

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA PREPARACIÓN DE
EXPLOSIVOS BINARIOS”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE
CONOCIMIENTOS**

PRESENTADO POR:

LEOPOLDO ELIAS DIAZ GONZALES

LIMA – PERÚ

2003

RESUMEN

La Reglamentación sobre Materiales Explosivos, tanto en nuestro país como en el resto del mundo, es bastante exigente en lo referente al transporte y almacenamiento de los diversos accesorios y explosivos, utilizados en minería, construcción civil y prospección petrolera. En el Perú la legislación al respecto data de treinta años atrás y se está estudiando la posibilidad de adecuarla a los tiempos actuales, que particularmente desde los sucesos del 11 de setiembre del 2001, han extremado los controles en el manejo de los explosivos primarios, es decir de aquellos que por diversos factores pueden detonar, causando daños a la propiedad y a las vidas de las personas que se hallen cerca de su radio de acción.

En el pasado se han ensayado diversas alternativas para minimizar el daño que los materiales explosivos pueden causar: la definición de las tablas cantidad – distancia, la estructuración de los diferentes tipos de embalaje para el transporte de explosivos, la calificación de las Naciones Unidas de todo material peligroso, y evidentemente la legislación de cada país, que exige de transportes y almacenamiento especiales además de custodia permanente del material que pudiese presentar riesgos para la vida o la salud. Cualquiera de estas alternativas tiene un costo en el manejo comercial de los productos, que puede oscilar entre el 4 y el 18% de la operación, dependiendo de la distancia y la cantidad a transportar.

La solución definitiva a todos los problemas que devienen del transporte y almacenamiento de explosivos, ha sido manejada hace algunos años en las operaciones mineras a tajo abierto, en ellas, un producto como el Nitrato de Amonio se mezcla con un combustible cualquiera, para obtener el conocido ANFO, esta mezcla se prepara minutos antes de ser rellenada en las perforaciones, conocidas como taladros, y luego son detonadas por medio de cebos (boosters). Tanto el Nitrato de Amonio como el combustible, no son tipificados como explosivos, aunque se hallan dentro de la lista de materiales riesgosos definida por la ONU.

El ANFO resulta efectivo en la mayoría de los casos, sin embargo, el nitrato es altamente higroscópico y deliquescente, razón por la cual su uso debe ser inmediato. En zonas húmedas, o bajo lluvia, las posibilidades de éxito de la voladura decrecen con el tiempo de exposición al agua. Esta es la razón para el desarrollo de slurrys, hidrogeles y emulsiones explosivas, productos que tienen por fin, el mantener sus propiedades aún en medio del lodo o de agua empozada. El problema de este tipo de mezclas es que

evidentemente son consideradas como explosivos y deben atenerse a las disposiciones de seguridad en su transporte y almacenamiento.

Desde 1976, se han venido desarrollando un nuevo tipo de materiales que no están determinados como explosivos, denominados comercialmente "binary explosives", son mezclas oxidantes en base a Nitrato de Amonio, por un lado, y mezclas combustibles compuestas por metales en polvo y aceites por otro, que se venden, trasladan y almacenan por separado. El material comercializado ya en los estados Unidos y Europa, no requiere de vehículos ni custodia especiales, las diversas legislaciones no lo afectan, y una vez recibido en obra, puede ser mezclado con mucha facilidad, convirtiéndose en mezcla explosiva en el taladro (para minería superficial), en el barreno (minería subterránea) o en la obra de construcción civil o de prospección sísmica,

El objeto del presente trabajo, es definir las posibilidades de fabricar este tipo de productos en nuestro país, con la intención de mejorar los costos de atención al cliente, manufacturando un artículo seguro en su manejo y que una vez mezclado sea confiable en su uso. Las técnicas que se plantean están basadas en tres patentes americanas y una cuarta en un producto de fabricación canadiense. Con la finalidad de hacer comprensibles los conceptos que se viertan, nos referiremos al inicio del tema, a las características básicas de los materiales explosivos y a las reglamentaciones internacionales para su control. En lo referido al desarrollo del tema, se propondrá un análisis económico elemental que servirá para el desarrollo de las conclusiones: la rentabilidad de una planta de estas características y su importancia en el desarrollo de la industria nacional

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	6
II. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y LAS TECNICAS	
2.1. Los Explosivos: una idea general	9
2.1.1. Propiedades Físicas de los Explosivos	12
2.1.2. Propiedades Ambientales de los Explosivos	15
2.2 Diversos tipos de Explosivos	18
2.1.1 Bajos Explosivos	19
2.2.2 Altos Explosivos	21
2.2.1.1 Explosivos Primarios	21
2.2.1.2 Explosivos Secundarios	22
2.3 Utilidad de los Explosivos	27
2.2.2 Voladuras subterráneas y a tajo abierto	28
2.2.3 Carreteras, Túneles y Construcción Civil	30
2.2.4 Exploración Sísmica	30
2.2.5 Otros Usos	31
III. LEGISLACIÓN Y CONTROL DE LOS EXPLOSIVOS	33
3.1 Legislación Nacional	33
3.2 Recomendaciones y Acuerdos Internacionales sobre el Transporte, Almacenamiento y Manipuleo de Explosivos	35
IV. LOS EXPLOSIVOS BINARIOS	40
4.1 Los explosivos preparados en la Zona de Operaciones	40
4.2 Los explosivos Binarios: su operación	42
4.3 Fabricación de los Explosivos Binarios	43
4.3.1 Mezcla Nitrato de Amonio / Sulfato de Calcio Sensibilizado	45
4.3.2 Mezcla Oxidante en fase líquida / Mezcla combustible de aluminio granulado	46
4.3.3 Mezcla líquida de nitro / Mezcla Oxidante granulada en base a nitratos	50
4.3.4 Mezcla de líquido inflamable / Sólido insensible, para producir explosivo plástico	52
4.4 Análisis de las técnicas de fabricación descritas	55
4.4.1 Ventajas de la mezcla para producir explosivo plástico	58
4.4.2 Posibilidades de la mezcla activada por aluminio granulado	59
V. EVALUACIÓN ECONÓMICA	

5.1	Costo Preliminar de una planta de Fabricación de Explosivos Binarios en base a polvo de aluminio	64
5.2	Comparación de los Costos de Transporte y Almacenamiento vs. Inversión Propuesta	70
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
VII	BIBLIOGRAFÍA	75
VIII	APÉNDICES	
8.1	Extracto de la Legislación Nacional sobre Explosivos	76
8.2	Cuadro de Compatibilidad de Materiales Explosivos	79
8.3	Glosario	81
8.4	Cálculo de la Energía de Explosión para el ANFO	84
8.5	Gráficas utilizadas	86
8.6	Cálculo del VAN y el TIR	89

I. INTRODUCCIÓN

Los explosivos han sido por mucho tiempo una de las ramas de la Ingeniería Química, sobre la que menos se ha profundizado a nivel nacional, las características de los productos que se pueden preparar, luego de un conocimiento mas o menos ligero del tema, y la destrucción que ellos pueden generar, aunado a las tensiones sociales que siempre han existido desde nuestra fundación como República, son a mi parecer las causas que han generado una especie de tema tabú sobre ésta no solo interesante, sino importante industria.

Los explosivos, no son solo instrumentos de muerte y destrucción, su empleo en la minería es insustituible, y algunas obras de construcción civil no podrían siquiera emprenderse sin su ayuda; el desarrollo de la geología de detalle solo ha sido permisible con la aparición de la prospección sísmica, actividad que esta ligada a los explosivos de uso sísmico y los fulminantes eléctricos instantáneos. Sin embargo, su tenencia, almacenamiento, producción, comercialización, transporte y uso, deben ser reglamentados para evitar cualquier accidente o uso indebido del material. En los tres primeros acápite del Capitulo destinado al desarrollo de los Conceptos y Técnicas, nos ocuparemos de describir en forma sucinta las ideas generales sobre lo que son explosivos y sus diversos tipos y utilidades; mientras que en el siguiente expondremos las características de la legislación que los reglamenta tanto nacional como internacionalmente.

Las diversas normas que controlan el transporte, manipuleo y almacenamiento de los explosivos, hacen de alguna forma, que el manejo de estos productos tenga un valor adicional a sus costos de fabricación, los vehículos de transporte permitirán determinadas cantidades de material a movilizar, fijaran ciertas especificaciones que cumplirán los embalajes de los productos a transportar, o simplemente prohibirán el envío de estos materiales dentro de sus unidades. Por otra parte los gobiernos nacionales, regionales o provinciales, establecerán el número de escoltas, el tipo de vehículos que pueden transportar los explosivos dentro de su territorio, o las autorizaciones con que deberán contar los dueños de la carga para poder manejarlas.

De una manera casual, las operaciones mineras a tajo abierto, que empezaron a utilizar el ANFO con resultados cada vez más satisfactorios , a partir de los 50's, resolvieron el problema de los elevados costos de transporte, autorizaciones y manejo; pues al preparar el ANFO en la propia Zona de Operaciones, a partir de Nitrato

de Amonio y Combustible, dos productos que siendo reglamentados no tenían las exigencias que pesaban sobre los explosivos, los podían transportar y manipular sin las dificultades que les habría llevado traer el ANFO preparado, desde los depósitos de algún fabricante. De este asunto y de los problemas que se generaron a partir de la preparación en la zona de Operaciones de los productos explosivos, nos ocuparemos en el acápite quinto, mencionando algunas prácticas actuales en lo que se denomina el Diseño de Voladuras.

Las características climáticas, afectan seriamente el desempeño de algunos productos, tal es el caso del ANFO, ello obligó a los usuarios a volver a utilizar explosivos preparados que les aseguraran un buen comportamiento en sus operaciones. Con esta decisión, volvieron los problemas de los costos por transporte y almacenamiento. En los últimos veinticinco años, se han ensayado diversas soluciones que permitan el uso de la idea original que se tuvo al mezclar las partes Oxidante y combustible en las operaciones a tajo abierto. (Dicho sea de paso, un explosivo puede conceptuarse como la mezcla de una reacción oxidante, seguida de una rapidísima combustión), las alternativas aún no han tenido un éxito económico sensacional, pero su uso es cada vez más extendido en operaciones como desactivación de minas anti personales y la eliminación de los peligros potenciales de los denominados tiros cortados. Los productos que pueden ser trasladados en forma separada y que al mezclarse originan una mezcla explosiva capaz de ser iniciada por un cebo, son los denominados "**Explosivos Binarios**", y de ellos y su posibilidad de fabricación trata el presente trabajo.

Para fabricar explosivos binarios existen diversos métodos, nos han parecido especialmente posibles de implementar, cuatro de ellos, tres son descritos por patentes americanas que datan de 1976, 1991 y 1998, el cuarto método, produce un material que es explotado comercialmente por una firma canadiense, y se transporta incluso por vía aérea, sistema de transporte que está totalmente prohibido para los explosivos. Nuestro interés es desarrollar una alternativa que haga posible el transporte en cualquier cantidad y sin restricción legal alguna, de un material que, adecuadamente mezclado en la Zona de operaciones pueda convertirse en un explosivo de uso seguro y cuyos resultados sean equiparables a los que brindan los productos que actualmente se ofrecen en el mercado.

Para tal fin, procederemos a escoger la mejor de las alternativas presentadas -en función de los resultados que su desempeño en el campo ha

presentado- y costearla preliminarmente. El valor de esta inversión, podremos compararla con los costos que originan el traslado y custodia de explosivos desde los almacenes del fabricante, hasta la operación de un consumidor promedio.

No es intención de este trabajo presentar valores experimentales de eficiencia en trabajo de voladuras, con explosivos binarios; ni desarrollar un método original para la preparación de estas mezclas, su objetivo es presentar alternativas que abaraten el manejo de los productos explosivos, y de alguna forma alienten el desarrollo de la industria nacional en este rumbo.

II. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TECNICAS

2.1 LOS EXPLOSIVOS: UNA IDEA GENERAL

El manual de Voladuras de la ISEE en su 17ma. Edición, Pag 31, define un explosivo por sus propiedades, creemos que la descripción que allí se da, es una de las más claras y explícitas sobre el tema:

“un explosivo tiene tres características básicas:

- ***Es un compuesto o mezcla química que se inicia mediante calor, golpe, impacto, fricción o una combinación de estas condiciones***
- ***Después de la ignición este se descompone muy rápidamente en una detonación.***
- ***Después de la detonación hay una liberación rápida de calor y grandes cantidades de gases de alta presión, los cuales se expanden velozmente con fuerza suficiente para vencer a las fuerzas confinantes (por ejemplo, las fuerzas de cohesión de una formación rocosa circundante)***

En voladuras comerciales la energía liberada por la detonación de los explosivos produce cuatro efectos básicos:

- ***Fragmentación de la roca***
- ***Desplazamiento de la Roca***
- ***Vibración del suelo***
- ***Golpe de aire”***

Cada explosivo tiene ciertas propiedades específicas que lo diferencian de los demás. Una parte importante del desarrollo de la industria explosivera se debe a la investigación de métodos que permitan medir estas propiedades y las relaciones que ellas tendrán con su comportamiento en el rompimiento de las rocas u otro medio. Sin lugar a dudas la característica más saltante de un explosivo es la detonación. Una detonación es una onda de choque, producida por la presión de los gases, provenientes de una rápida reacción química exotérmica que esta ocurriendo justamente detrás de la onda de choque. Esto es: una onda de presión y temperatura, capaz de quebrar la resistencia del material que se ponga delante de ella.

Existen varios modelos matemáticos, que explican el comportamiento de la detonación, la más simple de ellas, se desarrolló por los 40's, conocida como modelo ZND (por las iniciales de sus creadores: Zeldovich, Von Neuman y Deering), esta teoría toma algunas asunciones para poder hacer comprensible el modelo:

- El flujo es unidimensional, en el sentido de propagación de la onda de choque.

- El frente de la detonación es una zona discontinua donde la onda de choque es no reactiva.

