la tracción, abrasión, humedad y flexibilidad.

Se caracteriza por su potencial, la cual está en razón directa del contenido de pentrita por metro lineal de cordón. Su aplicación esta determinada por su potencia, por lo que tienen los cordones detonantes de aplicación más extendida contenidos de explosivo por metro desde 3 a 100 gramos, utilizados para diferentes trabajos de voladura.

1.4.2.1 Aplicaciones del cordón detonante

Tienen dos tipos de aplicaciones específicas. Por una parte sirven para la iniciación de explosivos en una voladura, y por otra servir como explosivo para la realizar voladuras.

Se emplea comúnmente para iniciar altos explosivos, para ello se utiliza cordones detonantes desde 3 gramos por metro lineal hasta 40, estos tipos de cordones son empleados en las prospecciones sísmicas.



Figura 1. 26 Cordones detonantes de 6 g (amarillo), 12 g (azul) y 20 g (blanco). (Cortesía de UEE, S.A.)



Figura 1. 27 Cordones detonantes de 40 g (verde) y 100 g (rojo). (Cortesía de UEE, S.A.)

Como práctica común, los cordones detonantes de concentración superior a los 40 gramos son utilizados como explosivos para la realización de voladuras de recorte y precorte, donde se utilizan con frecuencia los cordones de 100 gramos de pentrita por metro lineal.

En la iniciación de explosivos mediante el cordón detonante, únicamente se precisa colocar el cordón en contacto con el explosivo, para que en éste se produzca la reacción de detonación. Asimismo el cordón puede ser iniciado mediante un detonador, o mediante otro cordón que amaestre los diferentes cordones que existan en la voladura.

La fábrica UEE dispone además de los llamados cordones detonantes reforzados, los cuales están fabricados con fibras textiles especiales, que les da una gran resistencia a la abrasión y tracción.

1.4.2.2 Conexión del cordón detonante

Debe notarse que el cordón detonante, se inicia siempre mediante otro cordón, o mediante algún tipo de detonador. En la conexión del detonador al cordón debe ser de tal manera que el culote del detonador apunte hacia la zona de cordón en que debe propagarse la onda de detonación, si no es así no se produciría la iniciación del cordón en la dirección esperada.

En cambio la conexión entre cordones deberá hacerse mediante nudos, cinta adhesiva o conectadores especiales diseñados para estas labores, de manera que se asegure la propagación de la detonación de uno a otro de acuerdo a lo que se planifica. Debe destacarse que los cordones no deben cruzarse, así como que hay que tener en cuenta el sentido de propagación de la detonación para tener una buena voladura.



Figura 1. 28 Nudo de conexión entre ramales de cordón detonante (Cortesía de UEE, S.A.)

1.4.3 Detonadores de mecha u ordinarios

Se lo llama detonador ordinario o de mecha, está formado por un casquillo de aluminio, cerrado por un extremo, en cuyo interior van dispuestas dos cargas explosivas las cuales están en contacto.

Para iniciar un detonador se introduce una mecha lenta o de seguridad por el extremo libre del casquillo, debiendo quedar dicha mecha en contacto con la carga explosiva.

1.4.4 Detonadores eléctricos

Son detonadores que se activan por medio de energía eléctrica. Se utilizan en la actualidad, ya que permiten un correcto diseño de la voladura, obteniendo buenos resultados, seguridad en la manipulación y control de los efectos derivados de la utilización de explosivos en voladura.

Este detonador se compone de tres partes, que van colocadas dentro de un casquillo de aluminio o cobre. El casquillo de cobre se emplea en las minas de carbón. Las tres partes de que está compuesto el detonador son: la eléctrica, la retardadora y la explosiva.

Va colocada la parte eléctrica en la zona superior del casquillo, y está formada por el inflamador o cerilla y por los hilos de conexión, que son de distintos colores según la clase de detonador.

La parte llamada inflamador o cerilla es una pequeña resistencia recubierta de pasta explosiva. La resistencia se denomina también puente de incandescencia como en las bombillas, va conectada a los hilos de conexión y a través de ellos

recibe la corriente eléctrica. Cuando la intensidad es lo suficientemente grande para el puente se calienta, hasta alcanzar una temperatura, que produce la inflamación de la pasta explosiva del inflamador.

Sólo la parte retardadora la tiene los detonadores de tiempo, es decir, en los detonadores de retardo o microrretardo.

En cambio los detonadores instantáneos o de número cero no lo llevan la parte retardadora.

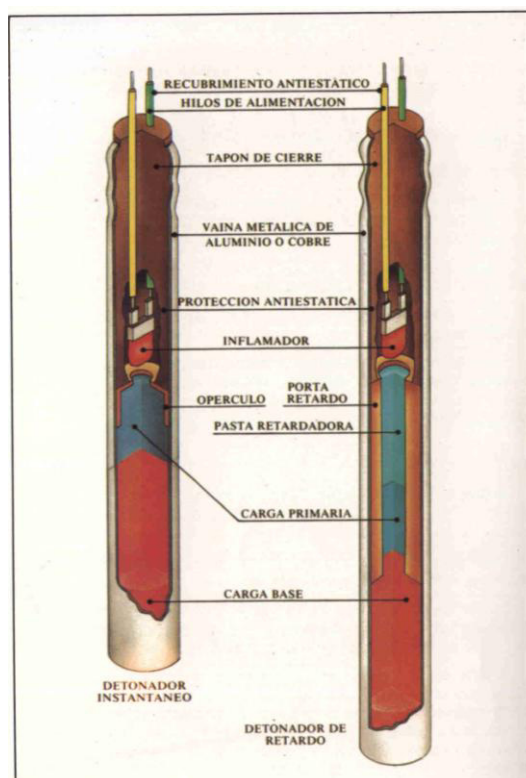


Figura 1. 29 Seccionado de dos detonadores eléctricos: instantáneo y retardado (Cortesía de UEE, S.A.)

En los detonadores de tiempos, la parte retardadora va colocada en la zona intermedia del detonador, es decir, entre el inflamador y la carga explosiva. Es un pequeño casquillo metálico, llamado portarretardo, que está lleno de una pasta explosiva retardadora de precisión que arde a una velocidad calculada.

En la zona inferior del casquillo se coloca la parte explosiva, y está compuesta por dos cargas, una menor llamada carga primaria y otra mayor llamada carga base o secundaria.

El funcionamiento del detonador eléctrico es así:

Al pasar la corriente eléctrica por los hilos de conexión, atraviesa la pequeña resistencia de la cerilla, si la intensidad de corriente es lo suficientemente grande, hace que se caliente la resistencia hasta alcanzar la temperatura de inflamación de la pasta explosiva que rodea a la cerilla. Cuando la cerilla se inflama provoca la inflamación del elemento retardador caso de que el detonador sea de tiempo; cuando el elemento retardador termina de encender, la combustión llega a la carga primaria que detona y hace detonar a su vez a la carga base o secundaria.

Cuando el detonador es instantáneo o de número cero, no lleva portarretardo, y la cerilla hace explotar directamente a la carga primaria y ésta a la carga base. La inflamación de la cerilla y la explosión de las cargas es instantánea.

1.4.4.1 Potencia de los detonadores eléctricos

La potencia de los detonadores depende de la cantidad y tipo de explosivo que lleve. Unión Española de Explosivos, S.A., fabrica sus detonadores con potencia número 8, que es la potencia equivalente a la de una carga de 0.7 gramos de pentrita.

1.4.4.2 Mecanismo de encendido

Puede ser que el paso de corriente eléctrica produzca la iniciación de la cerilla, en este momento se interrumpe el paso de la corriente, puesto que la resistencia del detonador, o bien, se ha fundido como consecuencia de la elevada temperatura, o se ha roto al producirse la explosión de la cerilla, lo que es muy importante.

Dentro de los distintos tipos de detonadores eléctricos, éstos pueden ser de tres tipos, según sensibilidad o cantidad de energía eléctrica que necesitan para que se produzca la inflamación de la cerilla: detonadores Sensibles, detonadores Insensibles y detonadores Altamente Insensibles. Los detonadores Insensibles, como su nombre lo indica, necesitan más energía eléctrica que los detonadores Sensibles, y los detonadores Altamente Insensibles todavía más que los Insensibles.

Por lo tanto podría entenderse teóricamente que todos los detonadores de un determinado tipo de sensibilidad, deben inflamarse con la misma corriente mínima, es decir, que si un detonador se inflama con una cierta corriente, se deben inflamar todos los que tengan la misma sensibilidad y en el mismo tiempo en una voladura. Sin embargo, esto no sucede en la realidad, porque ningún fabricante puede garantizar que todos los detonadores tienen exactamente la misma sensibilidad, y siempre podrían existir unas pequeñísimas diferencias, que hacen variar los tiempos de retardo ligeramente.



Figura 1. 30 Detalle de la cerilla de un detonador eléctrico tipo S y de su ventana antiestática (Cortesía de UEE, S.A.)

Además, no es necesaria esa exactitud, por lo que sí puede garantizar el fabricante es que, con una cierta intensidad de corriente algo mayor que la mínima, y que él

ha determinado, y se llama intensidad de corriente recomendada por el fabricante todas las cerillas de una misma sensibilidad se inflamarán al mismo tiempo.

Para que las cerillas de todos los detonadores se inflamen al mismo tiempo, no quiere decir que todos los detonadores vayan a explotar una tras otra. Lo que sucede es que han empezado a inflamarse e irán detonando de forma instantánea si el detonador es instantáneo o número cero, o posteriormente de acuerdo con los tiempos de retardo dado.

Así los detonadores se tienen que conectar habitualmente en serie, por si llegara a romperse o fundir el puente de incandescencia o resistencia de algún detonador, antes de que el resto de los detonadores hubieran alcanzado la temperatura de inflamación, la corriente quedaría cortada en todo el circuito y sólo algunos detonadores detonarían.

De la misma forma, el mezclar detonadores de distinto grado de sensibilidad, produce el mismo efecto de que exploten sólo unos detonadores. Por lo que el fabricante garantiza que con una intensidad de corriente igual o superior a la recomendada todos los detonadores se inflaman, también garantiza que con una corriente igual o inferior a la llamada Corriente de Seguridad ningún detonador se puede inflamar. Debe tomarse en cuenta esto porque a los detonadores les puede llegar también corrientes llamadas extrañas, que se producen por diferentes motivos, tales como tormentas, electricidad estática, etc. La Corriente de

Seguridad será también mayor en los detonadores Insensibles que en los detonadores Sensibles y todavía mayor en los detonadores Altamente Insensibles.

1.4.4.3 Características eléctricas de los detonadores

Los tres tipos de detonadores: Sensibles, Insensibles y Altamente Insensibles, tienen unas características determinadas que los diferencian.

Detonadores eléctricos UEE	Clasificación por su sensibilidad eléctrica					
	SENSIBLES S		INSENSIBLES I		ALTAMENTE INSENSIBLES AI	
	Color indicativo de la sensibilidad eléctrica	Color indicativo del tiempo	Color indicativo de la sensibilidad eléctrica	Color indicativo del tiempo	Color indicativo de la sensibilidad eléctrica	Color indicativo del tiempo
Instantáneos	Rosa	Bianco	Rosa	Bianco	Verde	Bianco
Retardos de 0,5 segundos	Rosa	Azul	Rosa	Azul	Verde	Azul
Microrretardos de 30 milisegundos	Rosa	Amarillo	Rosa	Amarillo	Verde	Amarillo
Microrretardos de 20 milisegundos (se repite el color de la sensibilidad eléctrica)	Rosa	Rosa	Rosa	Rosa	Verde	Verde
Sísmicos	Bianco	Bianco	Azul	Azul		

Figura 1. 31 Características, clasificación y código de colores de los diferentes detonadores eléctricos fabricados por Unión Española de Explosivos en su fábrica de Galdácano (Cortesía de UEE, S.A.)

Las características son:

- Resistencia al puente, que es la resistencia del puente de incandescencia o resistencia de la cerilla, medida en ohmio (Ω).

- Resistencia de los hilos de conexión, que es la resistencia de los dos hilos de conexión del detonador, medida en ohmio (Ω).
- Resistencia total del detonador, que es la suma de las dos anteriores, medida en ohmio (Ω).
- Intensidad de corriente recomendada que es la intensidad mínima que el fabricante recomienda, y por lo tanto, que se debe utilizar para asegurar que todos los detonadores conectados en serie en una voladura, reciben energía suficiente para su explosión. Es medida en amperios (A).
- Corriente de seguridad, que es la máxima intensidad de corriente, que atravesando el puente de incandescencia de un detonador durante cinco minutos no provoca su inflamación, medida en amperios (A).
- Impulso de encendido o sensibilidad eléctrica de los detonadores, es la energía eléctrica por cada unidad de resistencia que se necesita para provocar la inflamación de la cerilla. Habitualmente, la energía eléctrica se suele medir en kilovatios hora, es decir, mil vatios hora, pero como la energía que necesitan los detonadores eléctricos es pequeña, se mide en una unidad menor. Por consiguiente, la sensibilidad eléctrica o impulso de encendido de los detonadores se mide en milivatios segundo y dividido por la resistencia del circuito en ohmios (mws/Ω).

1.4.4.4 Clasificación de los detonadores eléctricos

Los detonadores eléctricos se clasifican en función de tres factores esenciales: uso, sensibilidad y tiempos.

a) En función del uso

Podemos clasificarlos en:

- De cápsula de aluminio que son de uso general.
- De cápsula de cobre que son detonadores adecuados para su utilización en ambientes grisosos o inflamables. Deben ser de cobre la cápsula e hilos de alimentación. Existen en todas las gamas, tanto en lo que respecta a características eléctricas (S, I y AI), como a los tiempos de retardo.
- Sísmicos, son detonadores que se fabrican con un tiempo de reacción inferior a un milisegundo, siempre que se inicien con la intensidad adecuada. La empresa UEE fabrica estos detonadores para dos tipos de sensibilidad S e I; y aptos para resistir altas presiones hidrostática.
- Para trabajos bajo grandes presiones de agua, se fabrican detonadores con un cierre especial estanco que les proporciona una hermeticidad que se puede resistir

presiones de hasta 100 kg/cm^2 , manteniendo el resto de las características de los detonadores convencionales.

b) En función de las características eléctricas

De acuerdo con las características o condiciones eléctricas de los detonadores, pueden ser de tres tipos:

- a) Detonadores Sensibles (S).
- b) Detonadores Insensibles (I).
- c) Detonadores Altamente Insensibles (AI).

a) Detonadores Sensibles (S)

Son los que más se utilizan y son aptos para lugares en los que no existe peligro de corrientes estática y extrañas, que son producidas por las líneas eléctricas, tormentas etc.

Tiene uno de los hilos este detonador siempre de color rojo. El otro hilo tiene color, según veremos, indicativo del tiempo de retardo. Ninguno de los detonadores tipo (S) debe hacer explosión al ser atravesado por una corriente de 0,18 amperios durante cinco minutos. En estos detonadores UEE recomienda una intensidad mínima de disparo de 1,2 amperios.

b) Detonadores Insensibles

Los detonadores Insensibles resultan más seguros que los detonadores sensibles ante las corrientes extrañas. Su impulso de encendido, es cinco veces mayor y su corriente de seguridad superior al doble.

Este tipo de detonadores se utiliza en los casos, en que si bien no es previsible la existencia de energía peligrosa, se quiere tener un mayor margen de seguridad.

Tiene uno de los hilos de este detonador es siempre de color rosa. El color del otro hilo indica el tiempo de retardo. Ninguno de los detonador tipo (I) debe explotar con una corriente de 0,45 amperios durante cinco minutos. En los detonadores tipo (I) UEE recomienda utilizar una intensidad mínima de disparo de 2,5 amperios.

c) Detonadores Altamente Insensibles (AI)

Estos detonadores tipo Altamente Insensibles (AI) reducen ampliamente los riesgos de autoencendido cuando existe energía peligrosa, debido a líneas eléctricas, emisoras, electricidad estática, etc.

Los detonadores AI no es que sean resulten totalmente seguros en todos los casos en que exista este tipo de problemas. A pesar de que su corriente de seguridad es

veinte veces mayor y su impulso de encendido trescientas veces mayor que en los detonadores tipo S, puede existir algún caso en que estas corrientes peligrosas mencionadas, sobrepasen los límites de seguridad incluso de los detonadores AI, por lo siempre deben tomarse las precauciones debidas.

Ninguno de los detonadores AI debe explotar al ser atravesado por una corriente de 4 amperios durante cinco minutos. En estos detonadores UEE, recomienda utilizar una intensidad de disparo de 25 amperios. Tiene uno de los hilos de esos detonadores es siempre de color verde, el otro hilo tiene el color de acuerdo al tiempo de retardo.

c) En función de los tiempos de detonación

En la búsqueda de buenos resultados en las voladuras, es imprescindible que los distintos barrenos vayan saliendo según un orden estudiado y con una diferencia de tiempos determinados de acuerdo a lo planificado.

Conforme al tiempo transcurrido desde que se inflama la cerilla hasta el instante en que se produce la explosión, los detonadores pueden ser:

- a) Detonadores instantáneos.
- b) Detonadores de microrretardo de 20 milisegundos.
- c) Detonadores de microrretardo de 30 milisegundos o.

d) Detonadores de retardo de 500 milisegundos

a) Detonadores instantáneos

Estos tipos de detonadores no llevan portarretardo, por lo que, la inflamación de la cerilla produce instantáneamente la explosión de la carga primaria y ésta la de la carga base. Tiene el color distintivo blanco. Tiene uno de sus hilos es siempre de color blanco, el otro hilo tiene color dependiendo del tipo de sensibilidad eléctrica.

b) Detonadores de microrretardo de 20 milisegundos

Son utilizados para trabajos especiales se fabrican detonadores con secuencia de 20 milisegundos. La serie comprende del número 1 al 15. Los hilos tienen colores iguales, y van en función de la sensibilidad eléctrica.

c) Detonadores de microrretardo de 30 milisegundos

Son detonadores que explotan con secuencia de 30 milisegundos. Tiene una serie que va desde el número 1 al 18, por tanto, el número más alto de la serie explota al cabo de 540 milisegundos. Tiene el color distintivo amarillo para este tipo de detonador. Tiene uno de sus hilos es siempre de color amarillo, el otro hilo tiene el color dependiendo del tipo de sensibilidad eléctrica.

d) Detonadores de retardo de 500 milisegundos

Son detonadores que explotan con secuencia de medio segundo. Consta de una serie de 12 números.

El empleo de este tipo de detonador no es aconsejable en voladuras a cielo abierto, ya que puede producir proyecciones peligrosas. En cambio, en voladuras de interior, se suele utilizar con cierta frecuencia. Tiene el color distintivo azul, es decir, uno de sus hilos es siempre de color azul, el otro hilo tiene el color de acuerdo al tipo de sensibilidad eléctrica.

1.4.5 Otros Sistemas de Iniciación No Eléctricos

En los casos en que por problemas de posible iniciación no deseada, no sea factible el disparo con detonadores eléctricos, como puede ser cuando volamos cerca de una línea eléctrica, o de una vía férrea electrificada, etc., se tienen otros accesorios que aseguran una secuencia correcta de las voladuras.

1.4.5.1 Relés de microrretardo

El empleo del cordón detonante, únicamente es posible para realizar voladuras instantáneas, lo cual en ciertas ocasiones puede resultar un problema importante

por el nivel de vibraciones que se producen, onda aérea y otros problemas como resultado de trabajos de minería.

Como solución de este inconveniente apareció los relés de microrretardo, los cuales son artificios que, intercalados entre el cordón detonante, interrumpen la detonación del mismo durante 15 ó 25 milisegundos, dependiendo del tipo. Estos crean en las voladuras conexas con cordón detonante, un efecto parecido al retardo dado por los detonadores eléctricos de microrretardo.

Entre los relés de microrretardo fabricados por UEE se nota que constan de una funda de plástico moldeado, la cual mantiene en su parte central el elemento metálico de retardo.

Se adaptan los extremos de la funda para fácil acoplamiento del cordón detonante, asegurando su sujeción mediante cuñas de plástico.

Se tiene que el elemento retardador se aloja en un cilindro metálico y en sus extremos se sitúan unas pequeñas cargas de nitrato de plomo que facilitan la transformación de la detonación del cordón en una combustión de la pasta de retardo. La combustión permitirá obtener el tiempo de retardo requerido, luego de terminada ésta combustión, la llama incidirá sobre la segunda carga explosiva iniciando de nuevo la detonación y así sucesivamente.



Figura 1. 32 Secuenciación de una voladura a cielo abierto con relés de microrretardo de 15 ms. (color rojo). (Cortesía de UEE, S.A.)

1.4.5.2 Detonadores no eléctricos

El tipo de detonadores no eléctricos fabricados por UEE se llama RIONEL, y constan de un tubo de plástico que aloja en su interior una sustancia reactiva que mantiene la propagación de una onda de choque a una velocidad aproximada de 2.000 m/s. La onda de choque tiene suficiente energía para un detonador de potencia óctuple.

Puede verse que la reacción en el tubo no tiene ningún efecto explosivo y funciona como un conductor de señal. Este tipo de detonadores RIONEL se presenta empaquetados en bolsas de aluminio selladas.



Figura 1. 33 Detonadores RIONEL (Cortesía de UEE, S.A.)

Se pueden iniciar estos detonadores ya sea con un explosor especial para tal efecto, o con los propios detonadores eléctricos, bien directamente o por mediación de líneas de cordón detonante.

El tubo transmisor tiene ciertas características técnica:

Diámetro exterior del tubo.....	3 mm
Carga reactiva.....	0,18 g/m

Velocidad de transmisión de la onda.....	2.000 m/s
Resistencia a la tracción del tubo.....	20 kg

(Tomado del Manual de Empleo de Explosivos, UEE, S.A.)

1.4.6 Multiplicadores

Se utilizan como iniciadores de voladura para iniciar explosivos de baja sensibilidad, tipo anfo, hidrogeles, emulsiones o heavy anfo. Los multiplicadores colados están compuestos por un cilindro de pentolita, explosivo de alta potencia y velocidad de detonación, que va recubierto de una envuelta de cartón y son de tamaño variable.



Figura 1. 34 Multiplicador de pentolita de 400 g. (Cortesía de UEE, S.A.)

Estos tienen unos orificios axiales que van rodeados de pentrita y que es por donde pasan los accesorios que los iniciarán: cordón detonante, detonadores, etc.

Existen varios tipos de multiplicadores que pueden ser colados, multiplicadores de nitroglicerina y algunos de las más modernas tecnologías normalmente disponibles en la voladura.

1.4.6.1 Multiplicadores colados

Como consecuencia del desarrollo de los derivados de ANFO, y después, de los productos gelatinosos se creó la necesidad de multiplicadores de alta velocidad y alta energía. El desarrollo de mezclas de emulsiones no sensibles, acrecentó la necesidad de estos multiplicadores altamente energéticos. Se dispuso de multiplicadores de nitroglicerina pero en cantidades insuficientes y no pudo abordar la tendencia global de uso de productos sin nitroglicerina en los barrenos.

En la búsqueda de satisfacer esta demanda, se desarrollaron multiplicadores sin nitroglicerina, compactos y de alta presión de detonación para proveer a los usuarios de explosivos de completos y adecuados sistemas de voladura sin NG. El desarrollo de multiplicadores colados se fomentó por la disponibilidad de

explosivos militares puestos en el mercado comercial desde la última parte de los años cincuenta hasta los años sesenta.

A pesar de que los multiplicadores sin nitroglicerina son más resistentes que la dinamita a detonaciones accidentales por impacto, golpe o fricción, se deben utilizar con el mismo cuidado que los otros explosivos.

Los multiplicadores colados son explosivos sensibles al detonador que normalmente contienen como alto explosivo el trinitrotolueno (TNT) como elemento de colado. Dentro del TNT están mezclados diferentes explosivos moleculares que aportan energía adicional y/o sensibilidad al multiplicador. Los explosivos moleculares son materiales energéticos que contienen todos los elementos necesarios para la formación de una reacción de detonación en las moléculas del explosivo.

Algunos tipos de multiplicadores colados son:

- **Multiplicadores de pentolita**

Formados por una mezcla de tetranitrato de pentaeritritol (PETN) y TNT. La formulación típica que contiene 50% de PETN y 50% de TNT, pero algunas marcas de multiplicadores de pentolita contienen proporciones mayores de PETN: normalmente un 60%.

- **Multiplicadores de composición B**

Estos multiplicadores contienen el explosivo militar de composición B (60% RDX (ciclonita), 40% TNT), con alrededor de un 1% de cera de parafina añadido a la mezcla. La mayoría de los multiplicadores con este nombre están diluidos con cantidades adicionales de TNT.

- **Multiplicadores Torpex**

Contienen un explosivo militar formado por una mezcla de RDX, TNT y aluminio.

- **Multiplicadores Amatol/Sodatol**

Son multiplicadores de pentolita o de composición B que contienen cantidades de nitrato de amonio o de nitrato de sodio. Se denominan respectivamente amatol y sodatol.

- **Tetralita o Tetritol**

Formados por mezclas sensibles de tetralita o de tetralita y TNT. Los multiplicadores de tetralita se utilizan normalmente como cargas donantes en los laboratorios de ensayo.

Los multiplicadores colados se pueden iniciar por un detonador eléctrico, detonadores no eléctricos (tubo de choque), cordones detonantes de varias potencias, o detonadores eléctrico con mecha lenta.

Advertencia:

Cuando los multiplicadores colados son iniciados con detonadores no eléctricos o se utilizan junto con sistemas de cordones detonantes de baja energía, el cordón detonante pequeño no deberá ser introducido a través del orificio del multiplicador ya que puede romperlo provocando el fallo. En este sentido, se han desarrollado multiplicadores colados especiales para su uso en estas condiciones.

Hay que señalar que no todas las variedades de multiplicadores colados tienen la sensibilidad necesaria para ser iniciados por los diferentes sistemas de iniciación comentados anteriormente. Muchos de los explosivos militares fueron desarrollados con sensibilidades bajas para disminuir la posibilidad de iniciaciones accidentales en los sistemas de armamento. Esta característica de los sobrantes de los explosivos militares y la demanda de la industria comercial de multiplicadores que se inicien con bajas cargas de cordones detonantes provocaron en los productores de multiplicadores colados la necesidad de desarrollar diferentes estructuras internas o multiplicadores de sensibilidad interna para asegurar la fiabilidad de sus productos en las situaciones diarias de voladura. Se han empleado diversas técnicas para alcanzar la sensibilidad deseada. El

sistema a utilizar dependerá de la sensibilidad del producto original, la capacidad de producción del productor y del nivel de sensibilidad requerida para cada uso.

A efectos prácticos, se acepta que para la iniciación más eficientes la voladura debería utilizar los iniciadores con mayor diámetro que pueda ser cargado en el barreno. Los tipos de multiplicadores colados varían según el diámetro y el tamaño, pesando desde 6 gramos hasta 2.2 kilogramos. Tienen una densidad entre 1.55 y 1.7 g/cc, una excelente resistencia al agua, y detonan con una velocidad comprendida entre 6100 y 7600 m/s o más.

Dependiendo de su aplicación, los multiplicadores se han hecho con diferentes formas cilíndricas. Los multiplicadores cilíndricos más altos fueron diseñados para ser iniciados con detonadores y son más altos de perfil con objeto de poder utilizar detonadores con altura superior a 10.8 cm. Además, el hecho de que estos multiplicadores pueden ser utilizados también con algunos cordones detonantes les ha dado un atractivo más universal.

Los multiplicadores de menor perfil se diseñan para ser iniciados solamente con cordones detonantes. Este hecho disminuye el ámbito de aplicaciones para estos multiplicadores pero permite que la masa se extienda a lo largo del diámetro del multiplicador. Por esta razón, los multiplicadores de bajo perfil se adaptan mejor al diámetro de un barreno que un multiplicador más alto con un peso semejante.

Esta mejor adaptación del diámetro del multiplicador al diámetro del barreno mejora la eficiencia de iniciación del multiplicador.

Durante los últimos años se ha introducido un multiplicador colado cónico. Estos multiplicadores se diseñaron inicialmente para competir con los pesados multiplicadores colados cilíndricos. De igual forma que los multiplicadores de bajo perfil, la masa del multiplicador está moldeada de modo que mejore su ejecución en comparación con multiplicadores cilíndricos de peso semejante. Sin embargo, debido a su forma única y la distribución de la masa, los multiplicadores cónicos han sido utilizados para proteger capas de carbón del daño producido por la energía de una voladura. La base del cono se coloca hacia fuera de la capa de carbón mientras que la punta de éste se coloca hacia la capa. En algunas minas donde los multiplicadores cilíndricos causaban daños al carbón, se han utilizado los multiplicadores cónicos con éxito.

Multiplicadores de pentolita pequeños de 6, 8 y 20 gramos se utilizan en operaciones subterráneas para perforar huecos de pequeño diámetro. Tienen una alta energía y alta presión de detonación parecida a los multiplicadores colados grandes, y pueden ser almacenados por largos períodos con diferentes condiciones de humedad y temperatura asociadas a diferentes operaciones subterráneas. Debido a la gran energía, calor y velocidad de estos multiplicadores, no se permite su uso en minas u otras operaciones subterráneas que requieran “MSHA Explosivos Permitidos”.

- **Multiplicadores Deslizantes**

Este tipo de multiplicadores colados da un retraso dentro del hueco y necesita un cambio en el diseño de la cubierta del multiplicador. Los multiplicadores deslizantes se utilizan en columnas del barreno que están separadas por espaciadores de material inerte con objeto de facilitar que la columna rellena detone con diferentes intervalos: esto disminuye la cantidad de explosivos que detona sin un intervalo de tiempo dado, reduciendo la vibración. Los espaciadores de material inerte se utilizan también en un área vacía. Los multiplicadores tienen un tubo de cartón o de plástico unido al lateral o son colados en una cubierta de plástico que tiene un tubo de molde en forma de cordón. Un detonador no eléctrico de pequeño avance se pasa a través del tubo y dentro de la unidad. Armada la carga, se desliza un cordón detonante para ser colocado en donde se necesite en el barreno. Cuando se prende el cordón, actúa como una línea de señal para encender los diferentes retrasos que están ensartados en los diferentes multiplicadores en la columna de espaciadores.

- **Multiplicadores Plastificados**

Estos multiplicadores se asemejan a pequeños tubos de goma, aproximadamente del tamaño del dedo índice. Estos multiplicadores son sensibles al detonador son mezclas extruídas de PETN y un ligante elastomérico. El ligante da a la unidad una apariencia y textura de una goma. Algunos tipos de estas unidades son

coloquialmente llamadas multiplicadores “bubble gum”. Es posible que la producción de estos materiales haya cesado, pero se guardan ante la posibilidad de que se puedan utilizar todavía en algunas áreas.

Los multiplicadores plastificados se utilizan para iniciar varios productos en las operaciones en superficie y subterráneas en barrenos de diámetro superior a 114mm. Ellos son compatibles con detonadores eléctricos, detonadores de mecha, cordón detonante de 50-gramos, y con ciertos detonadores no eléctricos. Algunas de las características de estos multiplicadores son:

Actuación:

Detonan a una velocidad de 7315 m/s o un 15 por ciento mayor que la mayor velocidad de detonación de las dinamitas. Esta gran velocidad, junto con una densidad de 1.5 g/cc, produce una gran presión de detonación y energía de iniciación.