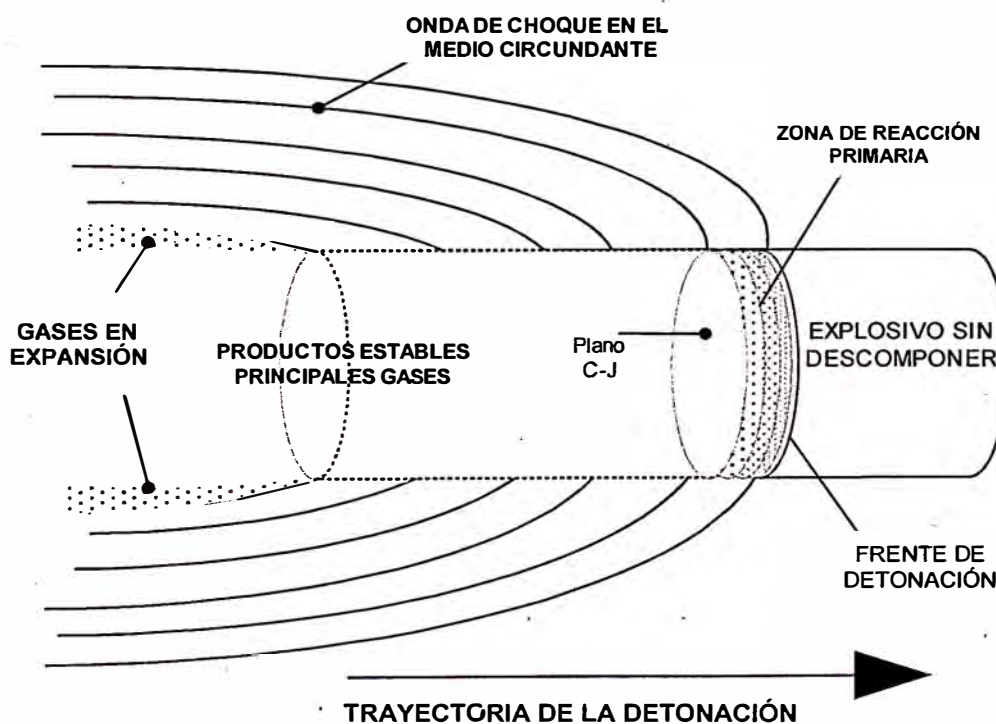
Los gases producto de la reacción que dejan el frente de detonación están en equilibrio químico y termodinámico, y la reacción química es completa.

- La longitud de la zona de reacción química es cero.
- La velocidad de detonación es constante. El proceso es estable.
- Los gases de la reacción que abandonan el frente de la detonación, pueden ser dependientes del tiempo, y son afectados por el sistema circundante o las condiciones del mismo.

El Esquema (*figura 2.1*) que se describe, ilustra el modelo ZND, y de esta forma puede decirse que en una detonación la reacción química se mueve a través del material explosivo a velocidad supersónica, la característica de esta reacción química es que es iniciada y se mantiene gracias a una onda de choque.

La zona de reacción primaria, esto es, el área donde empieza la descomposición química está limitada por el frente de detonación, donde el material aún no reacciona, y su límite posterior es denominado plano de Chapman – Jouquet (C-J),

Fig 2.1 ESQUEMA DE UNA DETONACIÓN



Fuente: Interpretación de Blaster's Handbook 17 ed.

donde el producto se ha transformado en gases a elevadísima presión. Detrás del plano C-J, pueden ocurrir otras interesantes reacciones químicas, particularmente reacciones de partículas de gran tamaño y combustibles metálicos. Estas reacciones secundarias pueden afectar el desempeño del explosivo, pero no influyen en la estabilidad o la velocidad de detonación misma.

En un explosivo de alta velocidad la zona de reacción primaria es muy delgada, mientras que en los de baja velocidad, esta puede alcanzar algunos milímetros, en la detonación de ANFO, la zona de reacción puede alcanzar uno o dos centímetros.

Detrás del plano C-J están los productos de la reacción y en algunos casos partículas que no reaccionaron. La mayoría de estos productos son gases, los cuales tienen temperaturas comprendidas entre 1800 °C y 4000°C y presiones entre 20 y 100 K bares. Estos gases se expanden rápidamente, produciendo una onda de choque contra el medio circundante.

La selección del explosivo que se usará para una tarea específica, se basa en dos criterios principales: El explosivo debe ser capaz de funcionar segura y confiablemente bajo las condiciones ambientales donde se vaya a usar y ; el explosivo deberá ser técnicamente el más adecuado, es decir, aquel cuyas características de detonación sean las más convenientes en cada caso, por ejemplo el efecto despedazador o potencia rompedora de un explosivo depende de la velocidad de detonación, así algunos de los explosivos cuya velocidad de detonación es 8500 m/s, son extremadamente eficaces para la demolición militar y para ciertos tipos de voladuras, sin embargo, en cantería y en minería, donde el objetivo es desalojar grandes piezas de roca o mineral, deberán emplearse explosivos con una velocidad de detonación más baja y con una potencia rompedora menor. Los explosivos utilizados como propulsores en fusiles y cañones deben arder aún más lentamente, pues han de proporcionar un impulso creciente al proyectil dentro del cañón del arma, en lugar de producir una sacudida instantánea que, si fuera demasiado fuerte, destrozaría el arma. Para iniciar la detonación de altos explosivos menos sensibles, se utilizan tipos especiales de detonadores sensibles al calor o al impacto y con una capacidad rompedora moderada. Todas estas características las agruparemos como propiedades físicas de los explosivos, para diferenciarlas de las otras a las que denominaremos características de resistencia ambiental.

2.1.1. Propiedades Físicas de los Explosivos:

Las propiedades más importantes de los explosivos son: la velocidad de detonación, sensibilidad a la iniciación, densidad, presión de detonación, potencia y cohesividad.

Velocidad de detonación: Es la velocidad expresada en pies o metros por segundo, a la cual viaja la onda de detonación a través de la columna del explosivo. Existen muchos factores que afectan la velocidad de detonación incluyendo el tipo de producto, diámetro, confinamiento, temperatura y grado de cebado. Es importante determinar la velocidad de detonación de un explosivo, pues gracias a esta medida se puede determinar la presión de detonación, que es un indicador del trabajo que puede realizar el material explosivo. Las velocidades de detonación de los explosivos comerciales actuales oscilan entre los 3000 y 6000 metros/segundo. Existen obviamente productos con baja velocidad como el ANFO-P que llegan a los 1830 m/s (6000 pies por segundo), y otros con muy alta velocidad como el RDX prensado que puede llegar a los 8750 m/s (28700 pies por segundo). Existen numerosos métodos para determinar la velocidad de detonación, los más utilizados en la actualidad, son los electrónicos, que pueden tomar valores de punto a punto dentro de una columna de explosivo, utilizando para ello, alambres de cobre o aluminio que al romperse por la acción del explosivo inician y detienen un equipo electrónico que genera un registro gráfico de tiempo (cronógrafo) con sensibilidad inferior a un millonésimo de segundo; estos alambres pueden ser reemplazados por fibra óptica. Métodos más recientes de aplicación en el campo, son los denominados CORRTEX y SLIFER, basados en el comportamiento de un cable coaxial colocado dentro de la columna de explosivo, que esta siendo monitoreado por microondas o por radiofrecuencia, a través de un microprocesador. En todos estos métodos se habla de una columna de explosivo, esto es un cilindro del material, y al hablar de cilindro, debemos mencionar un dato importante, el denominado “diámetro crítico”, que es precisamente el diámetro mínimo al que esta columna de explosivo mantiene la onda de choque, razón por la que se considera que la velocidad está fuertemente afectada por el grado de confinamiento y el diámetro, cuando la columna del explosivo tiene valores mayores a este diámetro y el confinamiento es rígido, se consiguen valores de velocidad mayores, hasta alcanzar la máxima, denominada también como “velocidad ideal” o “velocidad hidrodinámica”.

Sensibilidad a la Iniciación: Es la medida de la facilidad de iniciar la detonación del explosivo, existen numerosas medidas de sensibilidad, incluyendo la sensibilidad al fulminante, pruebas de caída, pruebas de bala, de fricción, y otras no estandarizadas. A menudo se le confunde con la sensibilidad, que es una medida de la habilidad de propagación de una onda explosiva. **La prueba de sensibilidad al**

Fulminante no. 8 es la prueba estándar en la industria de los explosivos; ella consiste en llenar un paquete cilíndrico de un cuarto de galón, a las mismas condiciones de empaque que las que utiliza comercialmente el producto, poner en su centro un fulminante e iniciarlo, usando como testigo un cordón detonante en el fondo del recipiente, las sensibilidades se miden usando fulminantes de diferente potencia, y así mediante la comparación de las sensibilidades de los diferentes productos, el usuario podrá evidenciar cuales son los que mas convienen para la utilización específica que espera darle.

Densidad: La densidad de un explosivo tiene doble importancia para el usuario, por un lado determina el tamaño de la voladura, y el factor de carga en cada agujero, y por otro establece el valor económico de la operación, en tanto, los explosivos se compran por peso. La densidad determina la sensibilidad, velocidad de detonación y diámetro crítico de la carga; la mayoría de explosivos comerciales oscila entre los 0,75 y 1,65 g/cc de densidad, medida en campo. Cuando la densidad del material aumenta a valores excesivos, se puede producir una muerte por presión (dead pressing), esto es, el explosivo se compacta de tal manera que evita la posibilidad de iniciarse.

Fig. 2.2 PRINCIPALES PROPIEDADES PRODUCTOS EXPLOSIVOS

A) MATERIALES EXPLOSIVOS PUROS			
Explosivo	Densidad g/cc	VOD(*) km/s	Presión de Detonación kilobares
Trinitrobenzeno (TNB)	1,71	7,3	227,81
Trinitrotolueno (TNT)	1,654	6,91	197,44
Acido Pírico	1,767	7,35	238,64
Tetril	1,73	7,57	247,84
Picrato de Metilo	1,57	6,8	181,49
Picrato de Etilo	1,55	6,5	163,72
Trinitrocresol	1,62	6,85	190,04
Stifnato de Plomo	2,9	5,2	196,04
Nitrato de Metilo (liquido)	1,217	6,3	120,76
Nitroglicerina	1,59	7,6	229,60
PETN (nitropenta)	1,76	8,4	310,46
Nitroguanidina	1,71	8,2	287,45
RDX (exógeno)	1,76	8,75	336,88
HMX (Octógeno)	1,96	9,1	405,77
Gas nitroso (liquido)	1,294	5,62	102,18
Azida de Plomo	3,66	4,42	178,76
Fulminato de Mercurio	4,43	3,01	100,34
Azida de Plata	5,1	3,98	201,97

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Cooper "Explosives Engineering"

Fig 2.2 (Cont)

B) MATERIALES EXPLOSIVOS COMPUESTOS			
Explosivo	Densidad g/cc	VOD (*) km/s	Presión de Detonación kilobares
COMPUESTOS			
ANFO	0,82	4,55	42,44
Amatol (AN/TNT)	1,58	5,795	132,65
Compuesto B	1,733	7,886	269,43
Plástico C-4	1,835	8,778	353,48
Pentolita (PETN/TNT)	1,66	7,448	230,21
Dinamita Granulada			
- Al 45%	1,3	2,8	25,48
- Al 65%	0,9	3,9	34,22
Dinamita Gelatinosa			
- Al 45%	1,1	4,1	46,23
- Al 65%	1,4	4,6	74,06
- Al 80%	1,6	5,4	116,64
Emulsión Encartuchada	1,2	4,4	58,08
Emulsión a Granel	1,4	4,2	61,74
ANFO cargado neumat.	0,85	3,6	27,54
ANFO Encartuchado	1,1	3,75	38,67
HANFO (heavy ANFO)	1,3	3,85	48,17

(*) VOD = Velocity of detonation (velocidad de detonación)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Cooper "Explosives Engineering"

- **Presión de detonación:** esta usualmente medida en kilobares o en gigapascales, se considera que es la presión en el frente de la zona de reacción. Cuando un explosivo detona, esta tremenda presión es liberada, prácticamente en forma instantánea, en una onda de choque, la cual existe solamente una fracción de segundo en un determinado lugar. Esta presión repentina fragmentará en lugar de desplazar objetos y es llamada generalmente Brisancia o poder fragmentador, y dependerá de la violencia con la que los productos gaseosos de la explosión son liberados. La presión de detonación es función de la densidad y la velocidad de detonación, una forma aproximada de relacionarlas es la fórmula experimental :

$$P = 2,5 D^2 \times \rho \times 10^{-6}$$

- Donde:
- P = Presión de Detonación (en kilobares)
 - ρ = Densidad (expresada en g/cc)
 - D = Velocidad de Detonación (en m/s)

- **Potencia:** El término potencia se refiere al contenido de energía de un explosivo, que a la vez es la medida de la fuerza que puede desarrollar y su habilidad para hacer un trabajo. Existen numerosos métodos para el cálculo de esta potencia, como el impacto bajo agua, la energía de burbujeo, la medición de la potencia de la

onda de choque y las medidas del esfuerzo en el material que se quiere volar. Es difícil, sin embargo poder cuantificar el desempeño de un explosivo, a través de un solo parámetro, pues no está determinado simplemente por la medida de la energía total liberada por el explosivo, sino también por la forma de liberación de esta energía y que tan efectivamente es usada en fragmentar y mover el material que está siendo volado. Tanto las propiedades del explosivo como las del material a explotar influyen en la efectividad del material seleccionado.

Cohesividad: se define como la habilidad de un explosivo para mantener su forma original. Hay ocasiones en que un explosivo debe mantener su forma, y otras en que deberá fluir dentro de un agujero, esto para permitir el uso económico del producto, por una parte y por otra evitar las sobrecargas en los barrenos. En la práctica, el comportamiento cohesivo resulta de modificaciones en las formulaciones de las masas que los constituyen, la mayor parte de explosivos mantienen en sus formulaciones, elementos de relleno, los que pueden ser cambiados para darles características especiales como color, adhesividad o luminosidad.

2.1.2. Propiedades Ambientales de los Explosivos:

Los explosivos que el usuario escoja debido a sus características físicas, deberán tener propiedades que aseguren su funcionamiento bajo las condiciones ambientales en que va a operar, estas propiedades que tienen relación con el medio, son:

Sensitividad: Es un término (sensitivity en inglés) usado para indicar la habilidad de propagación de la onda de detonación desde un explosivo (denominado donador) a otro que se halla a una distancia determinada (al que se llamará aceptor). En el pasado se definía como la distancia en pulgadas a la cual un cartucho de 1 ¼ x 8 de cualquier material explosivo, podía iniciar a medio cartucho de iguales dimensiones del mismo producto. El término sensitividad está muy ligado al término denominado "**detonación por simpatía**", el cual indica la posibilidad de iniciación de una carga explosiva próxima a otra que acaba de detonar. Algunos explosivos pueden iniciarse incluso entre barrenos, lo que causaría el fracaso de un diseño de voladuras, y consecuente importantes pérdidas económicas para el usuario.