A efectos prácticos se pueden considerar no direccionales:

Pueden reducir los "pateos", aumentar el desplazamiento de la roca en las voladuras de avance, e iniciar cargas de columna eficientemente. Además, tienen una excelente resistencia al agua, una vida media de tres a cinco años en

condiciones normales de temperatura, y trabajan en un rango de temperaturas de – 40°F a 225°F (-40°C a 102°).

Seguridad:

Los ensayos de impacto, choque y fuego han demostrado tienen unas condiciones de seguridad mucho mejores que los productos derivados de la nitroglicerina.

1.4.6.2 Multiplicadores con base de nitroglicerina

Los multiplicadores compuestos por una base de nitroglicerina (NG) se utilizan todavía con profusión (por ejemplo las dinamitas gelatinosas). Estos multiplicadores se utilizan normalmente con forma cilíndrica de 50 x 200 mm, 760 x 200 mm o mayores. Los multiplicadores con base de nitroglicerina más comúnmente vendidas son gelatinas nitratoamónicas, normalmente llamadas “gelatinas extra”. El multiplicador NG ideal sería un producto gelatinoso que redujera o eliminase cualquier anomalía provocada por condiciones de humedad, y debería tener un 60% más de fuerza para desprender suficiente presión de detonación como para iniciar barrenos de tamaño medio o grande conteniendo agentes de voladura.

Los fabricantes de dinamita han introducido las gelatinas NG en botes de plástico que tienen orificios. Este intento se hizo para ofrecer un multiplicador de NG de

uso más fácil en terreno. Los botes se asemejan a un multiplicador colado. Hay solamente una planta de nitroglicerina fabricando productos en los Estados Unidos.

1.4.6.3 Multiplicadores Especiales

- **Multiplicadores de Perclorato**

Durante la última década se han desarrollado dos tipos diferentes de multiplicadores de perclorato sódico. El primer tipo fue una mezcla slurry que fue elaborada por dos fabricantes diferentes pero ya no está disponible. El más reciente desarrollo consiste en una fórmula de sodio perclorato/glycol di etilénico colado que es un slurry durante la fabricación pero que solidifica cuando se vierte en el envase. Este material forma una pasta dura salina que desarrolla la sensibilidad al detonador mientras está solidificando. Debido a su falta de resistencia al agua debe ser protegidas de las condiciones húmedas del sondeo o barrenos mediante su envoltura. Este multiplicador de perclorato sódico tiene una alta densidad y su velocidad varía con el diámetro. Se han utilizado con mejor aceptación para aplicaciones sísmicas, donde los multiplicadores colados (con su alta densidad y velocidades de detonación, por tanto, alta presión de detonación) han tenido mucho éxito.

- **Multiplicadores Sobre-deslizante, Cartucho Metálico**

Este producto es un cartucho detonador con una base de PETN prensada. El extremo abierto de la cubierta está alargado para que se deslice un detonador eléctrico o no eléctrico. Este tipo de multiplicadores normalmente contiene 2 g de carga, y se utiliza para facilitar al detonador la iniciación con éxito del ANFO en pequeño diámetro de barrenos subterráneos. Este tipo ya no se fabrica en Estados Unidos, pero se puede encontrar en el inventario de muchas minas subterráneas.

1.4.7 Sistemas de Iniciación utilizados en Ecuador

Entre el tipo de iniciadores y accesorios de voladura que se utilizan en Ecuador producidos por EXPLOCEN C.A., se tiene:

- **Pentolitas A.P.D.**

Pentolita Sísmica (Normal y Dirigida)

Iniciadores A.P.D., en 450 g, 225 g, y 150g.

Rompedores cónicos A.P.D. de 1500 g

, 225 g y 150 g.

- **Accesorios**

Cordón detonante de 10 g y 5 g,

Mecha de seguridad

Fulminantes No eléctricos ordinarios, Tecneles y Conectores de superficie.

Fulminantes eléctricos instantáneos. M.S., L.P. y Sísmicos.

CAPITULO II

DETERMINACION DEL PODER DE INICIACION DE MULTIPLICADORES

2.1 ANALISIS TEORICO

Debido a que ciertos explosivos son insensibles al detonador, su iniciación se la realiza con la ayuda de multiplicadores que son iniciadores de voladuras que se utilizan para iniciar explosivos de baja sensibilidad, tipo anfo, hidrogeles, emulsiones o heavy anfo.

La efectividad de un sistema de iniciación está determinada por algunas propiedades incluyendo su presión de detonación, energía y resistencia al agua. Además, la eficiencia de un sistema de iniciación esta relacionada a otras consideraciones incluyendo el tamaño del iniciador y la compatibilidad del sistema de iniciación con la carga principal de explosivos.

2.1.1 Presión de detonación

Esta es función de la velocidad y densidad, puede ser aproximada con diferentes formulaciones como:

$$P = 2.5 * d * VOD^2 * 10^{-6}$$

Donde: P = presión de detonación en kilobars

D = densidad (g/cc)

VOD = velocidad de detonación (m/s)

$$P = \frac{4.8 * 10^{-7} * d * VOD^2}{1 + 0.8 * d} \quad (\text{fps}) \text{ (fórmula USBM)}$$

El uso de diferentes métodos para calcular la presión de detonación puede resultar en altos o bajos valores dependiendo del método empleado. Resulta muy difícil medir directamente estas presiones. Muchos métodos empleados resultaron exitosos pero requieren de equipos caros de prueba y una interpretación compleja. Este trabajo esta quedando para la investigación científica. La voladura puede escoger alguno de los métodos de cálculo arriba descrito para comparar iniciadores diferentes.

El papel de la presión de detonación es admitido como muy importante en la iniciación de otros explosivos. Una regla a observar es que la presión de detonación de un sistema de iniciación exceda a la presión de detonación del explosivo a ser iniciado. En ciertas circunstancias, un iniciador con menor presión de detonación que la carga receptora (el explosivo a ser iniciado) puede iniciar la carga. Sin embargo, esto da lugar usualmente a una velocidad de detonación inferior. Se requiere un largo tiempo para que el explosivo pueda crear una velocidad de detonación constante o completa. Durante este tiempo transcurrido (y por esa longitud del barreno), el explosivo no desarrolla la presión completa o la máxima energía. En ciertas condiciones especiales, la velocidad de detonación nunca puede desarrollarse y el explosivo detonará en bajo orden o, más probable, falla completamente.

2.1.2 Energía

Un multiplicador debe tener suficiente energía para iniciar la reacción de detonación en la carga principal y sostener ésta hasta que el explosivo iniciado produzca suficiente energía para soportar la reacción de detonación por ella misma. La energía de un multiplicador es derivada de la densidad de energía (energía por volumen) y tamaño. Todo lo mayor que sea la diferencia entre el diámetro del multiplicador y el diámetro del barreno, la presión de detonación y la densidad de energía del multiplicador debe ser incrementada para mantener una

iniciación adecuada. Si la diferencia es demasiado grande, la iniciación puede llegar a ser inadecuada, debiendo utilizarse un iniciador de mayor tamaño.

2.1.3 Resistencia al agua

Como la mayoría de los sistemas de iniciación están colocados en el fondo del barreno donde el agua podría encontrarse, la resistencia al agua del sistema de iniciación debería ser suficiente para resistir a la exposición en estas profundidades y el tiempo requerido en la situación de voladura.

2.2 INDICES DE PODER DE INICIACION

Para tener un valor cuantificable sobre el poder de iniciación de los multiplicadores, se ha establecido en el marco del Comité Europeo de Normalización seis índices de poder de iniciación, en los que según el caso, se introducen como variables la energía específica (kJ/kg), velocidad de detonación (VOD en m/s), peso (kg), densidad (kg/m³) y área de sección recta (m²).

Los resultados que se obtuvieron están dados en la Tabla 2, el material explosivo está ordenado desde explosivos tipo anfo, explosivos pulverulentos, hidrogeles, emulsiones, explosivos gelatinosos hasta altos explosivos. Se incluyen, junto a los explosivos españoles, explosivos alemanes y austriacos con los cuales se ha realizado el trabajo de comparación.

A continuación vamos a definir las expresiones de los cinco primeros índices de poder iniciador:

Índice de poder de iniciación 1 (IPI1)

$$\text{IPI1} = \text{energía específica} * \text{VOD} * \text{peso}/1000$$

Índice de poder de iniciación 2 (IPI2)

$$\text{IPI2} = \text{energía específica} * \text{VOD} * \text{VOD} * \text{peso}/1000$$

Índice de poder de iniciación 3 (IPI3)

$$\text{IPI3} = \text{densidad} * \text{energía específica} * \text{VOD} * \text{peso}/1000$$

Índice de poder de iniciación 4 (IPI4)

$$\text{IPI4} = \text{densidad} * \text{energía específica} * \text{VOD} * \text{VOD} * \text{peso}/1000$$

Índice de poder de iniciación 5 (IPI5)

$$\text{IPI5} = \text{densidad} * \text{VOD} * \text{VOD} * \text{área de sección recta}$$

Los cuatro primeros índices consideran el peso del material explosivo y nos dan valores elevados para los altos explosivos tipo PETN, TNT y sus mezclas como es de esperarse. Sin embargo, no existe una diferencia muy importante entre explosivos tipo anfo (Nagolita, alnafo, etc.), pulverulentos (Amonita 2-I, Ligamita

1) con respecto a los explosivos tipo emulsiones (Riomex E/20/24/26), gelatinosos (gomas) resultados que no se comparan con lo real. Por ello, el índice 5 no considera el peso y parece más apropiado al establecer una diferencia significativa con valores elevados para los altos explosivos y valores muy inferiores para los explosivos tipo anfo.

Para una mejor comprensión se ha incluido el índice de poder iniciador 6, que compara exclusivamente propiedades del explosivo como son la densidad y velocidad de detonación y que, además, es una medida de la presión de detonación. Naturalmente el índice 6 es análogo al 5, ya que para este último se mantiene fija el área o el diámetro.

Índice de poder de iniciación 6 (IPI6)

$$\text{IPI6} = \text{densidad} * \text{VOD} * \text{VOD}$$

En los Gráficos del 2.1 al 2.7 se representan los índices obtenidos para los diferentes explosivos.

Tabla 2.1 Índices de Poder Iniciador teórico de diferentes explosivos

Material	densidad kg/m ³	energía específica kJ/kg	VOD km/s	peso kg	índice de poder iniciador 1	índice de poder iniciador 2	índice de poder iniciador 3	índice de poder iniciador 4	índice de poder iniciador 5/1000	índice de poder iniciador 6
Naurita	0,80		2,00	1					6,4	3,2
Nagolita	0,80	1026	2,50	1	2,6	6,4	2,1	5,1	10,0	5,0
Alnafo	0,80	1095	2,50	1	2,7	6,8	2,2	5,5	10,0	5,0
ANFO Andex 1	0,90	1010	3,00	1	3,0	9,1	2,7	8,2	16,2	8,1
Amonita 2-I	1,10	921	3,00	1	2,8	8,3	3,0	9,1	19,8	9,9
Ligamita 1	1,15	1029	3,00	1	3,1	9,3	3,6	10,7	20,7	10,4
Riogel 2	1,17	864	4,50	1	3,9	17,5	4,5	20,5	47,4	23,7
Lambrex 1	1,20	765	5,60	1	4,3	24,0	5,1	28,8	75,3	37,6
Nobelit 310	1,16	695	4,50	1	3,1	14,1	3,6	16,3	47,0	23,5
Riomex E 20	1,18	760	4,80	1	3,6	17,5	4,3	20,7	54,4	27,2
Riomex E 24	1,18	819	4,80	1	3,9	18,9	4,6	22,3	54,4	27,2
Riomex E 26	1,18	840	4,80	1	4,0	19,4	4,8	22,8	54,4	27,2
Goma 2E-C	1,45	1121	5,30	1	5,9	31,5	8,6	45,7	81,5	40,7
Goma 1E-D	1,48	1158	5,30	1	6,1	32,5	9,1	48,1	83,1	41,6
Ammongelite 2	1,44	1128	5,80	1	6,5	37,9	9,4	54,6	96,9	48,4
Trinitrotoluene pressed	1,56	908	6,50	1	5,9	38,4	9,2	59,8	131,8	65,9

Material	densidad kg/m ³	energía específica kJ/kg	VOD km/s	peso kg	índice de poder iniciador 1	índice de poder iniciador 2	índice de poder iniciador 3	índice de poder iniciador 4	índice de poder iniciador 5/1000	índice de poder iniciador 6
90% TNTc+10% PETN	1,62	1003	7,05	1	7,1	49,8	11,4	80,6	160,7	80,4
PETN 7% Wax	1,60	1120	7,50	1	8,4	63,0	13,4	100,8	180,0	90,0
Pentolita	1,65	1092	7,40	1	8,1	59,8	13,3	98,7	180,7	90,4
RDX 5% Wax	1,60	1302	7,70	1	10,0	77,2	16,0	123,5	189,7	94,9
Trinitrotolueno cast	1,60	908	6,90	1	6,3	43,2	10,0	69,2	152,4	76,2
60% TNTc+40% RDX	1,65	1093	7,80	1	8,5	66,5	14,1	109,7	200,8	100,4
PETN	1,77	1204	8,40	1	10,1	85,0	17,9	150,4	249,8	124,9
RDX	1,82	1370	8,75	1	12,0	104,9	21,8	190,9	278,7	139,3

Tabla 2.1 Índices de Poder Iniciador teórico de diferentes explosivos (Continuación)

NOTA:

El diámetro que se utiliza es de 50 mm
en el cálculo del área de sección recta
dado en m².