Resistencia al agua: La resistencia al agua es la capacidad de un explosivo de soportar el contacto con el agua sin sufrir deterioro en su desempeño. Mas específicamente se expresa como el número de horas que puede estar sumergido en agua estática y aún ser detonado confiablemente. El efecto que tiene el agua en los explosivos es que puede disolver algunos componentes del producto, o enfriar a tal grado la reacción, en el momento de la detonación, que los productos ideales no

llegan a formarse. La mayor parte de los fabricantes de explosivos, prefiere establecer una medida cualitativa (“Excelente, Bueno, Regular, Malo”), para expresar la resistencia al agua de sus productos, pues esta característica, no solo depende del empaque del producto y de sus propiedades inherentes, sino de las condiciones del agua. El agua estática a bajas presiones no afectará al explosivo, tanto como lo hará el agua dinámica de movimiento rápido, o la sometida a altas presiones, por ejemplo, las contenidas en barrenos profundos con agua subterránea, que pueden densificar el material hasta hacerlo insensible a cualquier tipo de iniciación.

Humos y Vapores: Los gases resultantes de la detonación de explosivos comerciales y agentes explosivos son principalmente bióxido de carbono, nitrógeno y vapor de agua; estos no son tóxicos, sin embargo gases venenosos como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno también son parte de la reacción, y en espacios reducidos, pueden ser hasta mortales. Estos gases tóxicos son conocidos como emanaciones (el humo no debe considerarse entre ellas, el humo es vapor y productos sólidos de la combustión, y aunque no es considerado tóxico, la exposición excesiva a este producto, por ejemplo el producido por dinamitas, puede causar severos dolores de cabeza y náuseas). La MSHA y el IME (Institute of Makers Explosives) han establecido una clasificación para las emanaciones, definiéndolas como permisibles y no permisibles. (Fig. 2.3). Hay varias formas para determinar las concentraciones de gases tóxicos, como la Bomba Bichel, el aparato Crawshaw – Jones, el tanque Ardeer, los cálculos teóricos, sin embargo el método más eficiente es tomar las mediciones en el sitio después de la voladura.

Flamabilidad: Esta propiedad se refiere a la facilidad que tiene un explosivo para iniciar la reacción a partir de una chispa, flama o fuego. Algunos explosivos llegan a explotar debido a una chispa mientras que otros solo se incendian. La flamabilidad es importante desde el punto de vista de almacenamiento, transporte y manipuleo. Algunos explosivos como el LOX (Oxígeno Líquido y Carbón, usado en los 50's) fueron muy económicos, pero se les retiró del mercado debido a los problemas de seguridad que generaba su altísima flamabilidad. Durante las últimas tres décadas, explosivos como los hidrogeles y las emulsiones, han demostrado su baja flamabilidad, lo que ha permitido condiciones de trabajo con mayor margen de seguridad, pero que en ningún momento significan la posibilidad de prácticas descuidadas.

Resistencia a la Temperatura: El gradiente de temperatura afecta el comportamiento de los explosivos, en mayor o menor medida. El efecto es más apreciable durante un prolongado almacenamiento a temperaturas extremas, o cuando por características ambientales, estas tienden a variar en intervalos amplios,

originando lo que se define por "ciclado" de los productos. Todos los productos explosivos en base a Nitrato de Amonio tienen esta dificultad, cuando se manejan a temperaturas próximas a los 32°C.

Fig. 2.3 CLASIFICACION DE LOS HUMOS SEGÚN MSHA e IME

CLASIFICACION DE LOS HUMOS		
A. EXPLOSIVOS PERMISIBLES – Vol. 30 CFR Inciso 15.20 (g) (1 al 2)		
CLASIFICACION DE LOS HUMOS PARA CALIFICAR COMO "EXPLOSIVO APROBADO POR MSHA"		
El volumen total equivalente a monóxido de carbono (CO) de los gases tóxicos producidos por la detonación de un explosivo no deberá exceder de 2.5 pies cúbicos por libra de explosivo,, tal como lo determina el ensayo de cámara. El explosivo debe consumirse completamente.		
Una libra del material, incluido su empaque y sellos (si los tuviera) es colocada en el interior de la cámara de prueba, e iniciado. El volumen equivalente de monóxido de carbono es calculada, multiplicando la cantidad medida de cada gas por un factor de conversión. El factor de conversión es igual al valor limite umbral medio ponderado en el tiempo(TLV-TWA (*) expresado en ppm para el CO, dividido entre el valor TLV-TWA de cada gas tóxico. Los factores de conversión establecidos por la MSHA se describen en la Tabla siguiente. El volumen equivalente de CO para los gases tóxicos producidos por la detonación de un explosivo es la suma de los valores individuales de cada gas.		
FACTORES DE CONVERSION PARA GASES TOXICOS PARA VOLUMEN EQUIVALENTE DE MONOXIDO DE CARBONO		
Gas tóxico	Factor de Conversión	TLV-YTLA (ppm)
Amoniaco	2	25
Dióxido de Carbono	0.01	5000
Monóxido de Carbono	1	50
Ácido Sulfídrico	5	10
Óxido Nítrico	2	25
Óxido Nitroso	17	3
Dióxido de Azufre	25	2
(*)TLV-TWA Concentración Límite, ponderada en el tiempo para una jornada normal de 8 horas y 40 horas semanales, a la cual la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente, día tras día, sin sufrir efectos adversos. Se trata del valor Límite mas característico al que se hace referencia habitualmente cuando se cita el valor TLV		
B. OTROS EXPLOSIVOS PERMITIDOS POR MSHA		
CLASIFICACION IME PARA HUMOS (SLP-012)		
Clase de Humo	Pies cúbicos de gases tóxicos	
1	menor que 0.16	
2	0.16 hasta 0.34	
3	0.33 hasta 0.67	
En el ensayo de IME la cantidad de gases tóxicos producidos por la detonación de un explosivo se mide usando una Bomba Bichel. Una muestra de 200 gramos del explosivo se empaquetan en un cartucho de 1 ¼ x 8 pulgadas, se sellan y se inician en el interior del equipo.		
<i>Fuente : Traducción Libre del Apéndice E del Blaster's Handbook ISEE 17th Ed.</i>		

A esta temperatura ocurre un cambio en la forma de cristalización del Nitrato (de monoclinicos a ortorrómbicos), este cambio rompe los cristales monoclinicos en ortorrómbicos más pequeños, cuando la temperatura baja, los ortorrómbicos vuelven a partirse esta vez en monoclinicos aún más pequeños, de esta forma el material que en un principio pudo tener una densidad de 0,75 g/cc termina en un mes de ciclos, con una densidad de 0,95 g/cc o más. Como mencionáramos, un aumento de la densidad insensibiliza al explosivo, el fenómeno de insensibilización también es posible por condiciones de frío extremo, la cristalización de algunos ingredientes de las mezclas explosivas originan un proceso de endurecimiento de los productos, lo que aumenta la dificultad y los riesgos de la iniciación por fricción. Los hidrogeles y las emulsiones tienen asimismo un marcado decrecimiento en su propiedades cuando son manipulados a temperaturas menores a los -12°C . Algunos iniciadores, que cuentan con masas detonantes de retardo, se afectan hasta la insensibilidad.

2.2 DIVERSOS TIPOS DE EXPLOSIVOS:

Las propiedades explosivas de cualquier sustancia no son necesariamente resultado de su estructura molecular, pero como sabemos, los grupos orgánicos tienen un comportamiento similar, de donde se podrá afirmar que existe un número razonable de combinaciones que originen sustancias explosivas puras, al menos existe una limitada variedad de estructuras orgánicas que tendrían características explosivas y estas pueden agruparse en una clasificación como la que anotamos en la Fig. 2.4. Sin embargo otros factores como el costo de la materia prima y su procesamiento, su estabilidad térmica, compatibilidad química, toxicidad, sensibilidad y otras propiedades físicas y ambientales de los productos, limitan el número de sustancias explosivas a unas pocas centenas

Aunque la mayor parte de los compuestos explosivos que se anotan dentro de lo descrito en la Fig. 2.4, pueden ser usados en su forma pura como líquidos o en polvo prensado, y algunos como el TNT previamente fundido, la necesidad de contar con ciertas propiedades mecánicas que hemos descrito en el acápite anterior, hace que estas sustancias sean frecuentemente mezcladas con otros explosivos o con materiales inertes, para poder ser ofrecidas al mercado.

Fig. 2.4 ORGANIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PRODUCTOS EXPLOSIVOS PUROS



Fuente: "Explosives Engineering" – Paul W. Cooper

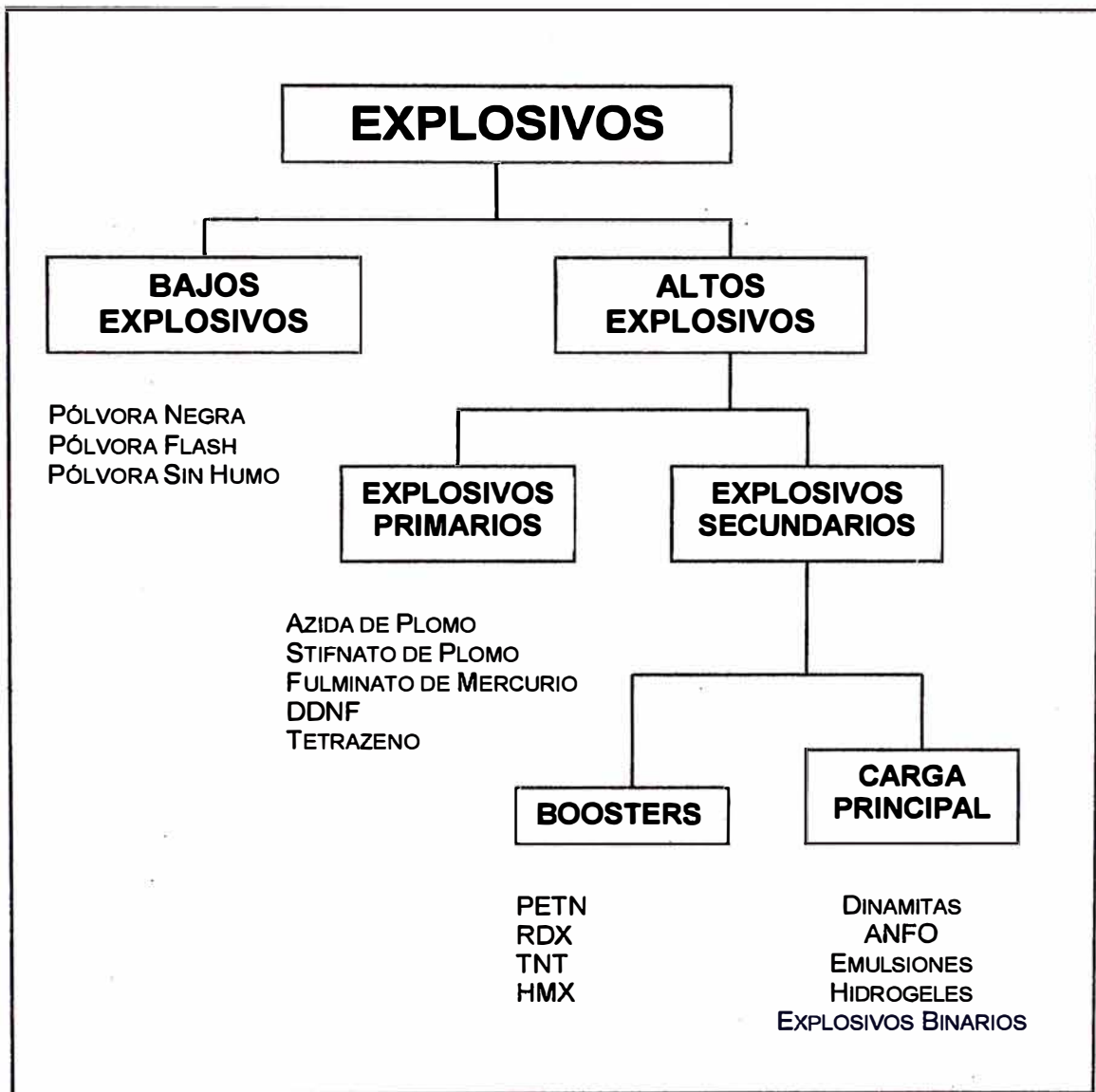
De esta manera se establece una clasificación que atiende fundamentalmente el uso, y es definida como se anota en forma resumida en la Fig. 2.5 , es esta Clasificación de Explosivos Comerciales la que describiremos:

2.2.1 Bajos Explosivos:

Son mezclas explosivas, cuya reacción no es lo suficientemente rápida para crear una onda de choque, por consiguiente los gases producidos tienen baja presión, a pesar de existir una reacción exotérmica , con producción de flama y humos, esta no es lo suficientemente violenta como para detonar, se dice que en este caso el explosivo *deflagra*. Arbitrariamente se considera que si la velocidad de reacción no confinada, es inferior a los 1525m/s (5000 pies/segundo), el explosivo deberá ser considerado como bajo explosivo. El confinamiento puede convertir a un bajo

explosivo en un alto explosivo, esto, si es que, el aumento de densidad no lo lleva hasta la llamada "dead pressing". Los Bajos Explosivos más usados son:

Fig. 2.5 CLASIFICACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS COMERCIALES



Fuente: Elaboración Propia

- **Pólvora Negra:** Sin lugar a dudas el explosivo más antiguo, su origen es oscuro, y sin lugar a dudas fueron los chinos los primeros en formularla, pero la primera fórmula escrita pertenece a los árabes, quienes hacia el siglo XIII especifican el uso del salitre o nitro en su preparación. La primera planta de pólvora que se instaló en América, lo hizo cerca de Boston en 1675, la primera mina que utilizó pólvora prensada para volar rocas fue la mina de cobre de Simsbury, Connecticut en 1773.

Durante 600 años la pólvora reinó en el mundo de los explosivos, en 1917 se producían solo en EE UU 277 millones de libras (unas 126, 000 TM), sin embargo , luego de la 1ra. Guerra Mundial, la aparición de la dinamita y otros compuestos precipitaron su caída, hoy en día, se producen unas 50 TM empleadas fundamentalmente en pirotecnia y deportes de tiro o cacería. El principal uso de la pólvora se da en la fabricación de la mecha de seguridad, un cordón flexible, constituido por fibras textiles, e impermeabilizado por mezclas asfálticas y forrado en plástico, que en su interior lleva un reguero continuo de pólvora, y es empleada para conducir flama a una velocidad constante hacia los puntos de ignición.