área de sección recta = 2×10^{-3} m²

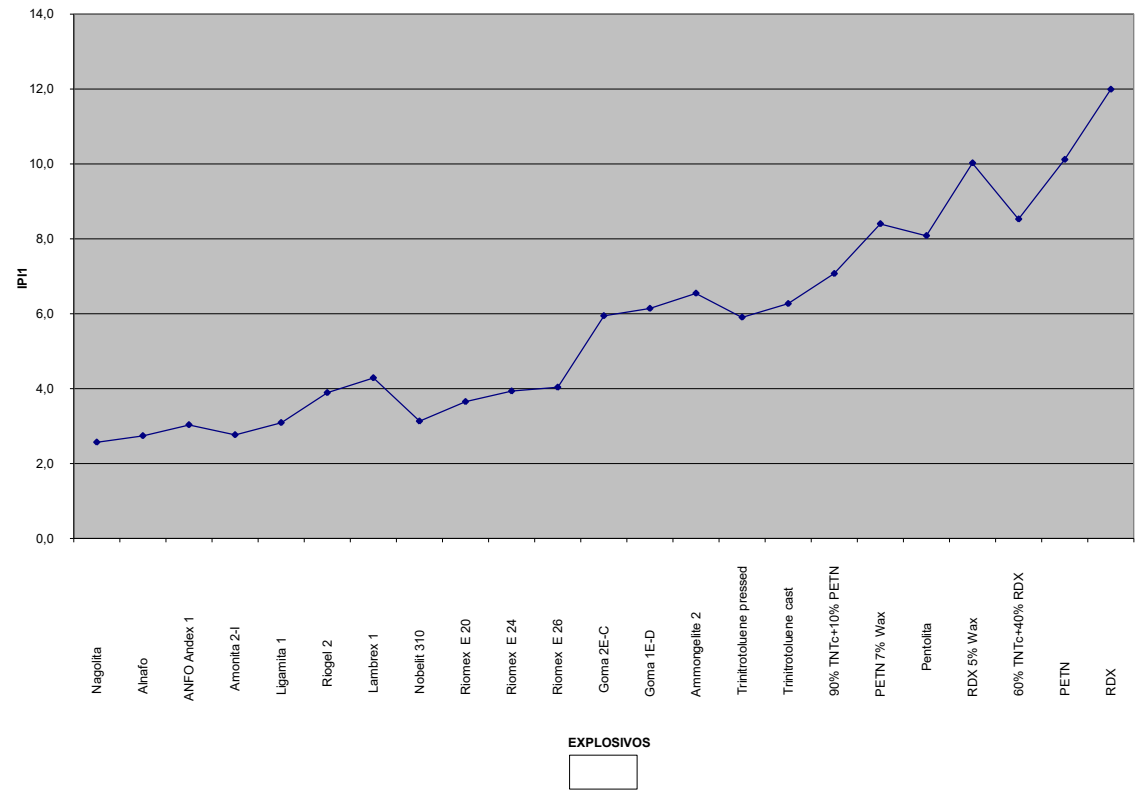
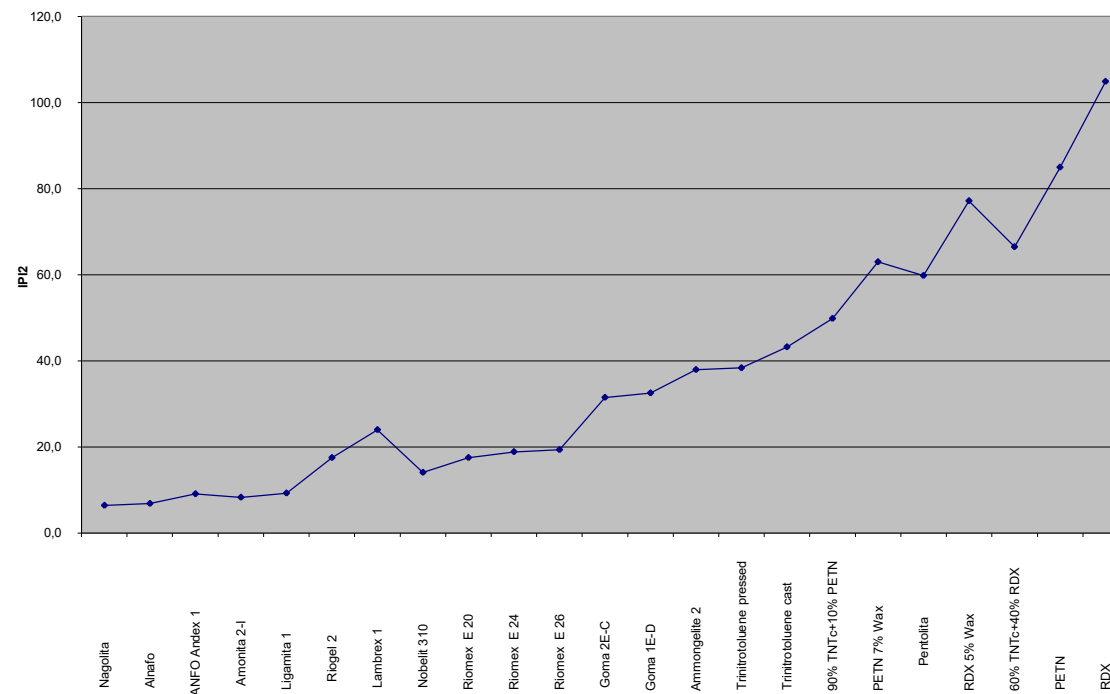


Figura 2. 1 Índice de poder iniciador 1 (IPI)



EXPLOSIVOS



Figura 2. 2 Índice de poder iniciador 2 (IPI2)

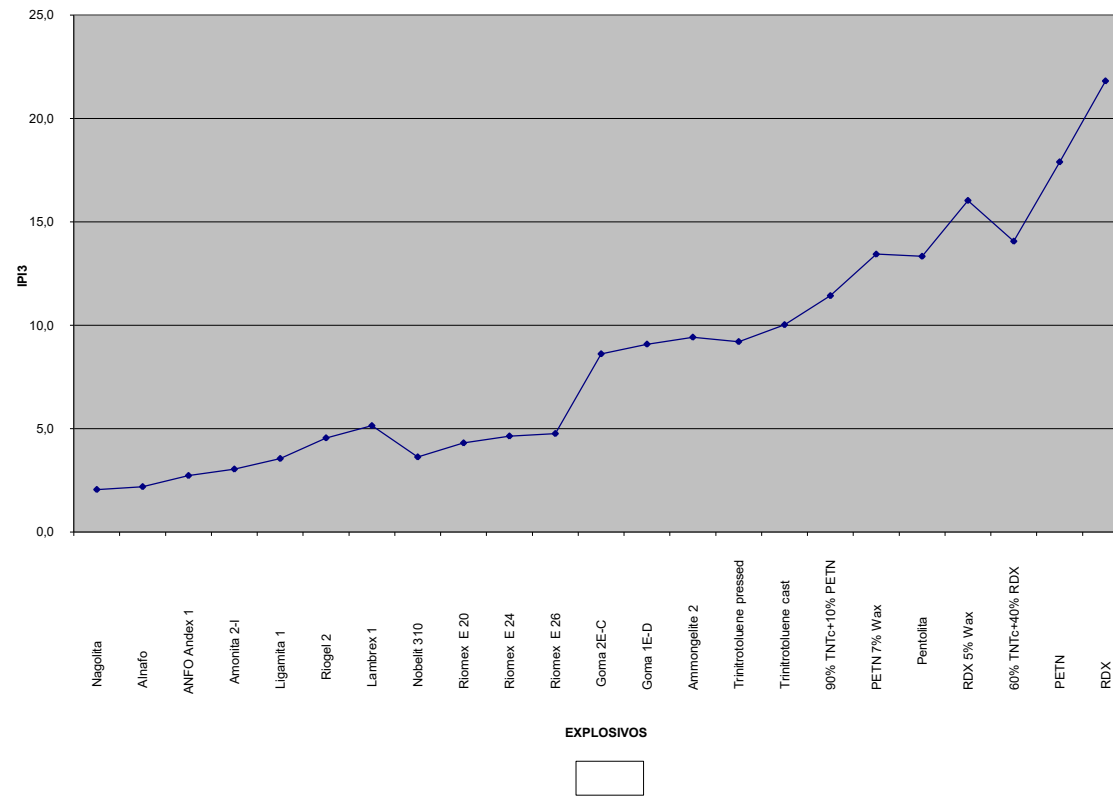


Figura 2. 3 Índice de poder iniciador 3 (IPI3)

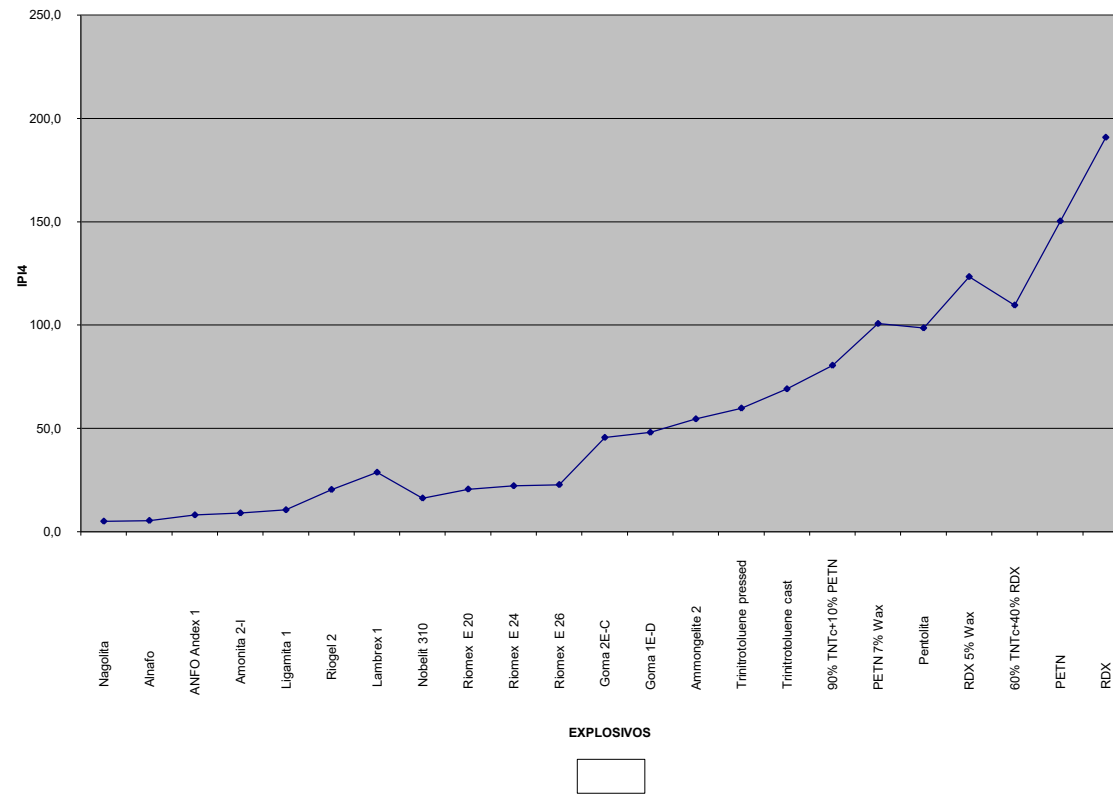


Figura 2. 4 Índice de poder iniciador 4 (IPI4)

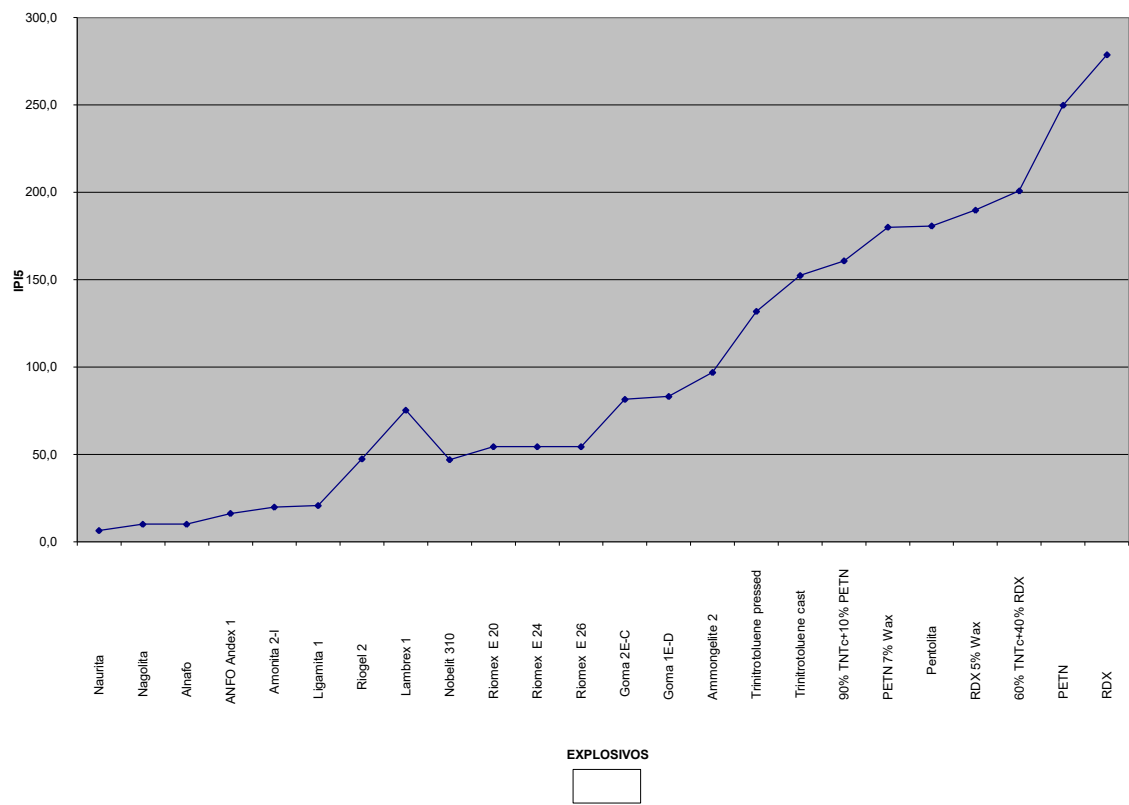


Figura 2. 5 Índice de poder iniciador 5 (IPI5)

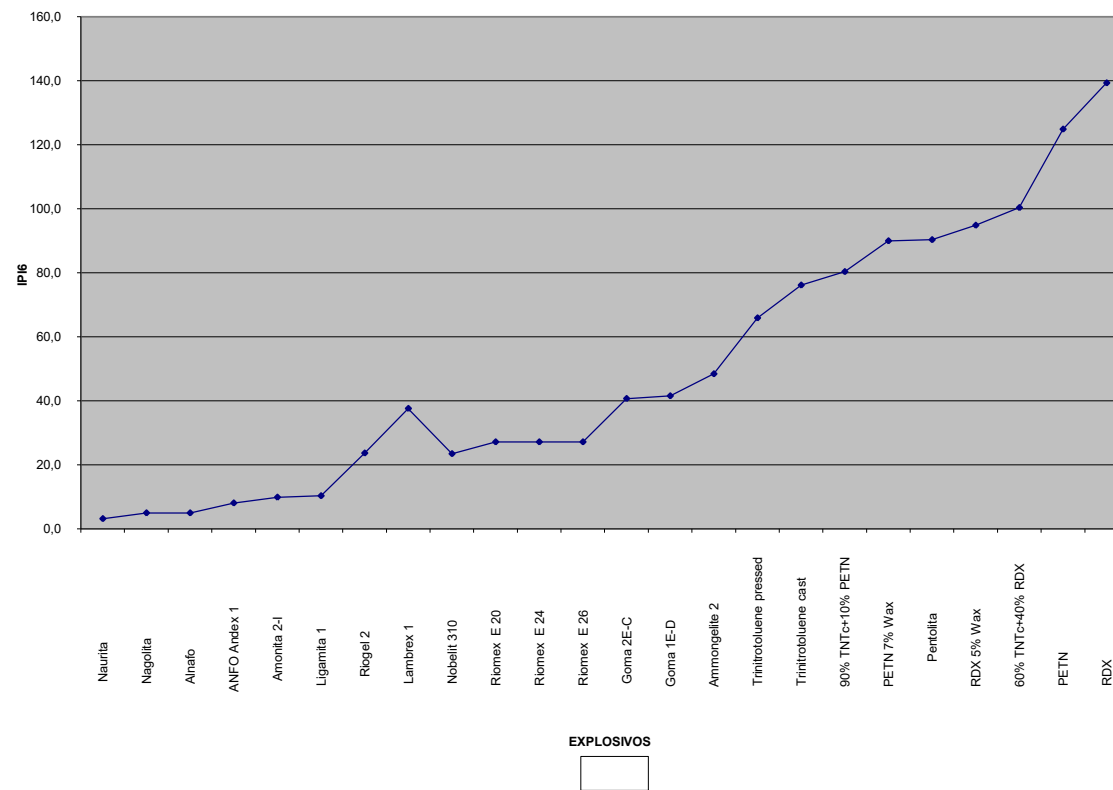


Figura 2. 6 Índice de poder iniciador 6 (IPI6)