- **Pólvora Flash:** Es una formulación en base a pólvora negra, a la que se le agrega un agente oxidante, como permanganato o dicromato de potasio, y algunos metales en polvo o en diminutas hojuelas (fierro, zirconio, níquel) lo que la hace bastante más sensible a la ignición por calor, fricción o golpe. Su uso se limita a la pirotecnia y a la fabricación de propelentes para municiones.
- **Pólvora sin humo:** La formulación de la llamada pólvora sin humo es muy propia de cada país, por lo común es un compuesto formado por Nitrocelulosa, oxidantes y polvos metálicos, a la que se le añaden diversos productos de relleno con la intención de modificar su comportamiento, y así poderla utilizar como propelente de municiones para armas pequeñas, o de cañones, cohetes, y otros artefactos de uso balístico.

2.2.2 Altos Explosivos:

Los altos explosivos agrupan a sustancias puras y compuestos o mezclas hechas a partir de ellas, que detonan al ser iniciadas por fuego, chispa o fricción, y que necesariamente producen una onda de choque luego de su detonación, no necesitan ser confinados para tener este comportamiento, y generalmente tienen alta brisancia o poder rompedor.

Los altos explosivos están divididos en explosivos primarios y secundarios atendiendo a su sensibilidad a la iniciación, los primeros constituyen el medio iniciador para los segundos.

2.2.2.1 Explosivos Primarios:

Son aquellos que pueden detonar por acción de un relativamente débil golpe o por efecto de una chispa, se utilizan mayormente en la fabricación de detonadores, fulminantes o cápsulas de detonación, en la que constituyen el tren iniciador, prensado sobre un explosivo secundario, que se coloca al fondo de la cápsula para que este en contacto con el material a iniciar. Todos los explosivos primarios son altamente sensibles y tienen tiempos de reacción muy rápidos, su velocidad debe ser mayor a los 5000 m/s. Los mas conocidos son: la Azida de Plomo, el Tricinato o

Stifnato de Plomo, El Fulminato de Mercurio, Diazodinitrofenol (DDNF), las sales de plomo del ácido pícrico, el tetrazeno y otros.

- **Fulminato de Mercurio:** Descubierta por Lewenstein hacia 1660, fue durante muchos años el explosivo primario por excelencia, el termino fulminante, y muchas de las especificaciones que rigen hasta ahora para los detonadores, están hechas a partir de sus formulaciones. En la actualidad tiene un valor histórico únicamente, pues la Azida de plomo lo ha desplazado totalmente, su velocidad de detonación que no llegaba a los 4500 m/s y su inestabilidad térmica lo hicieron impráctico.

- **Azida de Plomo:** Material más eficiente que el fulminato al que reemplazo como iniciador en las cápsulas detonantes, su VOD está sobre los 5000 m/s y es estable sobre los 200°C. Usualmente se le mezcla con Tricinato de Plomo, para aumentar su poder de iniciación.

Stifnato o Tricinato de Plomo: el Tricinato es un mal agente de iniciación, debido a que es sensible al fuego y a las cargas estáticas, sin embargo, mezclado con la Azida de Plomo, forman un excelente material de carga primaria en la fabricación de fulminantes. (VOD = 5172 m/s).

2.2.2.2 Explosivos Secundarios:

La necesidad de contar con explosivos menos sensibles que los primarios, es obvia, en tanto, a pesar del alto poder rompedor de los primarios, estos no podían fácilmente usarse en minas, construcciones o incluso usos militares, debido a su alta sensibilidad, que significaría un peligro constante tanto en el transporte, el manejo y las condiciones de almacenamiento.

Los explosivos secundarios son llamados también insensibles, ya que no se inician por golpe, fuego o fricción, requiriendo para su iniciación precisamente del auxilio de los primarios, esto es, un fulminante No. 8.

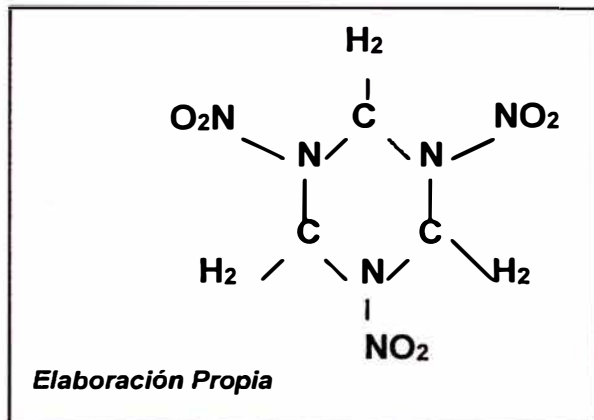
El más importante de los explosivos secundarios es la Nitroglicerina, aunque no como se produce en laboratorio, sino como el producto denominado gelatina explosiva, en la que se le ha agregado nitroglicol, nitrocelulosa y otros estabilizadores, que le permiten ser manejada a temperaturas relativamente altas sin riesgo de detonación.

Los demás explosivos secundarios pueden dividirse en **Boosters o Cebos**, productos con alta brisancia, que se usan como iniciadores de columnas explosivas de productos más insensibles, y los denominados **carga principal**, y que el mercado reconoce como altos explosivos, son usados en mayor volumen y teniendo un poder rompedor inferior a los cebos, pueden fracturar y desplazar las rocas con marcado éxito.

Explosivos Secundarios del tipo

cebo (boosters): estos productos constituyen la parte brisante de los detonadores, son muy estables químicamente, ante presencia de fuego arden sin detonar y son moderadamente insensibles al golpe y la fricción. Se les requiere como iniciadores de otros explosivos menos sensibles, a los que un fulminante No. 8 no puede iniciar. Los más conocidos son Nitropenta (PETN), RDX, HMX, TNT y combinaciones de ellos.

Fig. 2.6 ESTRUCTURA DEL RDX



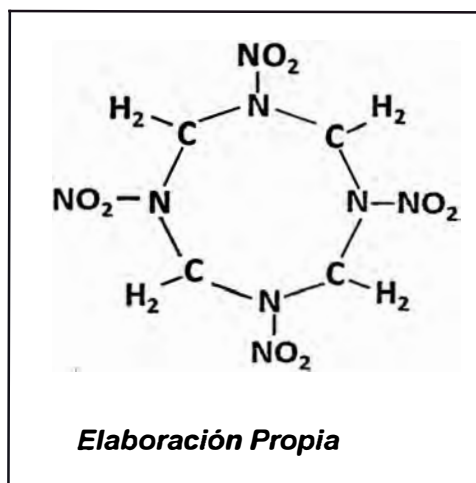
- **PETN (nitropenta)** : A partir de 1901 el Tetranitrato de Pentaeritritol se convierte en el más estable y el menos reactivo de los esteres nitrados. Es a la vez uno de los más poderosos y brisantes explosivos. Insoluble en agua, se insensibiliza en su presencia, por lo requiere que para su traslado sea humedecida al 20%, en presencia de fuego se prende sin detonar, y es moderadamente insensible al golpe y fricción. Su utilización es fundamentalmente como componente secundario de los fulminantes, constituye el centro explosivo del cordón detonante y se mezcla con TNT para producir cebos y explosivos sísmicos.
- **TNT (Trinitrotolueno)**: Hasta la aparición del Exógeno y Octógeno, era el explosivo militar por excelencia, para la carga de bombas y municiones de mortero. Preparado en 1863 por Wilbrand, los alemanes desarrollaron métodos de producción industrial en 1891, y en 1903 lo adoptaban oficialmente como explosivo de su ejército. El TNT es muy estable químicamente, permite ser fundido y adoptar la forma que se quiera, con lo que el material alcanza velocidades de detonación del orden de 6700 m/s, su insensibilidad al golpe, fuego y fricción lo hacen particularmente perfecto como cebo de explosivos mas insensibles, y como bloque de demolición.
- **RDX (exógeno)**: La ciclonita o Ciclotrimetilentrinitramina (Fig. 2.6) descubierta por J. Bain en USA, debe a la segunda guerra mundial su utilización y conocimiento, los alemanes lo denominaron exógeno, los ingleses Real Design Explosive, los americanos Research Development Explosive y los italianos T4. Es el material básico para los explosivos de uso militar. Su VOD confinada sobrepasa los 8500m/s, es muy estable y su brisancia es la mayor que existe, sus propiedades de desempeño solo son superadas por el HMX. Es el componente principal de los explosivos militares plásticos.

- **HMX (Octógeno)** : Descubierto accidentalmente mientras se preparaba RDX, la Ciclotetrametilentetranitramina, (Fig. 2.7) es aún más estable que el RDX a temperaturas altas, lo que lo convierte en más versátil, su resistencia a la iniciación por fuego, chispa o golpe, lo convierten en un producto muy útil en la fabricación de los tubos de choque, producto explosivo destinado a reemplazar a la mecha de seguridad y al cordón detonante en la iniciación de explosivos primarios y secundarios, mezclado con Aluminio, el producto es sensible a ser iniciado por un mini-fulminante y alcanzar velocidades de 2000 m/s.
- **Mezclas para Boosters:** Con los productos descritos se preparan diversas mezclas utilizadas para fabricar boosters y explosivos militares, tales como el Compuesto B (RDX y TNT) , la Pentolita (PETN Y TNT) o la Octolita (HMX y TNT).

Explosivos Secundarios usados como Carga Principal: Los explosivos secundarios usados como carga principal de los barrenos pueden dividirse en tres categorías genéricas: las dinamitas, las suspensiones, y los agentes de voladura, estos últimos, también detonan y generan onda de choque, sin embargo, desde el punto de vista de almacenamiento y transporte son menos sensibles a la iniciación, ya que ninguno de ellos puede ser iniciado correctamente por un fulminante No. 8.

- **Dinamitas:** la desensibilización de la nitroglicerina, descubrimiento de Nobel, en 1864, dio origen al empleo de la dinamita, el producto fue mejorándose continuamente, para hacerlo menos sensitivo y más seguro. En la actualidad, la Nitroglicerina se comercia como gelatina explosiva, y es el más importante de los componentes de todas las dinamitas, estas contendrán además de la NG, Nitrocelulosa, Nitroglicol, Nitrato de Amonio, Nitrato de Sodio y material combustible (harinas de trigo, madera, arroz, polvo de diatomáceas, etc.). En el pasado las dinamitas se separaban en granulares o pulverulentas, gelatinas y semigelatinas, dependiendo de la cantidad de nitroglicoles y nitrocelulosa que tuviese el producto, las pulverulentas y semigelatinas eran mezcladas adicionalmente con Nitrato de Amonio. En la actualidad se mantienen los nombres, pero es la concentración de Nitrato de Amonio y Gelatina explosiva, las que definen las características de estos productos.

Fig. 2.7 ESTRUCTURA DEL HMX



Diferenciándose por su resistencia al agua, su sensibilidad y fundamentalmente por la potencia explosiva, la que se mide en el mortero balístico.

- **Suspensiones:** Suspensión es una forma de llamar a este tipo de mezclas explosivas, en realidad se presentan en dos formas: **Hidrogeles** y Emulsiones, los primeros empezaron a fabricarse como slurries (lodos) en los 60's, utilizando para su sensibilización a la ignición TNT o nitrocelulosa, el termino hidrogel no se utilizó sino en los 70's, cuando comenzó a emplearse la mono etanolamina como sensibilizador, evitando las dificultades que tuvieron los slurries en cuanto a transporte y almacenamiento. Desde 1980 los hidrogeles utilizan microbalones de vidrio como agente sensibilizador, nitrato de Amonio y nitrato de sodio o calcio como oxidantes y como combustibles elementos tan diversos como aluminio, carbón pulverizado, azúcar, etilenglicol y aceite, las sales disueltas en agua, actuando los otros componentes como el dispersado disuelto en la fase líquida, que generalmente ha sido modificada por la presencia de gomas del tipo guar, o geles de polímeros que permiten gelificar al producto.

Las **emulsiones** son más recientes que los hidrogeles, son soluciones acuosas de sales oxidantes disueltas en un medio aceitoso, el medio oleoso esta constituido por ceras y aceites disueltos en diesel 2 y constituye la fase continua, la solución acuosa de nitrato de amonio y nitrato de sodio es la fase discontinua, la emulsión se logra gracias a la presencia de un agente emulsificante que puede ser lecitina de soja, ésteres de sorbitol, o ésteres de cadenas alifáticas poliméricas. Las características de hidrogeles y emulsiones son similares en cuanto a velocidad, potencia y sensibilidad a la ignición, sin embargo los hidrogeles se ven muy afectados por las condiciones climáticas y esfuerzos mecánicos, las emulsiones han demostrado un mayor rango de aplicaciones, pueden ser comercializadas al granel, y los fabricantes de explosivos las prefieren a los hidrogeles. En la Fig. 2.8 se comparan las principales propiedades de ambas.

- **Los Agentes de Voladura**, son los explosivos más utilizados hoy en día, la forma más común es el denominado ANFO, una mezcla de perlas porosas de Nitrato de Amonio (**prills**) que al mezclarse con el 5 o 6 % en peso de Diesel 2, logra una formulación adecuada para el balance de oxígeno de la reacción explosiva. Se le agregan modificadores para mejorar su performance, aluminio o carbón pulverizados para mejorar la sensibilidad, compuestos de hierro para aumentar su densidad, o microbalones de vidrio para aumentar su sensibilidad

Fig. 2.8 COMPARACIÓN DE PRINCIPALES PROPIEDADES DE MEZCLAS COMERCIALES EXPLOSIVAS

PROPIEDADES DE LOS ALTOS EXPLOSIVOS de CARGA PRINCIPAL							
Propiedad	Hidrogel 1 ¼" a 2 ¼"	Hidrogel 3" a 8"	Emulsión 1 ¼" a 2 ½"	Emulsión 2" a 5"	ANFO2 ¼" a 5"	HANFO 2" a 5"	Explosivo Binario (3)
Densidad (g/cc)	1,2	1,21	1,17	1,24	0.78	1,3	1,03
VOD (m/s)	4800	4500	5150	5030	3750	3850	4300
Potencia Det (kba)	69,67	61,28	77,58	78,43	27,44	48,17	47,62
Fuerza Relativa (1)	1,46	1.38	1,07	1,56	1.00	1,83	1.23 (4)
Sensibilidad al No.8	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si
Resistencia al Agua	Regular	Regular	Buena	Excelente	Mala	Regular	Buena
Calidad de Humos	Buena	Buena	Buena	Buena	Regular	Regular	Buena
Resist. Al Esfuerzo (2)	Mala	Regular	Regular	Buena	Mala	Regular	Buena
Resistencia a la Tº	Regular	Regular	Regular	Buena	Mala	Mala	Buena

(1) Calor de reacción por unidad de volumen comparado con la energía de un volumen igual de ANFO

(2) Resistencia de un cartucho de 1" de diámetro a ser manipulado durante 5 minutos

(3) Sobre el producto comercializado por XPLO Co con el nombre de Kine-pak y Kine-stick

(4) Valor del fabricante, no se han reportado valores para operaciones completas.

Fuente: Elaboración Propia

y velocidad de detonación. Es muy ventajoso usar ANFO en minas secas, pues se puede manejar a granel, y como hemos mencionado, ni el Nitrato de Amonio ni el Diesel 2 son sujetos de controles tan estrictos como los que deben tener los demás explosivos, una ventaja adicional es que el material es insensible al fulminante No. 8 o a un disparo de rifle, lo que hace seguro su manejo. En la actualidad se utiliza la mezcla denominada HANFO (Heavy ANFO) que es la aplicación de emulsión a Granel sobre ANFO, esto permite darle unas horas de impermeabilidad y se está usando mucho en operaciones que tienen alta humedad.

- **Explosivos Binarios:** Estos explosivos están constituidos por dos componentes, ninguno de los cuales es un explosivo en sí hasta que se mezclan. Los más populares en la actualidad son una combinación de una mezcla oxidante en base a Nitrato de Amonio y un líquido combustible en base a nitro metano, que ha sido teñido de rojo o verde, al mezclarse, originan una suspensión que puede reemplazar a cebos o a dinamitas. Son muy apropiados para el pequeño operador, el que puede conseguir ahorros muy importantes, en transporte y almacenamiento,

que compensan un precio relativamente mayor al de suspensiones y agentes. Existen otros productos en el mercado, basados en oxidantes, líquidos o sólidos inflamables, y similares, todos ellos se hallan pre - empaquetados, para su comercialización. En algunos casos, como en la desactivación de minas anti – personales en Croacia, se ofrecen como ventajas adicionales un tiempo de vida relativamente corto luego de preparados, esto evita que el producto pueda tener otros usos ilegales (terroristas) o indebidos (contrabando).

2.3 UTILIDAD DE LOS EXPLOSIVOS:

La mayoría de las materias primas que utiliza la sociedad hoy en día son producidas con el uso de explosivos en las minas alrededor del mundo. La construcción de carreteras, canales y edificios, se logra gracias a la ayuda de los explosivos. Inclusive la comida que consumimos a diario, no existiría sin la ayuda de explosivos que fragmentan las rocas de las minas de salitre para producir fertilizantes, y las de metales con los cuales se fabrican tractores y otros implementos agrícolas.

Un Repaso histórico: El uso de explosivos en minería y construcción data de 1627. De 1627 a 1865, el explosivo utilizado era la pólvora negra; ella se usaba en regueros para comunicar un punto a otro, y los lugares que precisaban ser volados eran confinados a presión. En 1865 Nobel inventa la dinamita, en base a la absorción de la nitroglicerina por la tierra diatomácea (kieselgur), y en 1866 las gelatinas explosivas de Nobel habían reemplazado en la mitad de las minas de Europa a la pólvora, adicionalmente a ello el uso de la máquina de vapor para impulsar barrenos de perforación, y la invención de Bickford, de la mecha de seguridad, convertían el trabajo de minas en un negocio que se convertía en seguro y que por su velocidad de desarrollo, pasaría muy pronto a convertirse en una industria que movilizaría no decenas sino miles de toneladas. Desde 1867 hasta la mitad de los años 50's la dinamita fue el caballo de batalla de la industria de los explosivos.

A mitad de los años 50, apareció en el mercado el ANFO, este producto es mucho más económico que la dinamita y actualmente es la base de la industria de explosivos en Estados Unidos y otras partes del mundo, Los nuevos explosivos aparecidos entre 1960 y 1980, denominados hidrogeles y emulsiones, han reemplazado a la dinamita en casi todas sus aplicaciones. Con ellos paralelamente se desarrollaron los sistemas de iniciación eléctrico, el barrenado neumático y posteriormente el tubo de

choque y la voladura no eléctrica, los años 90 vieron el desarrollo de la voladura electrónica, y algunas técnicas muy originales como los fluidos rompedores, para voladura silenciosa, que desarrolló la empresa italiana Specchi.

El escenario político mundial actual, con la presencia del terrorismo a escala internacional, está forzando al mercado no solo a aumentar los controles con que ya cuenta sobre todo aquel material que pueda ser catalogado como explosivo, sino a desarrollar tecnologías que permitan el uso de productos que no se consideren en si mismos como explosivos, que en el lugar de uso por simple mezcla pueda convertirse en un material que produzca una voladura segura, y que se desactive en un tiempo muy corto en sustancias que no sean perniciosas, ese es el campo que deberían cubrir los **explosivos binarios**.

2.3.1 Voladura subterránea y a tajo abierto:

La teoría de explosivos se basa en una simple premisa: *“el producto mas sensible inicia al menos sensible”*, la cabeza de un fósforo, inicia por chispa (no por flama) al reguero de pólvora dentro de la una mecha de seguridad, este conduce una corriente muy alta de calor hasta una mezcla de azida y tricinato de plomo dentro del cuerpo metálico de un fulminante, y que al detonar inicia a la carga secundaria de nitropenta que se halla al extremo del detonador, quien se halla alojado dentro del gelatinoso cuerpo de un cartucho de dinamita o una emulsión, la onda de choque de la nitropenta es suficiente par iniciar a la mezcla de nitrato de amonio, combustibles y estabilizadores que al detonar fraccionará o desplazará las rocas a su alrededor, o quizás también inicia a una carga de ANFO en el fondo de un tiro.

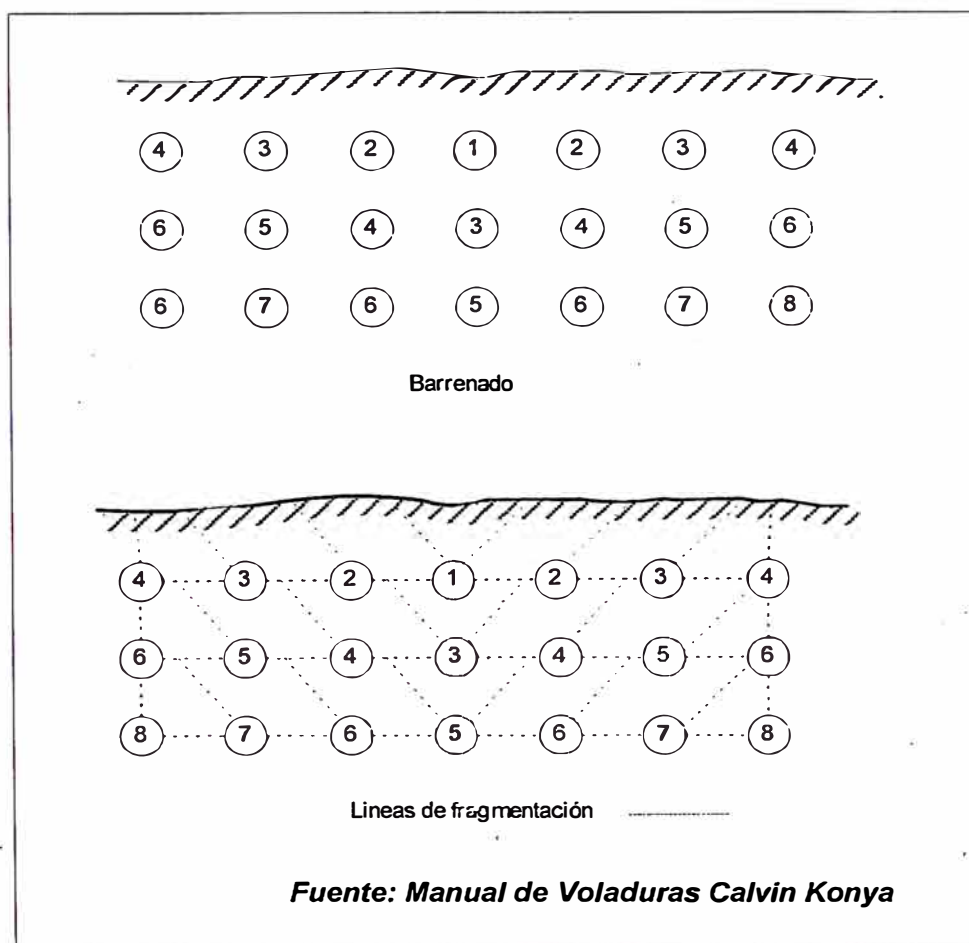
Los problemas en voladuras generalmente son el resultado de un diseño de voladura deficiente, mala ejecución del barrenado, mal cargado según el diseño propuesto o porque la masa rocosa fue erróneamente evaluada. Un diseño de voladuras no es otra cosa que la evaluación de parámetros como bordo, taco, sub-barrenación , espaciamiento, tiempo de iniciación y calidad de roca, para una vez calculados y ensayados cuidadosamente, la voladura funcione de manera eficiente, segura y con niveles de vibración y golpe de aire razonables.

En minería tanto subterránea como a tajo abierto, los componentes principales del costo, son la energía y el volumen de material movilizad, una operación minera a tajo abierto cualquiera, que moviliza 5000 Tm de tierra por día, sería impensable de manejar sino existieran explosivos, no habrían elementos

mecánicos capaces de romper roca a esa velocidad. Adicionalmente la roca debe ser fragmentada en un tamaño tal que sea fácilmente convertida en polvo, a través de molinos y chancadoras.

Para que esta operación sea económica, es necesario que el diseño de voladura este planeado de tal manera que el trabajo de los explosivos, rompa a la roca en fragmentos uniformes, que posibiliten: uno, que la operación de molienda, previa al ataque químico que extraerá el metal, sea hecha sin necesidad de operaciones de pre – reducción de partículas; y dos que la voladura proporcione un nuevo frente de roca limpio para volver a planear la siguiente. Para obtener con éxito ambos resultados, se planean las plantillas de voladura (Fig. 2.9) las que establecen secuencias de disparo, es decir que orden seguirá la detonación de los explosivos.

Fig 2.8: PLANTILLA DE VOLADURA: CORTE EN CAJA CON SECUENCIAMIENTO SIMPLE



La resistencia de un manto de roca puede variar de pequeña a gran escala dependiendo de su estructura geológica. Las juntas, estratos, fallas y bolsas de lodo pueden causar problemas a la hora de diseñar una voladura. El estudio de estas variaciones son el trabajo de un ingeniero de minas, quien elegirá en base a ellas, cuales son las profundidades del tiro o taladro, para minería subterránea, o las longitudes del barreno para minería superficial, cual cara de roca dejará como alivio y sobre todo que tipo de explosivo le convendrá utilizar, sin ese conocimiento el diseño se convierte solo en un proceso de prueba y error.

2.3.2 Carretera, Túneles y Construcción civil:

En este caso el termino clave es "*voladura controlada*", esta se hace para evitar los costos de mantenimiento, para obtener taludes (esto es, en el ángulo de reposo del material ya volado) estables y seguros. Los responsables de las voladuras en este caso, planean una plantilla de voladura, donde lo importante es el resultado del corte, teniendo en cuenta que los productos fragmentados deberán utilizarse de relleno y requieren de uniformidad, no tanta como en la minería, pero lo suficiente como para no crear distorsiones en el suelo. Para el uso de voladuras de estructuras, se deberá contar además del conocimiento del comportamiento de la onda de choque de los explosivos, de los puntos de sustentación del edificio a volar, y la secuencia en que éstos deben ser destruidos para crear la menor cantidad de vibraciones y golpes de aire.

2.3.3 Exploración Sísmica

El gas natural y el petróleo se crean en formaciones sedimentarias y migran hacia la superficie de la tierra quedando atrapados en alguna estructura impermeable (anticlinales, fallas, domos salinos, filones de caliza); la sismografía determinó hace mucho que las ondas sísmicas crean diversos ecos al atravesar estas estructuras. La prospección sísmica se basa en que los lechos geológicos tienen una densidad y comportamiento elástico variable, y que un golpe repentino tal como el que produce una explosión envía energía sísmica en todas direcciones, y si se aplican cerca del lugar del disparo instrumentos que puedan medir las diferentes impedancias acústicas, pueden determinarse las irregularidades y características geológicas del lugar a estudiar. Los instrumentos que registran la onda son denominados geófonos, y para este trabajo se utilizan explosivos con alto poder rompedor, y de alta resistencia al agua como el TNT, la pentolita y en la actualidad algunas emulsiones especialmente preparadas para que tengan una mayor presión de detonación; iniciados por fulminantes eléctricos instantáneos que tienen un tiempo de reacción

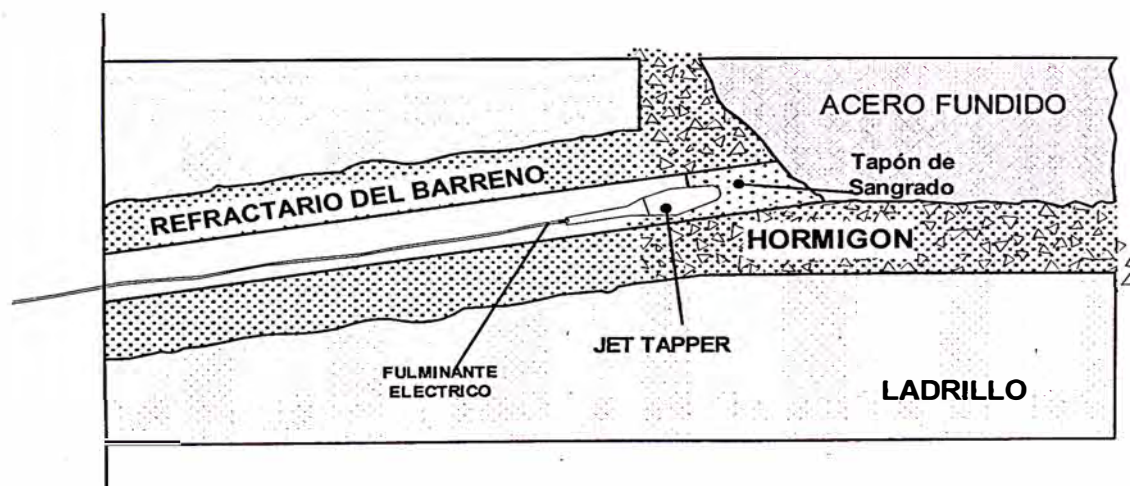
menor a los 2 milisegundos. Existen dos métodos de prospección sísmica, el más conocido utiliza la reflexión de las ondas sísmicas generadas por el explosivo, para medir los ecos generados, colocando los geófonos directamente sobre el terreno a prospectarse, el otro utiliza la refracción y en ella los geófonos se disponen a una distancia mas extendida del punto que genera la explosión midiéndose en este caso las ondas generadas a través de la superficie a investigar.