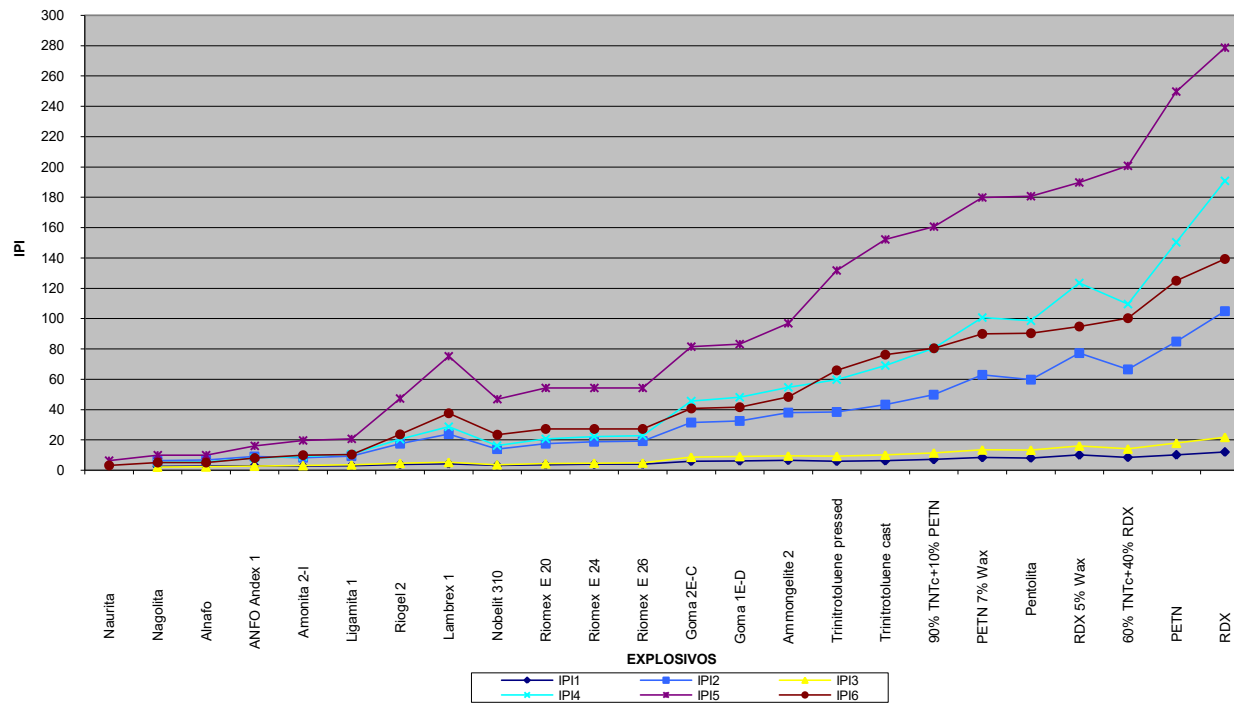


Figura 2. 7 Indices de poder iniciador

CAPITULO III

PROCESO EXPERIMENTAL

3.1 OBJETIVO

Verificar el poder de iniciación relativo de diferentes explosivos, utilizando para ello un explosivo receptor insensible al detonador, Nagolita.

3.2 MÉTODO DE ENSAYO

Consiste en variar el diámetro del explosivo dador y medir la velocidad de detonación del explosivo receptor. Se verificará que, a medida que se incrementa el diámetro del explosivo dador, la velocidad del explosivo receptor también se incrementará, como se muestra en el Figura 3.1. Tanto mayor sea el poder de iniciación, para un diámetro dado, mayor será la velocidad de detonación del explosivo receptor. Así en el Figura 3.1 el Explosivo 2 tendrá mayor poder de iniciación que el Explosivo 1.

La velocidad de detonación del explosivo la vamos a medir por el método con contador de tiempo (con fibra óptica).

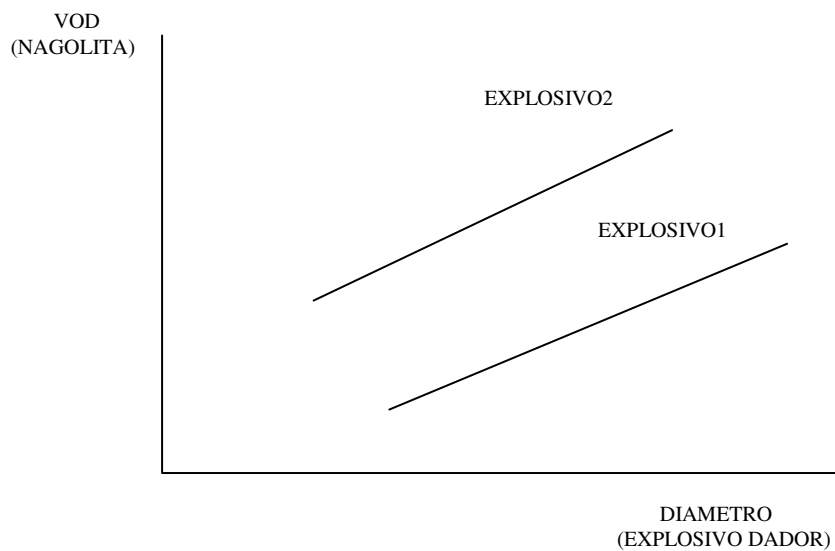


Figura 3.1. Índice de poder iniciador

3.2.1 Materiales

- Explosivo receptor: Nagolita en 55 mm de diámetro encartuchado en plástico.
- Explosivos dadores: Riogel 2 en 55, 32, 18 y 26 mm de diámetro; Goma 2E-C de 55, 40, 32 y 26 mm de diámetro; Riomex E20 en 55, 40, 32 y 26 mm de diámetro; Riomex E24 en 55, 40, 32 y 26 mm de diámetro; comprimidos de pentrita

- Multiplicadores de pentolita.
- Detonadores de ensayos # 8.
- Mecha lenta.

Para cada ensayo se toman tres muestras del explosivo dador. Como mínimo, cada explosivo dador deberá dispararse en tres diámetros; a su vez, para cada diámetro deberán realizarse tres disparos.

3.2.2 Método para medir la velocidad de detonación

Para medir la velocidad de detonación de los explosivos se pueden utilizar los métodos que se describen a continuación:

- con cordón detonante (Método Dautiche)
- con contador de tiempo

3.2.2.1 Con cordón detonante (Método Dautriche)

3.2.2.1.1 Descripción

La velocidad de detonación se obtiene estableciendo una relación entre una velocidad conocida y otra desconocida, en función de los tiempos que es variable

y las distancias recorridas por ondas de choque que se puede establece como constante.

Las dos ondas de choque que se desplazan en sentidos opuestos, en circuito cerrado, se interceptan lo que produce una marca sobre una placa de plomo. Para cada ensayo se toman tres muestras del explosivo.

3.2.2.1.2 Materiales

- Placa de plomo con unas medidas aproximadas de 7 mm de espesor, 4 mm de anchura y 300 mm de longitud.

- Detonadores de mecha.

- Detonadores de ensayo.

- Calibre o regla graduada.

- Cordón detonante de 10 a 12 g/m de contenido de explosivo, sabiendo su velocidad de detonación.

3.2.2.1.3 Método operatorio

Para cada ensayo los cartuchos de explosivo pueden estar en su forma comercial o confinados, dependiendo del resultado que se quiera obtener.

El cordón detonante se corta en una longitud de 2 m, su punto medio se marca exactamente. Se asegura con cinta adhesiva el cordón detonante a la placa de plomo, además, debe coincidir el punto medio del cordón con una señal marcada en la placa, a unos 25-30 mm de un extremo de la placa.

Se colocan en los extremos del cordón detonante dos detonadores de mecha. Los mismos que se introducen en dos orificios realizados sobre la muestra a 100 mm (D) uno de otro, que se miden a lo largo del cartucho, dejando una distancia mínima de 50 mm. Esta distancia es del primer detonador hasta el culote del detonador o extremo del multiplicador, que se utiliza para iniciar el explosivo.

El explosivo se inicia con un detonador de ensayos y se mide la distancia (d) entre la señal realizada anteriormente en la placa y la huella que ha dejado en la misma, como resultado del encuentro de las dos ondas de choque.

3.2.2.1.4 Cálculos

Se calcula la velocidad de detonación del explosivo con la fórmula:

$$V_e = \frac{D}{2d} \times V_c$$

V_c = Velocidad de detonación del cordón, conocida (m/s)

V_e = Velocidad de detonación del explosivo, desconocida (m/s)

D = Distancia fija (100 mm)

d = Distancia obtenida de la placa, entre la marca inicial y la producida por el encuentro de las ondas (mm)

Para explosivos insensibles al detonador de ensayos, se puede utilizar un multiplicador.

3.2.2.1.5 Expresión de los resultados

El valor de la velocidad de detonación del explosivo será la media de los tres resultados obtenidos, la misma que expresa en m/s. Además, deberá indicarse:

- Diámetro en que se realiza el ensayo.

- Densidad del explosivo.
- Densidad del explosivo.
- Temperatura del explosivo.
- Para los casos en que se realice confinado, tendrá que decirse que tipo de confinamiento se utilizó.
- Tipo de multiplicador utilizado, especificándose su masa y composición.

3.2.2.2 Con contador de tiempo

3.2.2.2.1 Descripción

En este método se mide el tiempo en que recorre la onda de detonación una distancia determinada, de esta manera se puede obtener la velocidad de detonación del explosivo. Para cada ensayo se toman tres muestras.



Foto 3. 1 Contador de Tiempo

3.2.2.2.2 Materiales

- Se utiliza un contador de tiempo, con precisión de, al menos, 0.1 microsegundo.
- Un cable coaxial de 6 a 8 mm de diámetro, con bornes para conectar al contador.
- Hilo de cobre esmaltado de 0.2 a 0.5 mm de diámetro.
- Fibra óptica, con una longitud adecuada, en función de su atenuación. (método alternativo al uso de hilo de cobre).
- Acondicionador de señales, para la conversión de la señal luminosa en señal eléctrica, cuando se emplea fibra óptica.

- Detonador de ensayos.

3.2.2.2.3 Método operatorio

3.2.2.2.3.1 Con sondas de cobre

En el cartucho de la muestra a ensayar se colocan dos de sondas a una distancia igual o mayor de 100 mm una de otra. Las sondas deben de un tamaño de hilo de cobre esmaltado de unos 250 mm de longitud, con las puntas peladas en unos 20 a 30 mm, dobladas a la mitad, se retuercen entre sí sus dos mitades y se cortan por el punto el medio.

El primer hilo en sus puntas descubiertas, es decir, el más cercano al extremo del cartucho por donde se inicia, se une al cable apantallado conectado al borne de puesta en marcha del contador, y las puntas del segundo hilo se unen al cable de parada. La primera sonda debe estar a una distancia de 50mm entre el culote del detonador o el extremo del multiplicador como mínimo.

La iniciación del cartucho se lo hace con un detonador de ensayos. La onda de detonación al llegar a la primera sonda cierra el circuito, lo que pone en marcha el contador de tiempo. Siguiendo este principio, la segunda sonda detiene el contador de tiempo. Luego se anota el tiempo que el contador registra.

3.2.2.3.2 Con fibra óptica

De forma análoga al método con sonda de cobre se puede determinar la velocidad de detonación de un explosivo empleando fibra óptica. Para esto se utilizan dos líneas de fibra de óptica, que sustituyen al hilo de cobre esmaltado y que realizan el mismo trabajo.

Las dos líneas de fibra óptica deben estar recubiertas en sus extremos, para garantizar su opacidad, las mismas que se introducen en los dos orificios practicados en el cartucho de explosivo. Además, las dos líneas se conectan a un acondicionador de señales, transforma la señal luminosa en señal eléctrica, que está conectado al contador por dos líneas de cable coaxial.



Foto 3. 2 Preparación de la carga explosiva

3.2.2.2.4 Expresión de los resultados

Para determinar la velocidad de detonación se utiliza la fórmula:

$$V = D / t$$

V = Velocidad de detonación (m/s)

D = Distancia entre las sondas (m)

t = Tiempo registrado por le contador (s)

La media de los tres resultados obtenidos será la velocidad de detonación, cuyo valor viene dado en m/s. Además, deberá indicarse:

- Diámetro en que se realiza el ensayo.
- Densidad del explosivo.
- Temperatura del explosivo.
- Para los casos en que se realice confinado, tendrá que decirse que tipo de confinamiento se utilizado.
- Tipo de multiplicador utilizado, especificándose su masa y composición.



Foto 3. 3 Ensayo para medir la velocidad de detonación de Anfo

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCION

Luego de realizar los ensayos que consistieron en medir la velocidad de detonación del explosivo receptor variando el diámetro del explosivo iniciador (dador). Además, se midió la velocidad de detonación de cada uno de los explosivos iniciadores.

Los resultados de las velocidades de detonación del explosivo receptor insensible al detonador, en nuestro caso Nagolita, se lo comparó con un valor normalizado de la velocidad de detonación el mismo que se calculó como el promedio de la velocidad de detonación de la Nagolita iniciado con comprimido de PETN y es 1993,25 m/s. Tomando este valor se corrigió cada uno de los valores de velocidad de detonación de la Nagolita, que se

obtuvieron con los diferentes explosivos utilizados como iniciadores. La razón de obtener este valor de velocidad de detonación normalizado es para poder comparar, a partir de un valor común, cada uno de los diferentes explosivos.

Tabla 4.1 Índices de Poder Iniciador experimentales de diferentes explosivos

Material	diámetro mm	densidad kg/m ³	energía específica kJ/kg	VOD km/s	peso kg	índice de poder iniciador 1	índice de poder iniciador 2	índice de poder iniciador 3	índice de poder iniciador 4	índice de poder iniciador 5/1000	índice de poder iniciador 6
Riogel 2	18	1,17	864	3,009	0,100	0,3	0,8	0,3	0,9	2,696	10,6
Riogel 2	26	1,17	864	3,210	0,155	0,4	1,4	0,5	1,6	6,401	12,1
Riogel 2	32	1,17	864	4,175	0,230	0,8	3,5	1,0	4,1	16,402	20,4
Riogel 2	55	1,17	864	5,095	1,390	6,1	31,2	7,2	36,5	72,159	30,4
Goma 2E-C	26	1,45	1121	1,685	0,150	0,3	0,5	0,4	0,7	2,186	4,1
Goma 2E-C	32	1,45	1121	2,804	0,215	0,7	1,9	1,0	2,7	9,169	11,4
Goma 2E-C	40	1,45	1121	3,056	0,420	1,4	4,4	2,1	6,4	17,017	13,5
Riomex E20	26	1,18	760	4,831	0,155	0,6	2,7	0,7	3,2	14,622	27,5
Riomex E20	32	1,18	760	5,263	0,230	0,9	4,8	1,1	5,7	26,287	32,7
Riomex E20	40	1,18	760	5,492	0,500	2,1	11,5	2,5	13,5	44,725	35,6
Riomex E20	55	1,18	760	5,370	1,390	5,7	30,5	6,7	35,9	80,844	34,0
Riomex E24	26	1,18	819	4,952	0,155	0,6	3,1	0,7	3,7	15,363	28,9
Riomex E24	32	1,18	819	5,238	0,230	1,0	5,2	1,2	6,1	26,038	32,4
Riomex E24	40	1,18	819	5,379	0,500	2,2	11,8	2,6	14,0	42,904	34,1
Riomex E24	55	1,18	819	5,641	1,390	6,4	36,2	7,6	42,7	89,209	37,5
Pentolita	35	1,65	1092	7,000	0,150	1,1	8,0	1,9	13,2	77,787	80,9
PETN	21	1,77	1204	7,500	0,015	0,1	1,0	0,2	1,8	34,485	99,6