2.3.4 Otros Usos:

Además de las ya nombrados, los explosivos se usan con éxito en la **prospección submarina**, utilizando explosivos similares a los desarrollados para la prospección sísmica; también en el **destape de hornos refractarios**, aquí se utiliza un producto denominado jet tapper, que utiliza el efecto Monroe para agujerear el tapón de sangrado y permitir que fluya el material fundido, evitando dificultades como: las quemaduras por llamas de oxígeno, la proximidad del personal cuando el metal caliente empieza a fluir, como el explosivo se volatiliza completamente, el flujo es rápido, sin escorias y el canal de sangrado queda siempre limpio. (Fig. 2.10).

Otros usos que actualmente se dan a los explosivos se hallan en : la **Excavación de cimientos** para edificios de gran altura, los que requieren de un movimiento de tierras de gran volumen, en lugares en que la dureza de la roca debe ser particularmente alta; la **Demolición de Puentes y Túneles**, que hacen imprescindibles la utilización de explosivos rompedores y productos de retardo específicamente diseñados. **Excavamiento de zanjos (Trenchs)** para encausamiento de ríos o transvase de aguas, un campo que utiliza

Fig 2.10: USO DE UN JET TAPPER PARA VACIAR UNA MARMITA DE ACERO



Fuente: *Blasters Handbook 17 ed.*

explosivos a granel, que deberán tener un comportamiento ecológico. En Canadá, USA y Rusia se utilizan en el **Talado de grandes árboles** (con 8 m ó 12 m de diámetro), aquí el cordón detonante de alto gramaje ha desplazado a la sierra eléctrica; finalmente, en el **movimiento preventivo de hielo y nieve** para evitar aludes o entrampamientos. Es evidente que el más importante uso comercial de los explosivos, es como parte de cualquier material bélico, pero no es materia de este trabajo el desarrollo del tema militar, deberemos mencionar sin embargo, que una aplicación muy importante de los explosivos es la desactivación de minas anti – personales, tal como se utilizó un cordón detonante especialmente desarrollado para el desminado de la frontera peruano - ecuatoriana.

III. LEGISLACIÓN Y CONTROL DE LOS EXPLOSIVOS:

El Control de explosivos es una función que el estado establece como suya, encargando su manejo a diversas entidades, todas las cuales, de una forma u otra son parte del aparato militar o del encargado de la Seguridad Interna, en USA es el Departamento del Tesoro, quien legisla sobre el tema, encargando a las Fuerzas de Seguridad Federales el Control de estas leyes, en España es el Ministerio de Seguridad Ciudadana, en Canadá el Buró para la Seguridad Pública, en Perú, la labor esta encargada al Ministerio del Interior, quien ha comisionado en la DICSCAMEC el manejo de todo lo concerniente al Control de Armas, Municiones y Explosivos de Uso Civil.

Aparte de la Legislación que existe en cada país sobre el manejo, transporte, tenencia, fabricación, comercialización, almacenamiento y uso de explosivos; internacionalmente, a partir de la legislación marítima para transporte de carga peligrosa, en 1948, se han venido haciendo esfuerzos para normar en un solo documento, los términos, características, ensayos y pruebas que deberán cumplir los productos explosivos. Este documento, establecido como el Orange Book del Comité de Expertos de la ONU sobre Bienes Peligrosos, clasifica y segrega los materiales explosivos atendiendo a su peligrosidad, y recomienda los controles y especificaciones que deberán cumplir, principalmente para su Transporte, Manipuleo y almacenamiento.

3.1. LEGISLACION NACIONAL

La primera legislación que en nuestro país se hizo sobre el tema, fue hecha en Diciembre de 1909, en ella se comisiona a la Subprefectura de cada provincia para autorizar el tránsito previo cumplimiento de ciertos requisitos. El desarrollo de la legislación nacional es mas bien anecdótico, por ejemplo en 1928, se definió a Ancón como puerto especial para descarga de explosivos, en 1935 se ordena a la Guardia Civil el control y constatación de las **guías de tránsito** que otorgaba la Subprefectura, y a partir del 36 es la Guardia Civil, quien se encarga de otorgar dicho permiso. En 1941 se establece el termino **custodia policial**, y se definen los requisitos a cumplir por las unidades encargadas de transportar explosivos. En 1945, el otorgamiento de guías vuelve a ser función de las Prefecturas, se autoriza al Banco Minero la venta de explosivos a sus clientes (pequeña y mediana minería), se establecen los **certificados de existencia** y las inspecciones inopinadas para todo aquel que fabrique, comercie o use explosivos. En 1956 se establece una validez de 45 días para las guías de tránsito, y se les otorga a las Prefecturas poder para cerrar a aquellas fabricas que no cumplan las disposiciones de seguridad. En 1964 se crea la DICAMEC (Dirección de Control de

Armas, Municiones y Explosivos de Uso Civil) como organismo, aún dentro de la Guardia Civil, encargada del control de la importación, fabricación, comercio, reparación, adquisición, tenencia y uso de armas, municiones y explosivos de uso civil. En 1969 pasa a depender del Ministerio del Interior, y en 1970 se le encargan el otorgamiento de las guías de tránsito, las licencias de importación y las de uso de explosivos, que a esa fecha aún eran labor de las Prefecturas. El 26 de Agosto de 1971 se aprueba el DS 019-71/IN, que establece el control estatal de los explosivos a través del Ministerio del Interior (por intermedio de la DICSCAMEC, que se convierte en Dirección descentralizada y una de las siete direcciones que tiene el MI), del de Transporte y Comunicaciones, Servicio Nacional de Inteligencia y Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas, dentro de sus respectivas áreas de acción. Estableciendo además como sanciones para el incumplimiento de las normas señaladas el apercibimiento escrito, el decomiso, la multa, la suspensión de la licencia y la clausura temporal o definitiva.

El Control de Explosivos por la actual DICSCAMEC (Se le encargaron en los 90's, el control de Agencias de Seguridad, pasando a ser Dirección de Control de Seguridad, Control de Armas, Municiones y Explosivos de Uso Civil), se ejerce en los siguientes campos:

- Autoriza el funcionamiento de las fábricas de explosivos mediante una Resolución Directoral, sin la que no se puede obtener la RM correspondiente.
- Autoriza por Resolución Directoral la importación de insumos para la Industria Nacional, y los explosivos que ella no produce.
- Autoriza la exportación de productos explosivos.
- Controla las existencias de las fábricas y puntos de uso.
- Autoriza las Licencias Globales de Compra, para cada usuario del país.
- Expide las Guías de tránsito; y
- Controla la posesión de explosivos de cualquier persona natural o jurídica dentro del Perú.

El tema del Control de DICSCAMEC, es que, además de la presión tributaria que ya tienen tanto la Industria Minera como la Industria de Explosivos, se ejercen otras cargas económicas, que devienen de este control: un traslado de explosivos desde los almacenes del fabricante hasta la obra del usuario, deberá hacerse en vehículos que cuenten con una licencia, trámite que tiene un costo, y con requisitos que encarecen el costo del servicio que ofrece el transportista, por encima del 20% del valor de cualquier otro transporte de carga para la misma distancia. Cualquier custodia policial cuesta US\$ 20 por cada 12 horas de servicio, una distancia de 500 km (un promedio en el país)

requiere de 14 horas de traslado, esto se convierte en 48 horas de custodia (pues el custodio considera el tiempo que deberá usar en regresar a su lugar de origen) hecha por dos efectivos de la Guardia Civil, a lo que debe sumarse el tiempo y los gastos en la obtención de la Licencia Global y las guías de tránsito. En obra, los usuarios deberán contar con Almacenes que cubran las normas especificadas por DICSCAMEC, lo que en la práctica significa, trámites de licencia, inspecciones, infraestructura adicional, personal para supervisión y otros gastos que se generen en su implementación, además de las multas y sanciones que pueda acarrear el no cumplir con cualquiera de ellas.

En el Anexo I, adjuntamos un resumen de la reglamentación nacional, la que en esencia tiene varias inconsistencias, debido por una parte a la fecha en que fue dada, y por otra. a que su contenido técnico fue redactado copiando algún instructivo inmediatamente posterior a la Segunda Guerra Mundial, pues en su contenido no figuran explosivos como el HMX ni Emulsiones o Hidrogeles, que empezaron a ser conocidos, durante los 70's, época en que se redactaba la Norma. Los grupos de compatibilidad para el almacenamiento y transporte tienen asimismo severas fallas al considerar compatibles a explosivos primarios con secundarios, y no especificar la diferencia entre altos explosivos y accesorios para voladura, por ejemplo el Nitrato de Amonio es considerado un explosivo, lo mismo que el DNT.

Por esta razón preferimos indicar las diversas categorías que la ONU determinó desde 1978, considerando como sugerencia que la reglamentación nacional, al menos, en su manejo técnico debe ser actualizada.

3.2. RECOMENDACIONES Y ACUERDOS INTERNACIONALES SOBRE EL TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y MANIPULEO DE EXPLOSIVOS

El Comité de expertos de las Naciones Unidas, editó en 1986, la primera versión del *Orange Book*, un trabajo de varios años, que tiene como antecedentes a la lista IMDG (International Maritime Dangerous Goods) preparada por el IMO, desde 1964 y a la Lista de Materiales Riesgosos que edita la ICAO desde 1978, en ella se separan todos los artículos que pueden tener algún riesgo para la vida, la salud, la propiedad y la ecología, se han establecido nueve categorías, el orden no atiende a la peligrosidad. La primera categoría corresponde a los explosivos, la siguiente es la de los gases comprimidos, la tercera a los líquidos inflamables, la categoría 5 incluye a los oxidantes como el Nitrato de Amonio, la 7 a los Radioactivos, la 9 a los Polutantes.

Cada categoría se subdivide en otras tantas subcategorías, atendiendo al tipo de embalaje con que cuente el artículo riesgoso, esta indicación debe ir impresa o etiquetada en los envases que contengan al producto, el transportista podrá así, disgregar la carga de acuerdo a su peligrosidad, asegurarla y darle los cuidados que el "Orange Book" recomienda. Este documento fija también las pruebas y los criterios para hacer la clasificación de materiales peligrosos, y recomienda así mismo, un cuadro de compatibilidades. Un resumen de esta clasificación la anotamos en las líneas siguientes:

Clasificación ONU para productos peligrosos de la Categoría 1 (Explosivos).

- **1.1.-** Materias y objetos que presentan riesgo de explosión en masa (afecta de manera prácticamente instantánea a casi toda la carga). Riesgo: Onda de choque, proyecciones a alta velocidad.
- **1.2.-** Materias y objetos que presentan un riesgo de proyección sin riesgo de explosión en masa. Riesgo: Incendio y detonación progresiva.
- **1.3.-** Materias y objetos que presentan un riesgo de incendio con ligero riesgo de efectos de llama o de proyección, o de ambos efectos pero sin riesgo de explosión en masa, cuya combustión da lugar a una radiación térmica considerable, o que arden unos a continuación de otros con efectos mínimos de llama o de proyección, o de ambos efectos.
- **1.4.-** Materias y objetos que solo presentan un pequeño riesgo de explosión en caso de ignición o cebado durante el transporte. Los efectos se limitarían esencialmente a los bultos y normalmente no dan lugar a la proyección de fragmentos de tamaño apreciable ni a grandes distancias. Un incendio exterior no debe implicar la explosión prácticamente instantánea de la casi totalidad del contenido de los bultos.
- **1.5.-** Materias muy poco sensibles que presentan un riesgo de explosión en masa, con una sensibilidad tal que en condiciones normales de transporte existe muy poca probabilidad de iniciación o de que una combustión se transforme en detonación. Se exige como mínimo que no exploten cuando se les someta al ensayo de resistencia al fuego exterior.
- **1.6.-** Objetos extremadamente poco sensibles que no supongan riesgo de explosión en masa. Dichos objetos no contendrán más que materias detonantes poco sensibles y que presenten una probabilidad despreciable de propagación accidental. *El riesgo vinculado a los objetos de la división 1.6 queda limitado a la explosión de un objeto único.*

Define igualmente, 13 grupos de compatibilidad definidos por letras " A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, S " , a los efectos de transportes conjuntos en función de diversos dispositivos de seguridad eficaces.

- A.** Materia explosiva primaria.
- B.** Objeto que contenga una materia explosiva primaria y que tenga menos de dos dispositivos de seguridad eficaces.
- C.** Materia explosiva propulsora u otra materia explosiva deflagrante u objeto que contenga tal materia explosiva.
- D.** Materia explosiva secundaria detonante o pólvora negra u objeto que contenga una materia explosiva secundaria detonante, en cualquier caso sin medios de iniciación ni carga propulsora, u objeto que contenga una materia explosiva primaria y que tenga al menos dos dispositivos de seguridad eficaces.
- E.** Objeto que contenga materia explosiva secundaria detonante, sin medios de iniciación, con carga propulsora (excepto las cargas que contengan un líquido o gel inflamable o líquidos hipergólicos).
- F.** Objeto que contenga una masa explosiva secundaria detonante, sin medios de iniciación, con carga propulsora (excepto las cargas que contengan un líquido o gel inflamable o líquidos hipergólicos) o sin carga propulsora.
- G.** Composición pirotécnica u objeto que contenga una composición pirotécnica, o bien objeto que contenga a la vez una materia explosiva y una composición iluminante, incendiaria, lacrimógena o fumígena (excepto los objetos activados por el agua o que contengan fósforo blanco, fósforos, materias pirotécnicas, líquido o gel inflamable o líquidos hipergólicos).
- H.** Objeto que contenga una materia explosiva y además, fósforo blanco.
- J.** Objeto que contenga una materia explosiva y además líquido o gel inflamable.
- K.** Objeto que contenga materia explosiva y además un agente químico tóxico.
- L.** Materia explosiva y objeto que contenga una materia explosiva y que representa un riesgo particular (hidroactividad por ejemplo) y que exija el aislamiento de cada tipo.
- N.** Objetos que no contengan mas que materias detonantes extremadamente poco sensibles.
- S.** Materia u objeto embalado o concebido de forma que todo efecto peligroso debido a su funcionamiento accidental quede circunscrito al embalaje, a menos que este haya sido deteriorado por el fuego, en cuyo caso todos los efectos de la onda expansiva o de las proyecciones deben ser lo suficientemente reducidas como para no entorpecer ni impedir la lucha contra incendios ni la adopción de otras medidas de emergencia en las inmediaciones de los bultos.