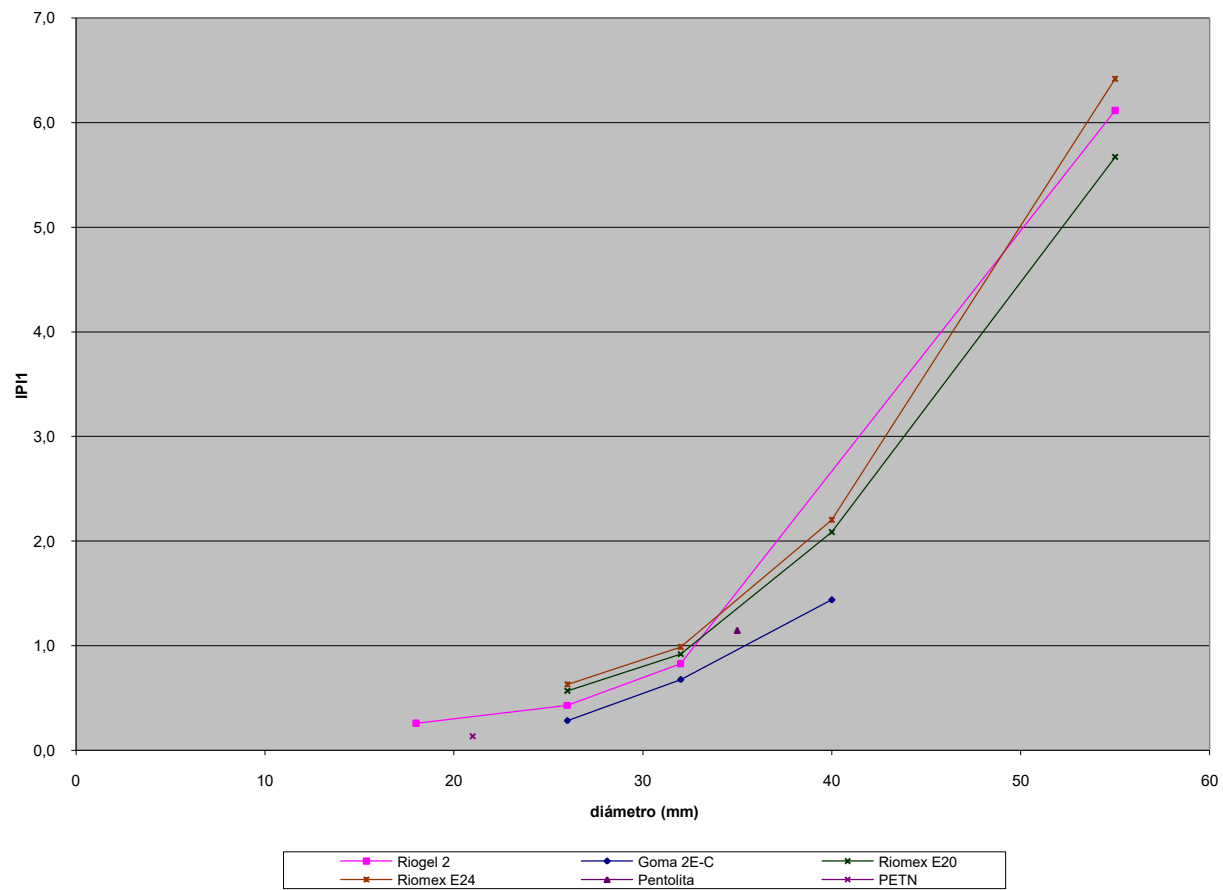


Figura 4.1 Índice de poder iniciador 1 (IPI1)

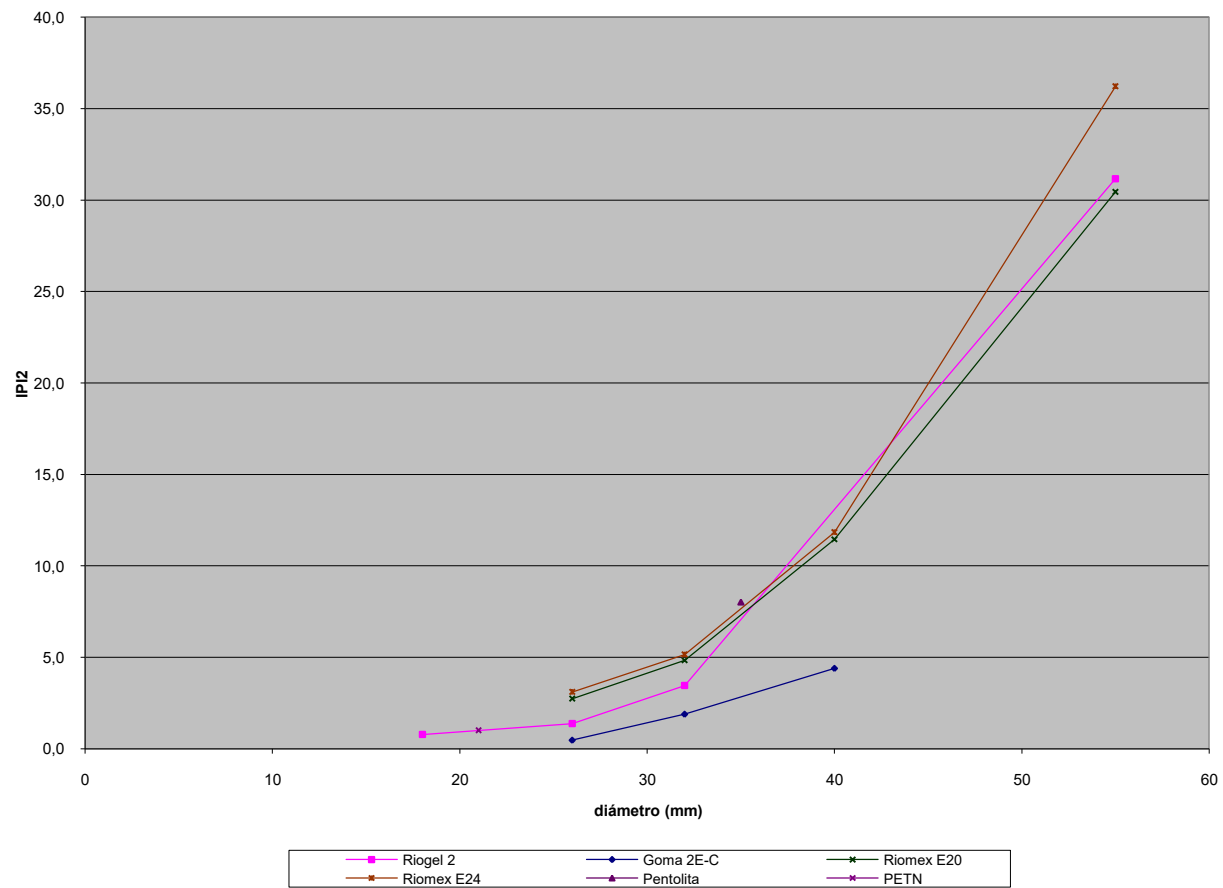
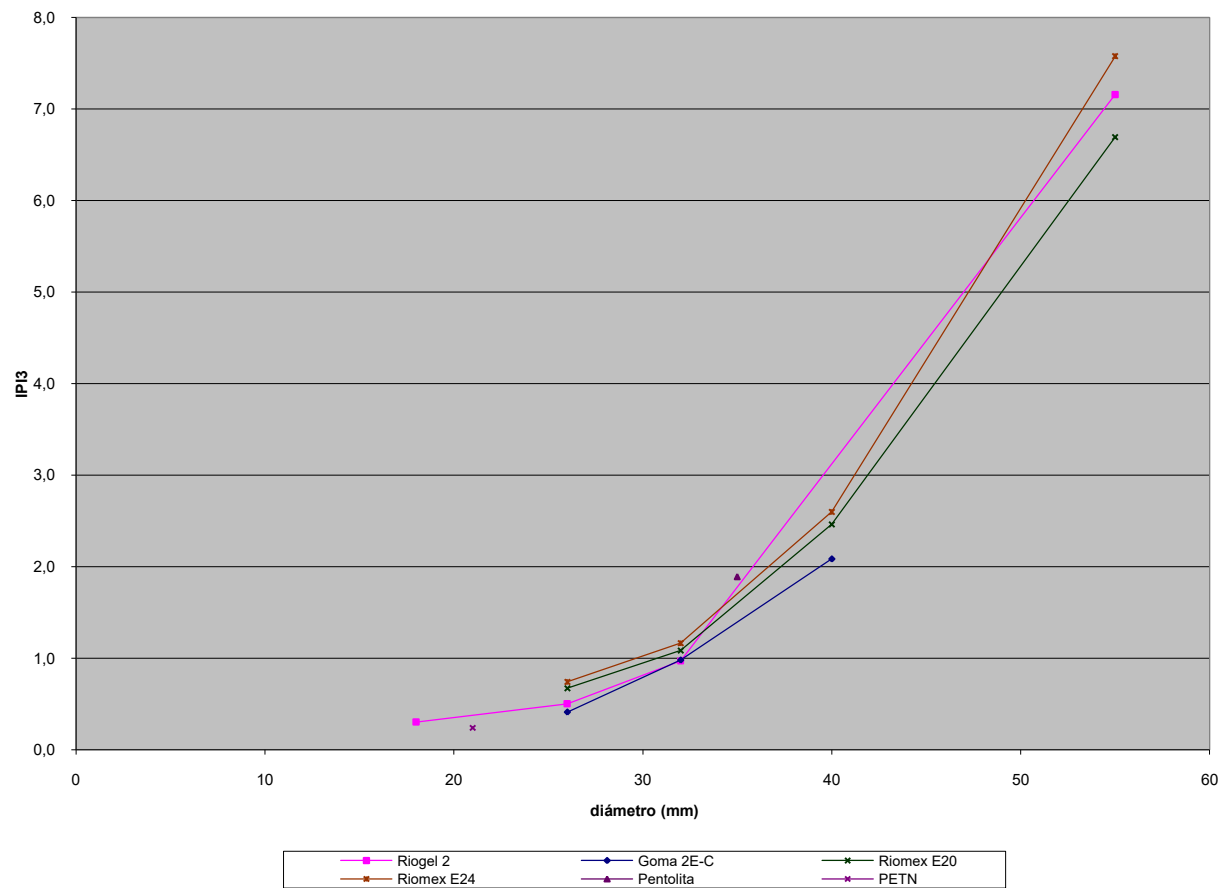


Figura 4.2 Índice de poder iniciador 2 (IPI2)



[Figura 4.3 Índice de poder iniciador 3 (IPI3)]

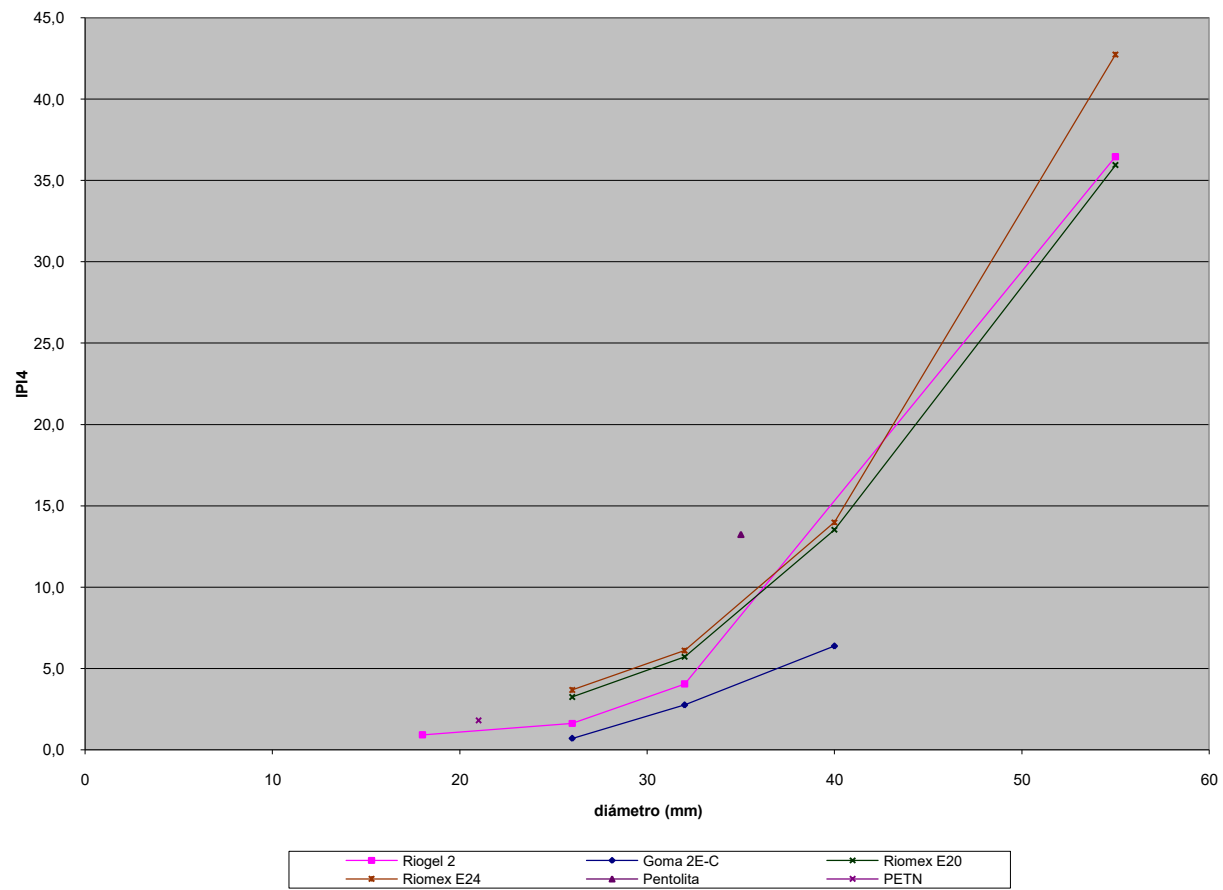


Figura 4.4 Índice de poder iniciador 4 (IPI4)

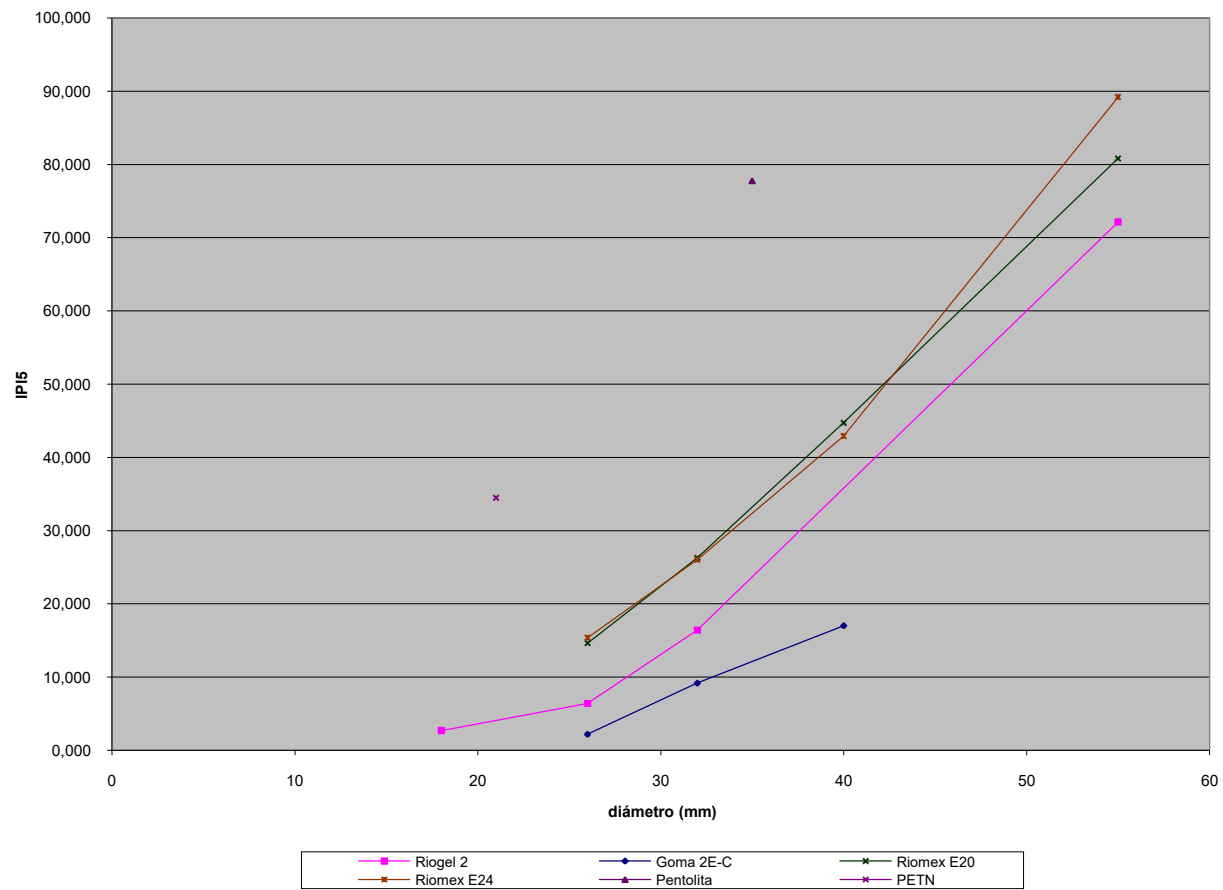


Figura 4.5 Índice de poder iniciador 5 (IPI5)