Fig. 3.1 DIVERSAS ETIQUETAS DE PELIGROSIDAD SEGÚN LA ONU



Las naranjas corresponden a los materiales explosivos

Fuente: Manual IATA Ed. 2001

Las marcas, marbetes o etiquetas que deberán ir adheridas a los embalajes exteriores del producto se describen a continuación:

ETIQUETAS DE PELIGRO

Etiqueta N° 1.1: Negro sobre fondo naranja; Bomba que hace explosión y, en la mitad inferior, número de división y letra del grupo de compatibilidad correspondiente; una cifra 1 pequeña en el vértice inferior.

Etiqueta N° 1.2 Negro sobre fondo naranja; Número de división **1.2** Ocupa la mayor parte de la mitad superior; en la mitad inferior la letra del grupo de compatibilidad que corresponda; cifra 1, en pequeño en el vértice inferior.

Etiqueta 1.3: Negro sobre fondo naranja; Número de división **1.3** Ocupa la mayor parte de la mitad superior; en la mitad inferior la letra del grupo de compatibilidad que corresponda; cifra 1, en pequeño en el vértice inferior.

Etiqueta N° 1.4: Negro sobre fondo naranja; Número de división **1.4**. Ocupa la mayor parte de la mitad superior; en la mitad inferior la letra del grupo de compatibilidad que corresponda; cifra 1, en pequeño en el vértice inferior.

Etiqueta N° 1.5: Negro sobre fondo naranja: Número de división **1.5**. Ocupa la mayor parte de la mitad superior; la letra correspondiente al grupo de compatibilidad, en la mitad inferior; la cifra 1 en pequeño en el vértice inferior.

Etiqueta N° 1.6: Negro sobre fondo naranja: Numero de división **1.6**. Ocupa la mayor parte de la mitad superior, la letra correspondiente al grupo de compatibilidad, en la mitad inferior, la cifra 1 en pequeño en el vértice inferior.

En el Apéndice 2 se describe el Cuadro de Compatibilidad aprobado por la ONU, este cuadro permite definir qué productos de diverso grupo, pueden ser transportados, almacenados o manipulados en forma conjunta.

IV. LOS EXPLOSIVOS BINARIOS

4.1 LOS EXPLOSIVOS PREPARADOS EN LA ZONA DE OPERACIONES

Los Agentes Explosivos, son calificados por la ONU. como explosivos del tipo 1.5D, los cuales evidentemente tienen un menor riesgo que cualquier otro, su transporte requiere de menores requisitos y su manipulación es muy segura. Los principales explosivos que se preparan en la misma zona de operaciones son: el ANFO y el Heavy ANFO . Cuando la zona y el clima lo permiten, el ANFO es preparado al aire libre, en un equipo muy parecido a un mezclador de concreto, en otras operaciones, se cuenta con un equipo de bombeo que hace el mezclado, y puede así mismo cargar cada taladro o barreno con el ANFO ya preparado. Se debe usar otro equipo para mezclar el ANFO ya preparado con la llamada emulsión matriz, y conformar el HANFO. Era cuestión de esperar unos cuantos años a que aparecieran los sistemas móviles que integraran estas

funciones en una sola unidad.

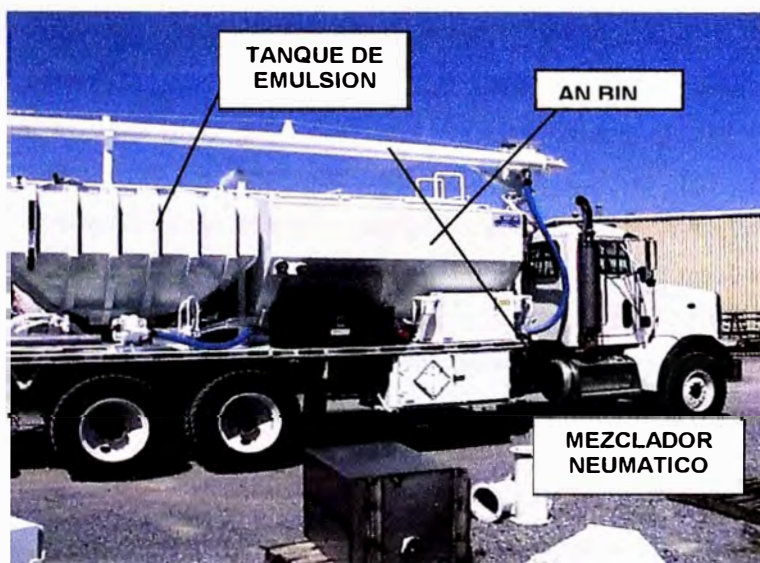


Fig. 4.1 Camión Mezclador (Blend Truck TRADESTAR)

El Camión Mezclador (Blend Truck), convirtió el mezclado del AN o del ANFO con las emulsiones en una tarea sencilla. Desarrollados a partir de 1957, los camiones mezcladores actuales (Fig.4.1), constan esencialmente de una tolva especialmente diseñada para evitar el rompimiento de los gránulos de Nitrato de Amonio, un tanque para el

almacenamiento de emulsiones y un pequeño tanque adicional para depositar diesel 2, eventualmente pueden llevar otros tanques de diverso tamaño, donde se podrá almacenar aluminio en polvo, microesferas u otro componente de la mezcla que quiera cargarse en los taladros. Los Blend Truck son capaces de preparar ANFO, Heavy ANFO o cualquier otra mezcla Emulsión – Nitrato de Amonio que se desee confeccionar, pueden bombear estas mezclas al fondo de los taladros, o incluso extraer el agua del fondo de ellos. Los camiones cuentan con bombas del tipo de desplazamiento positivo Bowie, estas pueden comunicar cantidad de movimiento sin ocasionar grandes



Fig. 4.2 Tablero de controles de un blend truck

turbulencias en el fluido; e incluso poder bombear el material preparado a un tanque elevado para su almacenamiento.

En la actualidad, los camiones mezcladores pueden contar con un sistema de mezclado monitoreado por una computadora, y permite en la mayoría de los modelos, definir hasta treinta tipos de mezclas, sus propiedades reológicas, y las características de bombeo para

cada etapa del barrenado. Es evidente que todas estas acciones requieren de un tablero de control más o menos complejo, como el que puede observarse en la Fig. 4.2. Los Camiones de este tipo son muy utilizados en las operaciones a tajo abierto que consumen un promedio de 100 TM ó 150 TM de explosivos diariamente. Las operaciones de minería subterránea, cuentan con equipos de mezclado que no son tan sofisticados como los camiones mezcladores, pero que en esencia hacen lo mismo, esto es mezclan prills de Nitrato de Amonio, con combustible o con emulsiones, están basados por lo general en un equipo de bombeo, constituido por un depósito, una conexión a un equipo de aire comprimido y una tobera conectada al final de la tubería que “sopla” los prills de Nitrato, al fondo del barrenado.

El problema mayor con los explosivos del tipo mezcla en operaciones, es la sensibilidad del producto final, por ejemplo una mezcla Nitrato de Amonio – Emulsión no es efectiva en taladros de menos de 1 ½”, incluso Emulsiones Encartuchadas, tienen dificultades en hoyos con diámetro inferior a una pulgada, por esta razón se utilizan sensibilizadores como el aluminio molido o las microburbujas.

La posibilidad de utilizar **explosivos binarios** en este tipo de camiones es por ello, totalmente factible, uno de los tanques puede ser utilizado para uno de los componentes y en otro se puede depositar el segundo componente, quedando igualmente habilitados para poder agregar sensibilizadores, o modificar alguna de las propiedades, por la inclusión de un modificador de la tensión superficial, de la viscosidad o la densidad.

4.2. LOS EXPLOSIVOS BINARIOS: Su Operación

Dos envases pre-empacados, que contienen separadamente ingredientes químicos (por lo general oxidantes sólidos finamente pulverizados, y mezclas líquidas inflamables, o similares), se mezclan para obtener un tipo de explosivo para voladura que se conoce comúnmente como Explosivo Binario. Hasta el momento de su combinación ambos ingredientes no son considerados como materiales explosivos, es más, algunos de ellos, no se consideran siquiera como material riesgoso, y por lo tanto no figuran en la lista IMDG. Con ello se obvian los requisitos con que debería contar un vehículo para su traslado, y también las normas a cumplir para su almacenamiento, desde que ambos empaques, por separado no son sensibles a la iniciación por chispa, fricción o flama, pueden ser manipulados por cualquier artefacto eléctrico, acercarse a cualquier equipo de radiofrecuencia, o ser golpeados en su transporte. No requerirán igualmente custodia especial alguna, para su traslado y almacenamiento.

Sin embargo, los explosivos binarios no son utilizados extensivamente salvo en USA, mientras que en otros países como el nuestro, no son siquiera conocidos. Su empleo está orientado para el pequeño minero o constructor civil que tiene necesidades eventuales de utilizar el poder de los explosivos para romper un frente, demoler un edificio, o iniciar cantidades limitadas de agentes de voladura. El aspecto del pre-empaque es quizás uno de sus principales limitantes, y por dicha razón no se le compara con el ANFO, sin embargo su uso se ha hecho muy popular, entre los contratistas civiles independientes, los ingenieros de carreteras y los encargados del trazado de encausamiento de ríos y tendido de líneas de postes, debido principalmente a que no requieren de un almacén, (denominado polvorín) para su depósito, el que en caso de usar explosivos del tipo normal, debería de cumplir con una serie de normas que encarecen la operación a niveles importantes.

A pesar que los textos consideran que la potencia de los explosivos binarios es inferior a la dinamita semi – gelatinosa de 60%, estos se han probado con éxito en la voladura de rocas, zanjeos, voladuras secundarias (desquinche como llamamos en Perú) y como excelentes boosters para el arranque de ANFO u otros explosivos no sensibles al fulminante. Comparados con la Dinamita, estos materiales, desarrollan igual trabajo, y no causan dolores de cabeza, además que su producción de humos es menor. En la Fig. 4.3 se describen las principales características de los explosivos binarios que se comercializan en la actualidad, en los EE UU. Su resistencia al agua es alta mientras se hallen en el pre-empaque, pero disminuye sensiblemente si son expuestos sin envoltura,

esta situación se puede evitar si el agujero se cubre con una manga plástica, práctica que se va haciendo estándar, dentro de las operaciones mineras.

Fig. 4.3: PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS BINARIOS

PROPIEDADES TÍPICAS DE LOS PRODUCTOS EXPLOSIVOS BINARIOS		
Densidad	1.20 g/cc	
Velocidad de Detonación	18000 a 20000 fps (5500 – 6100 m/s)	
Clase de Humos	IME Clase 1	
Sensibilidad	Sensible al Fulminante No. 8 o Cordón de 5 g/m	
Resistencia al Agua	Excelente dentro del cartucho plástico.	
Tamaños Disponibles	- Cartuchos Plásticos Resistentes al Agua	
	1/3 lb.	1 ¼" x 7"
	½ lb.	1 7/8" x 5 ½"
	½ lb.	1 3/8" x 8"
	1 lb.	2" x 9"
	1 lb.	2 ½" x 5"
	1 ½ lb.	2" x 12"
	- Sacas	
	1 ½ lb.	1 ½" x 4 ½" x 5"
	3 lb.	1 ½" x 4 ½" x 11"
	10 lb.	2" x 10" x 12"

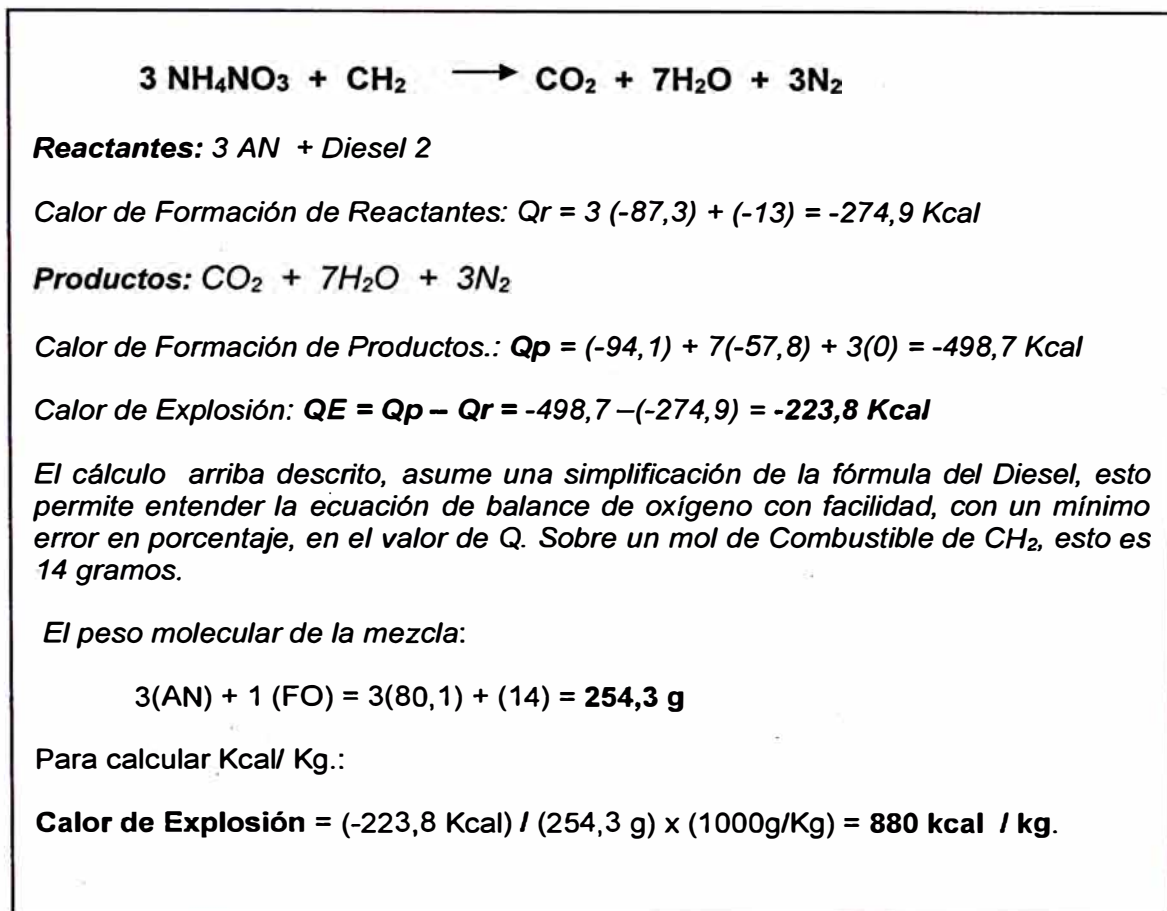
4.3. FABRICACIÓN DE EXPLOSIVOS BINARIOS

En teoría, el ANFO es un binario, lo mismo que la mezcla Emulsión – ANFO, en base a estos compuestos es que se han desarrollado las diversas tecnologías para la preparación de explosivos binarios: dos componentes, un combustible y un oxidante, cantidades de energía teórica altas.