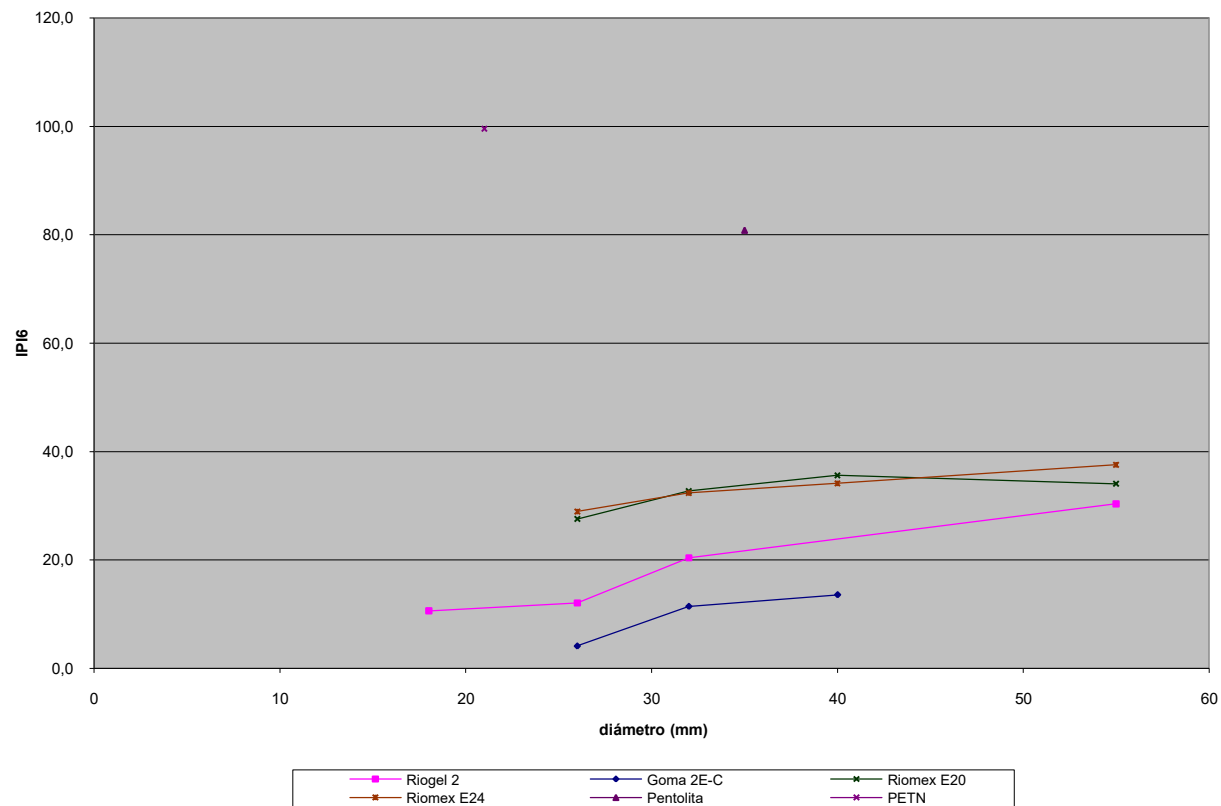


Figura 4.6 Índice de poder iniciador 6 (IPI6)

Tabla 4.2 Velocidad de Detonación de ANFO y RIOGEL 2

Explosivo	Calibre	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
Anfo	55x400	18/22	Plástico	1 mult. 15g	2,208	2,193	2,223	2,208
Riogel 2	55x350	18/22	Plástico	1 det. #8	5,051	5,495	4,695	5,095
Riogel 2	32x300	18/22	Plástico	1 det. #8	4,098	4,255		4,175
Riogel 2	26x250	18/22	Plástico	1 det. #8	3,215	3,205		3,210
Riogel 2	18x250	18/22	Plástico	1 det. #8	2,994	2,976	3,058	3,009

Tabla 4.3 Velocidad de Detonación de ANFO con RIOGEL 2

diámetro mm	longitud mm	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
18	108	18-22	Plástico	1 det. #8	1,495	1,623	1,541	1,518
26	156	18-22	Plástico	1 det. #8	1,565	1,570	1,668	1,568
32	192	18-22	Plástico	1 det. #8	1,773	1,815	1,890	1,794
55	330	18-22	Plástico	1 det. #8	2,817	2,204	2,299	2,252

Tabla 4.4 Velocidad de Detonación de ANFO y GOMA 2E-C

Explosivo	Calibre	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
Anfo	55x400	18/22	Plástico	1 Mult. 15g	1,685	1,636	1,543	1,621
Goma 2E-C	40x350	18/22	Papel	1 det. #8	3,030	3,144	2,994	3,056
Goma 2E-C	32x300	18/22	Papel	1 det. #8	2,762	2,770	2,880	2,804
Goma 2E-C	26x250	18/22	Papel	1 det. #8	1,733	1,712	1,610	1,685

Tabla 4.5 Velocidad de Detonación de ANFO con GOMA 2E-C

diámetro mm	longitud mm	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
26	156	18-22	Papel	1 det. #8	1,524	1,636	1,543	1,533
32	192	18-22	Papel	1 det. #8	1,618	1,658	1,669	1,663
40	240	18-22	Papel	1 det. #8	1,736	1,766	1,675	1,751

Tabla 4.6 Velocidad de Detonación de ANFO y RIOMEX E20

Explosivo	Calibre	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
Anfo	55x400	18/22	Plástico	1 Mult. 15g	2,087	2,057	2,072	2,072
Riomex E20	55x350	18/22	Plástico	1 det. #8	5,434	5,319	5,358	5,370
Riomex E20	40x300	18/22	Plástico	1 det. #8	5,319	5,681	5,478	5,492
Riomex E20	32x300	18/22	Plástico	1 det. #8	5,208	5,176	5,405	5,263
Riomex E20	26x250	18/22	Plástico	1 det. #8	4,878	4,854	4,762	4,831

Tabla 4.7 Velocidad de Detonación de ANFO con RIOMEX E20

diámetro mm	longitud mm	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
26	156	18-22	Plástico	1 det. #8	1,636	1,626	1,546	1,602
32	192	18-22	Plástico	1 det. #8	1,754	1,779	1,727	1,753
40	240	18-22	Plástico	1 det. #8	1,945	1,824	1,912	1,893
55	330	18-22	Plástico	1 det. #8	1,852	1,760	1,672	1,761

Tabla 4.8 Velocidad de Detonación de ANFO y RIOMEX E24

Explosivo	Calibre	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
Anfo	55x400	18/22	Plástico	1 Mult. 15g	2,087	2,057	2,072	2,072
Riomex E24	55x350	18/22	Plástico	1 det. #8	5,747	5,714	5,464	5,641
Riomex E24	40x300	18/22	Plástico	1 det. #8	5,435	5,494	5,208	5,379
Riomex E24	32x300	18/22	Plástico	1 det. #8	5,182	5,253	5,279	5,238
Riomex E24	26x250	18/22	Plástico	1 det. #8	4,807	5,076	4,975	4,952

Tabla 4.9 Velocidad de Detonación de ANFO con RIOMEX E24

diámetro mm	longitud mm	T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
26	156	18-22	Plástico	1 det. #8	1,818	1,845	1,885	1,894
32	192	18-22	Plástico	1 det. #8	2,192	1,916	1,964	2,024
40	240	18-22	Plástico	1 det. #8	2,346	2,193	2,499	2,346
55	330	18-22	Plástico	1 det. #8	2,217	2,207	2,433	2,285

Tabla 4.10 VOD de ANFO con multiplicador de PENTOLITA de 150 g.

T °C	Confi.	Iniciación	VOD 1 km/s	VOD 2 km/s	VOD 3 km/s	VOD m km/s
18-22	Cartón	1 det. #8	2,237	2,188		2,212

Los valores sombreados no son tomados en cuenta para los cálculos:



Luego calculamos la VOD de referencia que resulta del promedio de las VOD m de ANFO iniciado con comprimido de PETN:

VOD = 1993,25 km/s.

Este valor nos sirve para normalizar los valores de VOD de ANFO iniciado con diferentes multiplicadores

Tabla 4.11 VOD de Anfo normalizada, iniciado con diferentes explosivos

Anfo con Riogel 2		Anfo con Goma 2E-C		Anfo con Riomex E20		Anfo con Riomex E24	
diámetro mm	VOD km/s	diámetro mm	VOD km/s	diámetro mm	VOD km/s	diámetro mm	VOD km/s
18	1,303	26	1,905	26	1,523	26	1,770
26	1,353	32	2,035	32	1,674	32	1,945
32	1,579	40	2,123	40	1,814	40	2,267
55	2,037			55	1,682	55	2,206
Anfo con Pentolita		Anfo con PETN					
diámetro mm	VOD km/s	diámetro mm	VOD km/s				
35	2,212	21	1,993				

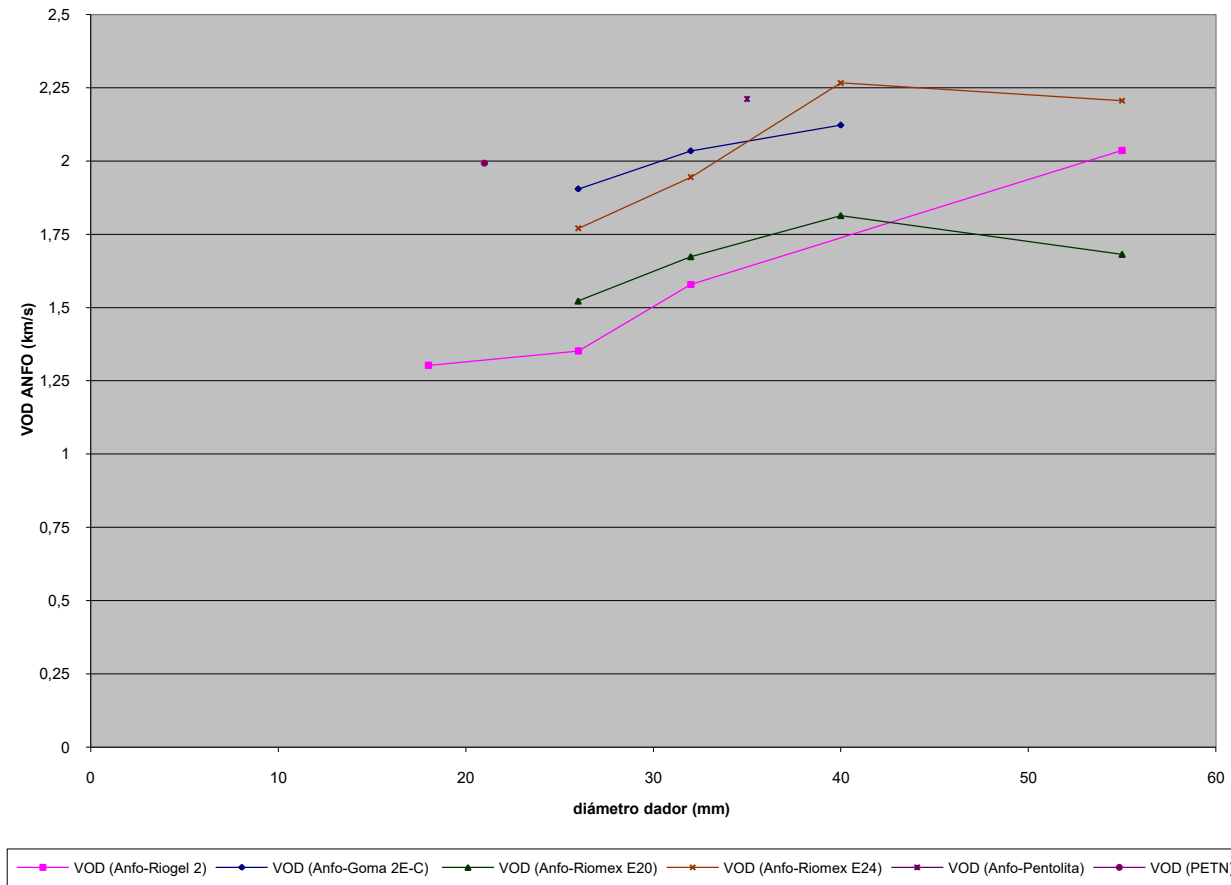


Figura 4.7 Velocidad de detonación de Nagolita iniciada con diferentes explosivos

CAPITULO V

INFLUENCIA EN EL MEDIO AMBIENTE

5.1 INTRODUCCION

En trabajos de minería se realizan labores de perforación y voladura, las mismas que tienen mucha importancia sólo por su peso dentro del coste de operación, sino incluso por su influencia directa en los rendimientos y costes de las otras fases del ciclo: carga, transporte, clasificación, trituración, molienda y tratamiento del mineral.

Los efectos que causan los trabajos de voladura son: vibraciones, onda aérea y proyecciones de roca. Muchas veces se realizan voladuras próximas a edificios o áreas industriales, causando daños potenciales en las estructuras próximas y también puede afectar a la población cercana causándole problemas ella.

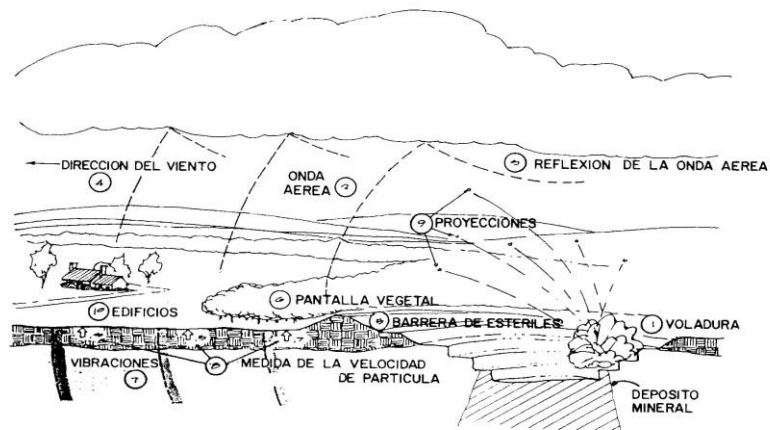


Figura 5. 1 Perturbaciones originadas por las voladuras de rocas (Instituto Tecnológico Geominero de España)

Se deben analizar la teoría de generación y producción de las vibraciones y onda aérea producidas por las voladuras, los criterios de daños existentes en la actualidad y también tener un plan de manejo ambiental no alterar el ambiente.

5.2. VIBRACIONES

5.2.1 Tipos de perturbaciones por vibraciones y análisis del movimiento ondulatorio

Al detonar un explosivo dentro de un barreno, se produce una liberación súbita de energía que se propaga concéntricamente en todas las direcciones con el barreno, no afectando al volumen de roca que se desea volar.

La energía liberada por un explosivo al detonar se propaga y provoca un movimiento vibratorio del terreno. Esto va a obedecer a la presión de explosión que genera la carga dentro de los barrenos y de otros factores que intervienen en el proceso de la voladura.

Lo que pueden ser tensiones generadas en el agrietamiento del macizo y la penetración de los gases en las discontinuidades, las propiedades del material a volar, etc. Se tiene energía no aprovechada y se manifiesta en el entorno como una perturbación en forma de onda elástica amortiguada, cuya intensidad disminuya con la distancia pues la energía transmitida al macizo rocoso se distribuye en un radio cada vez mayor.

Los efectos de las vibraciones pueden clasificarse en tres grupos:

- Riesgos para el personal que trabaja en voladura y para las personas que viven al lugar donde se realizan estas labores.
- Destrucción de los edificios circundantes.
- Debilidad en las rocas luego de realizarse la voladura.

Las características básicas que intervienen en el análisis de las ondas sísmicas son: velocidad de partícula, velocidad de propagación de las ondas longitudinales, tensiones inducidas, disipación y la dispersión, longitud de onda y frecuencia.

Se emplean las siguientes fórmulas para determinar cada uno de los parámetros antes anotados:

$$\text{Velocidad de propagación} = \frac{X}{T}$$

$$\text{Frecuencia} = \frac{\text{n.º de ciclos}}{\text{unidad de tiempo}} \text{ (Hz)}$$

$$\text{Amplitud (S)} = \text{Máximo desplazamiento de la onda}$$

$$\text{Velocidad de la partícula} = \frac{\text{Suma de desplazamiento(S)}}{\text{Tiempo}}$$

$$\text{Longitud de onda} = \frac{\text{Distancia}}{\text{Frecuencia}}$$

$$\text{Tensión} = \frac{\text{Velocidad de la partícula}}{\text{Velocidad de propagación}}$$

Las ondas sísmicas siempre presentan una disipación o disminución de la amplitud del desplazamiento con la distancia y las internas tienen, además, una

dispersión en la que las componentes de alta frecuencia viajan más rápido que las de baja frecuencia.

En la fragmentación de la roca por voladura se tiene: la generación de una onda de tensión por la presión del barreno, el desarrollo de un sistema de grietas asociado a la onda de tensión, la extensión y apertura de las grietas por la penetración de gases a alta presión, la liberación y aceleración de la masa rocosa fragmentada a una determinada velocidad a la cual es proyectada.

Al crearse grietas por la expansión de los gases favorece a la vibración del terreno, generando ondas superficiales que no tienen gran dispersión y que se disipan menos que las ondas internas producto de la liberación de energía.

5.2.2 Cuantificación de la energía sísmica y ley de transmisión

En un terreno puede medirse la vibración por medio del desplazamiento “S”, la velocidad de partícula “v” o la aceleración de partícula “a” que es proyectada.

Con el desplazamiento es “S”, tenemos:

$$v = \frac{dS}{dt}$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Con “f” como frecuencia del desplazamiento, la velocidad de partícula y la aceleración, con un movimiento ideal sinusoidal, se determinan por:

$$v = 2 \pi f S$$

$$a = 4 \pi^2 f^2 S$$

El parámetro más importante en las vibraciones es la velocidad de la partícula y el más analizado en el oficio de voladura.

Dentro los factores principales que afectan a los niveles de vibración producidos en una voladura se tiene dos la carga de explosivo y la distancia. La expresión más utilizada que relaciona dichos parámetros y que permite analizar la transmisión de esos movimientos sísmicos es:

$$v = \left[\frac{D}{Q^\alpha} \right]^\beta$$

v = Velocidad de partícula (mm/s)

D = Distancia de la voladura al punto de medición (m)

H, α, β = Constantes empíricas

Para la velocidad de la partícula en función de la carga se tiene:

$$v \propto Q^a$$

Para “ a ”, según el U.S. Bureau of Mines; es de un magnitud de 0,8.

Se relaciona el nivel de vibraciones y la distancia así:

$$v \propto \frac{1}{D^b}$$

Con “ b ” que tiene un valor cercano a 1,6.

Después de todo el análisis se tiene la ley:

$$v \propto \frac{Q^{0,8}}{D^{1,6}}$$

o bien,

$$v = H \frac{Q^{0,8}}{D^{1,6}}$$

expresada de la siguiente manera:

$$v = H \left[\frac{D}{Q^{0,5}} \right]^{-1,6}$$

Pero “H” y “β” deben determinarse en cada caso mediante la realización de una campaña vibrográfica en la que registrando “v”, para distintas cargas y distancias, se ajuste una curva a la cantidad de puntos registrados.

Para medir las vibraciones se cuenta con un sismógrafo o registrador de vibraciones que consiste fundamentalmente en un sensor y un registrador. En este aparato el sensor suele estar constituido por tres unidades independientes colocadas ortogonalmente. En mediciones de velocidad de la partícula el sensor es un transductor electromagnético que transforma el movimiento del terreno en energía eléctrica.

5.2.2.1 Daños provocados por vibraciones

La preferencia de los criterios o umbrales de prevención de daños de las vibraciones es un trabajo delicado que exige el conocimiento de los mecanismos que intervienen en los fenómenos de las voladuras. Si no se tiene conocimiento apropiado puede llevar a la aparición de daños en estructuras próximas y reclamaciones de sus ocupantes, en cambio que un criterio moderado puede dificultar y restringir el desarrollo de la actividad minera.

Los estudios de vibraciones deben basarse en la importancia de la construcción, desde el punto de vista de valor histórico, sensibilidad de los equipos instalados, etc., así como también sus condiciones y características de construcción del edificio. Debe fijarse en el empleo, funciones del edificio y coste de reparación. También de tomarse en cuenta la repercusión social de quejas y reclamaciones de las personas que se ven afectadas por efecto de los trabajos de voladura.

5.2.2.2 Consideraciones en el diseño de voladuras

Las consideraciones que intervienen en la fragmentación de las rocas se clasifican en cuatro grupos: propiedades de las rocas, propiedades del explosivo, geometría de las voladuras, y tiempos de retardo con la secuencia de iniciación.

El primer grupo no es controlable por el operador, pero sí los otros tres deben ser analizados antes de realizar una voladura.

5.3 Onda Aérea

Una onda aérea es la onda de presión que se propaga en aire cuando se produce una explosión. Al detonar un explosivo dentro de un barreno se crea una alta presión debido a la expansión de los gases. En cuanto se produce la fisuración de la roca, los gases escapan hacia la atmósfera produciendo una perturbación llamada onda aérea.

Dentro de la onda aérea tiene dos componentes: el ruido, que es la parte del espectro en el intervalo entre 20.000 y 20 Hz. y que es percibido por el oído humano, y la vibración restante llamado a veces “conmoción”, que es la parte del espectro por debajo de 20 Hz. y que no es audible para el oído humano.

Frecuentemente la onda aérea decrece con la distancia, ya que a altas frecuencias se atenúan rápidamente, pero a grandes distancias de la voladura se producirán vibraciones con bajo ruido. El ruido se mide en decibelios (dB), también se mide como una sobrepresión, es decir, como la presión por encima de la presión atmosférica, el decibelio se expresa en función de la sobrepresión.

Las vibraciones van seguidas por ruidos en voladuras, muchas veces la apreciación del ser humano es totalmente subjetiva.

Se debe asegurar el confinamiento de las cargas de explosivo dentro de los barrenos con unas longitudes de retacado superiores a 25 veces el diámetro del barreno. Las cargas del explosivo por unidad de microrretardo deben disminuirse, teniendo medidas parecidas a las explicadas para vibraciones terrestres resultante de una voladura.

Además, se debe revisar el estado de los frentes antes de proceder a la perforación y voladura para que las cargas de explosivo en los barrenos dispongan de una dimensión de la piedra igual a la planificada. En el momento de cargar los barrenos el vertido del explosivo a granel dentro de ellos en aquellos terrenos con coqueas se debe tener cuidado para las concentraciones puntuales dentro de éste. También se debe levantar pantallas de tierra y vegetales entre el área de voladura y los puntos receptores para que la onda aérea se pueda reflejara en las pantallas.

Las voladuras no se deben efectuar cuando la dirección del viento coincida con la marcada por la propia pega y el área habitada, cosa que ayudaría a la propagación de la onda aérea. Además, los tiempos de retardo deben asegurar que la voladura avance en él frente a una velocidad inferior a la del sonido en el aire (340 m/s) y así evitar que se propague.

5.3.1 Daños provocados por onda aérea

La onda aérea puede producir daños a la estructura directamente, por lo que puede manifestarse como ruido de ventanas, puertas, vajillas, etc. Siskind Summers (1974) dan valores orientativos.

Los niveles de ruidos se miden en dB(L) y están en una escala logarítmica. Con la sobrepresión de 129 dB(L) se tiene un 78,6% mayor que otra de 115 dB(L).

5.4 Proyecciones

Las proyecciones son todo aquel material, fragmentos de roca, que es lanzado de manera no controlada en una voladura. Con el objeto de controlar las proyecciones producidas en las voladuras se debe tener precisión en el replanteo del esquema de perforación, con prioridad en la primera fila de la voladura.

También, se establece un control de la profundidad e inclinación de los barrenos una vez perforados y controlar la carga de explosivo y su distribución a lo largo del barreno. Para luego hacer el retacado midiendo su longitud y empleando un material apropiado y finalmente que el encendido sea utilizando bien los retardos.

CAPITULO VI

ESTUDIO ECONOMICO

6.1 CONSIDERACIONES INICIALES

El proyecto se realizó en tres meses desde mayo-julio de 2000, realizándose los siguientes trabajos:

- Recopilación de información y organización del tema propuesto en la ETSIM de Madrid.
- Realización de ensayos
- Análisis de resultados de ensayos, valoración y conclusión.

6.2 COSTES DE PERSONAL

- Jefe de Proyecto
40 h * 10 000 PTA/h 400 000

- Becario (3 meses)
480 h * 3 000 PTA/h 1 440 000

- Especialista en ensayo de explosivos
1 h/2 ensayos * 105 ensayos * 2 000 PTA/h 105 000

6.3 COSTES DE EQUIPOS Y MATERIALES

- Riogel 2
10,865 kg * 450 PTA/kg 4 889,25

- Goma 2
4,710 kg * 500 PTA/kg 2 355

- Riomex E 20
13,650 kg * 300 PTA/kg 4.095

- Riomex E 24
13,650 Kg * 300 PTA/kg..... 4095
- Nagolita
105 kg * 200 PTA/kg 18 600
- Comprimido de Pentrita de 15 g
4 u * 200 PTA/u 800
- Multiplicador de Pentolita de 150 g
1 u * 400 PTA/u 400
- Detonadores ordinarios # 8
105 u * 30 PTA/u3 150
- Mecha lenta
2 m/ensayo * 105 ensayos * 40 PTA/m 8 400
- Fibra óptica
2 m/ensayo * 105 ensayos * 100 PTA/m 21 000
- Contador de tiempo cuyo coste es 500 000 que se amortiza en 5 años

105 ensayos * 150 Pta / ensayo	15 750
• Costo total de personal , material y equipo	2 028 534,25 Pta
• Gastos Generales 30%	608 560
16% de I.V.A.....	324 565
• TOTAL	2 961 166 Pta
	(\$ 16 006.30)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los ensayos que se realizaron con los explosivos puedo concluir que:

1. Para el índice de poder iniciador 1 (IPI1) los valores para la PETN es muy bajo con 0,1; así como también para la pentolita que tiene un valor de 1,1. En cambio los valores para el Riomex E24, y Riomex E20 van incrementándose sus valores en ese orden, pero los valores de la Goma 2E-C son muy bajos.
2. En el IPI2 los valores son parecidos a los del IPI1, pero los valores de la Goma 2E-C disminuyen aún más todavía. Los valores de los otros explosivos aumentan debido a que este índice toma en cuenta la velocidad de detonación al cuadrado.
3. Los valores del IPI3 son muy parecidos a los del IPI1, a pesar de que se toma en cuenta la densidad en este índice.
4. En el IPI4, los valores de la Goma 2E-C siguen siendo bajos. En cambio los valores del Riomex E24 se incrementan aún más que en los otros índices 1, 2 y 3. Se nota que el valor de la pentolita se incrementa aún más que el de la PETN.

5. El índice IPI5 muestra un valor elevado para la Pentolita de 78 aprox., que es apropiado para este tipo de explosivo. Además, el valor de la PETN es alto y es de 34 aproximadamente, se obtiene ese resultado porque en este índice se toma en cuenta el área de sección recta de los explosivos.
6. En el IPI6 se consideran propiedades del explosivo como son la densidad y la velocidad de detonación. A diferencia del índice 5, el índice 6 no toma en cuenta el área de sección recta. El valor de la PETN es de 99,6 que es el más elevado que del resto.
7. De todos los índices probados mediante ensayos, el IPI5 es el más apropiado para indicarnos el poder iniciador de un alto explosivo. El IPI6 es consecuencia del IPI5, por lo que también se puede considerarlo como un buen índice, aunque es obvio que es necesario contemplar la sección del multiplicador, por lo que el IPI5 es más representativo.
8. La Goma 2E-C muestra un valor bajo en casi todos los índices, que no corresponde a su capacidad iniciadora lo que se nota en los ensayos de iniciación realizados.
9. Se obtuvo una velocidad de detonación normalizada del anfo iniciada con comprimido de PETN de 1993,25 m/s. Este valor se utilizó para comparar los

demás valores de velocidad de detonación del anfo iniciado con el resto de explosivos en diferentes diámetros.

10. De todos los explosivos utilizados para iniciar el anfo, la pentolita le confiere una mayor velocidad al igual que el Riomex E24. La Goma 2E-C también le da un a valor elevado de velocidad de detonación al anfo.
11. Para el Riomex E20 en 55 mm la velocidad de detonación es menor que para 40 mm, lo que no concuerda con lo se espera, pues al aumentar el diámetro debe aumentar también la velocidad de detonación.
12. Al iniciar Anfo con Riomex E20 en 55 mm se obtiene una velocidad de detonación menor que al ser iniciado con Riomex E20 en 40 mm. Esto no se relaciona con que se esperaba, pues al aumentar el diámetro del explosivo dador debe aumentar la velocidad de detonación del explosivo receptor.
13. A pesar del costo de cada ensayo, se deben realizar muchos más; y de esta manera tener más valores de comparación.

BIBLIOGRAFÍA

1. BERNAOLA, J., Fundamentos de diseño de voladuras, Fundación Gómez Pardo, Madrid, 1999.
2. SANCHIDRIAN, J. A., MUÑIZ, E., Curso de Tecnología de Explosivos, Fundación Gómez Pardo, Madrid, 2000.
3. LOPEZ JIMENO, C., Manual de perforación y voladura de rocas, Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1994.
4. UEE S.A., Manual de Empleo de Explosivos, Unión Española de Explosivos S.A., Madrid, 1997.
5. IEES, International Society of Explosives Engineers, Blasters Handbook, Cleveland, 1998.
6. NORMA UNE 31024, Determinación de la velocidad de detonación de los explosivos, AENOR, Madrid, 1993.

7. LOPEZ JIMENO, C., Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería, Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1999.

8. EXPLOCEN C.A., Manual de Explosivos y Accesorios, Quito, 1997.