Si siguiendo con el ejemplo, la ecuación de la reacción del ANFO origina 880 cal/g. (Fig. 4.4), (Tomado de Melvin Cook, *The Science of High Explosives*, 1958, en el

apéndice 8.4 se hace un análisis detallado) por ello, la mayor parte de las mezclas binarias han devenido del estudio de reacciones entre materiales combustibles alternativos, y reactivos oxidantes, que tengan calores de formación bajos, considerando que los productos de la reacción sean gases cuya suma de calores de formación sea alta, y ocurra así una reacción exotérmica con una gran cantidad de energía.

Fig. 4.4 Calculo Simplificado del Calor de explosión para el ANFO



Fuente: Melvin Cook- The Science of High Explosives, 1958

Para nuestro trabajo hemos considerado cuatro estudios realizados en Norteamérica, tres de ellos son patentes americanas y el cuarto es canadiense. Todos ellos utilizan embalajes especiales para el manejo de los dos productos a mezclar, el primero utiliza calefacción para lograr el mezclado ideal, los otros tres se pueden mezclar a temperatura ambiente, dos de ellos han servido de base para la producción de materiales que se comercializan actualmente, el basado en polvo de aluminio, tiene a nuestro entender grandes posibilidades que serán estudiadas a posteriori.

La idea de la presentación de estos estudios, es tratar de seguir una secuencia del desarrollo de los explosivos binarios, desde las primeras mezclas destinadas a mejorar el desempeño del Nitrato de Amonio, agregándole dos o más tipos de sensitizadores; hasta las más sofisticadas destinadas a reemplazar el uso de cebos y dinamitas de manera más segura y eficiente.

4.3.1. MEZCLA NITRATO DE AMONIO/ SULFATO DE CALCIO SENSIBILIZADO

La Union Oil Company of California, presentó en 1976 una alternativa a los prills de nitrato, para la fabricación de ANFO, ya que la única forma de sensitizar a la mezcla de combustible y nitrato, era agregar a la mezcla cantidades discretas de aluminio granulado o en hojuelas, carbón molido u otro producto carbonoso, y estas eran imposibles de solubilizar en el combustible, la mezcla se hacía "en seco", mezclando los gránulos de Nitrato con el 0,5% a 1,0 % en peso del modificador, esta operación lamentablemente maltrataba a los prills, produciéndose la indeseable rotura de algunos y su posterior humedecimiento e inactivación, en 1976, cuando se presentó por primera vez este método, los prills no eran lo suficientemente porosos y su absorción de petróleo solía ser defectuosa, por dicha razón el método proponía fabricar las partículas en el lugar de operaciones.

Existe entre los sensitizadores del Nitrato una sal de calcio, muy barata y muy reactiva a temperaturas moderadas, mayores a la ambiental: el yeso. El Sulfato de Calcio Dihidratado, mezclado con Nitrato de Amonio de grado fertilizante, calentado a 300°F en un medio adecuado, que puede ser un líquido como aceite o también al aire, reacciona formando un complejo cristalino en la superficie de las partículas del Nitrato, si a esta mezcla se le agregan otros sensitizadores, como metales en polvo o sustancias carbonosas, que a esta temperatura no participan en la reacción, estos productos son capturados y retenidos dentro de las capas cristalinas que se van formando, el resultado es un prill mejorado de nitrato, que ya está sensibilizado interiormente y que además, tiene una cobertura porosa, debido a que el cristal de sulfato de calcio a esa temperatura, tiene una apariencia esponjosa.

Para conseguir que la reacción sea adecuada, se debe contar con un porcentaje de agua libre que no exceda al 15% en peso de la suma de los pesos del nitrato de amonio y sulfato de calcio, el contenido óptimo de agua se calcula de manera empírica, dado que el sulfato ya contiene agua en su estructura molecular (casi un 21%), y que el nitrato de amonio arrastra por higroscopicidad de un 3% a 5%. La falta de agua dará como resultado un exceso de polvo, la interrupción de la reacción y la creación de

partículas no uniformes, fragmentadas e inestables; por el contrario un exceso de agua originará un aspecto aglomerado en la masa, que podría disolver una parte del Nitrato de Amonio.

El Sulfato de Calcio deberá hallarse finamente dividido, puede ser hemidrato (selenita) o dihidrato (yeso), el producto no participa en la detonación, su presencia solo debe asegurar una adecuada cobertura y distribución de los sensitizadores y adicionales modificadores que se necesiten.

El proceso de fabricación de los productos es una simple mezcla en un recipiente que contenga paletas mezcladoras de baja velocidad, y pueda ser calentado entre 260°C y 425°C (500°F y 800 °F), la mezcla estará constituida por 80% de Nitrato de Amonio grado fertilizante, 12% de Sulfato de Calcio Dihidratado, 3.5% de agua libre y 4.5% de nitrocelulosa, los materiales son mezclados a una velocidad de 30 r.p.m., y el recipiente se calienta hasta 230°F, con un velocidad de 3°F por minuto. La reacción entre el Sulfato de Calcio y el Nitrato de Amonio ocurre aproximadamente a 220°F, la reacción al ser endotérmica, indica que se ha completado, cuando la temperatura se reduce violentamente.

El material así obtenido, puede cribarse para remover los finos de Sulfato de calcio que no hubiese reaccionado y puede almacenarse en cartuchos rígidos de polietileno o PVC, o también en bolsas de polipropileno, una vez se halla enfriado. Este es el componente oxidante, que puede transportarse como nitrato de amonio de grado fertilizante, la nitrocelulosa que se halla al interior de las partículas, no ejerce ningún efecto explosivo sobre el producto, el cual será clasificado como UN 2077 Tipo 5.1 Nitrato de Amonio. El combustible puede ser cualquier diesel, residuos de aceite de motor (aceite quemado), aceite vegetal rancio, residuos del destilado de asfalto o similares.

4.3.2. MEZCLA OXIDANTE EN FASE LIQUIDA / MEZCLA COMBUSTIBLE DE ALUMINIO GRANULADO

Las posibilidades de utilizar a los metales en polvo como constituyentes de explosivos, es una idea relativamente antigua, metales como el Silicio, el Circonio, Zinc, Magnesio y Aluminio, son excelentes productores de energía, desde que su forma más estable es en forma de óxidos, la conversión violenta del metal a este estado, tiene un alto calor de formación, originando reacciones exotérmicas muy importantes. Otro

aspecto muy estudiado en el comportamiento de estos productos metálicos, es la química de las partículas: no tiene el mismo comportamiento un metal reducido a tamaño pigmento (con diámetros menores que 1 ó 2 micras) que el mismo material a valores de granulo (0,05 mm a 0,5 mm), temas como la superficie activa y la química de los catalizadores tienen mucha importancia aquí, bastará mencionar que el ANFO activado por aluminio en flakes (hojuelas o láminas muy delgadas con alta superficie activa), consigue velocidades de detonación mayores en un 15%. Otra demostración del poder explosivo que se puede lograr a partir del aluminio granulado, es combustionando violentamente materiales porosos de aluminio impregnados con oxígeno líquido, por ejemplo embebiendo oxígeno licuado en polvo de aluminio; con un iniciador como el magnesio, se inflama la carga, transformándose rapidísimamente en Al_2O_3 , produciendo un gran desprendimiento de calor. Por kilogramo de mezcla explosiva ($Al + 1,5 O_2$) se liberan 3865 Kcal., mientras el kilogramo de nitroglicerina pura sólo da 1.600 Kcal.

El método propuesto, para fabricar explosivos binarios a partir de aluminio granulado y una solución oxidante líquida, tiene probablemente más empleos como producto bélico que como material para voladura en minas. Cabe mencionar que tanto el aluminio granulado, como la mezcla oxidante que puede estar constituida de nitratos, percloratos o sulfatos de metales alcalinos o alcalino-térreos, o también de compuestos derivados de las nitroparafinas, pueden ser transportados y almacenados como cualquier carga, no teniendo que cumplir ningún requerimiento especial. Si el aluminio fuese manejado a nivel de grado pigmento, entonces se le considerará de la clase 3: Sólidos inflamables, mientras en el caso de las sales, éstas están dentro de la Clase 5.1: Oxidantes, por su parte las nitroparafinas, se hallan catalogadas como líquidos inflamables, por escasos $4^{\circ}C$ (la norma considera inflamables a aquellos productos con un punto de inflamación por debajo de los $84^{\circ}C$).

Para la mezcla sólida, se preferirá el tipo de partículas de aluminio, que provengan de hojas de aluminio, aluminio laminado o similares, pues se ha evidenciado que el material muy delgado en una dirección es más reactivo al momento de la detonación, que los esferoidales y otros del tipo poroso cuya área superficial por volumen está en $100 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2$, mientras los tipo hojuela (flakes) pueden estar por los $5000 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2$. Si no se pudiera obtener este tipo de material, se recomienda que las partículas de aluminio estén recubiertas por algún material hidrofóbico, como los organosilanos que comercializan compañías como Degussa Co. (el octiltrietoxisilano se vende bajo la denominación Silano 208), en proporciones menores al 0,5% en peso.

Existen dos tipos diferentes de líquidos oxidantes que pueden utilizarse para la preparación de la fase líquida, el primero es una solución acuosa de sales de perclorato o nitrato de metales alcalinos, alcalino-térreos o de amonio, el segundo es una mezcla de nitroparafinas, esta última también es usada en otra formulación, que se describirá en 4.3.3. Los profesores de la Universidad de Salt Lake City que fueron los primeros en diseñar este tipo de explosivo binario, recomiendan utilizar una solución de sales inorgánicas, a la que se le haya añadido un depresor del punto de congelación, que sea totalmente miscible en la solución acuosa, el producto elegido para este papel es el etilenglicol, así, la mezcla podrá seguir siendo líquida a las bajas temperaturas de operación que puedan existir, y a la vez incrementará la sensibilidad de la mezcla.

Para promover un mezclado óptimo del explosivo binario, es preciso que la parte líquida tenga una viscosidad más bien baja, en tanto que lo que se busca es que exista un flujo fácil del líquido a través de la fase sólida, un valor práctico para la viscosidad de la fase líquida es 100 centipoises a 20°C. La solución de perclorato de sodio y etilenglicol, tiene 28 centipoises.

Se han ensayado varios tipos de aluminio para la preparación de la fase sólida, los más óptimos se detallan en la Fig. 4.5, estableciendo sus valores de granulometría

En el cuadro (Fig. 4.6) se muestran las mezclas con mejor desenvolvimiento, las más recomendadas son las manufacturadas en base a una solución de Perclorato (Mezclas 1, 2, 3), que tienen posibilidad de utilizarse hasta en taladros de 1,5", siempre que se le agreguen microburbujas de vidrio o plástico (3M las comercializa bajo la denominación Glass Bubbles K1). Se obtienen Valores de Energía más altos, si la solución oxidante se hace en base a una mezcla de Nitrato de Amonio y Nitrato de Calcio, la condición es sustituir el etilenglicol y el agua por metanol, (Lo crea alguna dificultad en el transporte), si se trabaja con agua y etilenglicol, la mezcla binaria explosiva resultante no se inicia en taladros menores a 2.5 pulgadas. Similarmente cuando se utilizan nitroparafinas como fase líquida, usando solo nitrometano, se tienen problemas de inflamabilidad, si se mezcla con nitroetano para que sea menos sensible al fuego, el diámetro crítico disminuye a 2,25 pulgadas, al bajar la potencia.

Como definen los propios investigadores de este explosivo binario, el definir la fórmula adecuada es una situación que queda al ingeniero diseñador de voladuras. Sin embargo es necesaria una evaluación económica, para determinar cuáles serán las composiciones que permitan una presencia importante en el mercado, debe anotarse

también que el diseño de los envases, para cada fase, será igualmente pieza clave en su evaluación.

Fig. 4.5 DIVERSOS TIPOS DE ALUMINIO UTILIZADO PARA LA FASE SÓLIDA

PROPIEDAD	Reynolds HPS-10 ⁽¹⁾	Alcan F-10	U.S. Granules 2095
Densidad Bulk (g/cc)	0,46	0,30	0,47
Densidad de la Mezcla (g/cc) ⁽²⁾	1,40	1,50	1,59
% de Aluminio en la Mezcla	33	20	30
% de Espacio Vacío en Mix	22	11	10
Granulometría (Tamaño Tamiz)			
- Malla 10 (%)	100	99,6	100
+ Malla 20 (%)	39,5	35,6	0,2
+ Malla 30 (%)	68	--	7,8
+ Malla 50 (%)	93,6	--	59,3
+ Malla 60 (%)	--	93,6	--
+ Malla 100 (%)	98,9	98,6	89,0
+ Malla 140 (%)	99,6	--	--
+ Malla 200 (%)	--	99,8	98,6
- Malla 200 (%)	0,5	0,2	1,4

(1) Cubierto con organosilanos. Reynolds Alcan y US Granules son fabricantes de aluminio

(2) La fase líquida de la mezcla está constituida por una solución de: 52,7% en peso de Perclorato de Sodio, 34% de agua y 13,3 % de Etilenglicol

Fuente: Elaboración Propia

Fig. 4.6 DIFERENTES PROPUESTAS PARA LA MEZCLA BINARIA DE ALUMINIO COMO COMBUSTIBLE

	MEZCLAS ENSAYADAS						
% en la mezcla	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
FASE SOLIDA	36,0	43,0	45,0	33,0	31,6	50,0	51,0
Aluminio HPS -10	33,5		30,0	31,9	31,6	50,0	51,0
Microburbujas	1,7	2,0	3,0	1,1			
Aluminio US Granules	--	40,0					
Aluminio Atomizado	--		12,0				
Etilenglicol	0,8	1,0					
FASE LIQUIDA	64,0	57,0	55,0	67,0	68,4	50,0	49,5
Perclorato de Sodio	35,6	30,8	26,8				
Agua	20,4	17,7	21,2		10,3		
Etilenglicol	8,0	8,5	7,0		6,8		
Metanol	--			20,1			
Nitrato de Amonio	--			6,7	20,5		
Nitrato de Calcio	--			40,2	30,8		
Nitrometano	--					50,0	24,5
Nitroetano	--						24,5
PROPIEDADES							
Densidad de mezcla	1,38	1,41	0,65	1,25	1,51	1,58	1,55
V.O.D. (m/s)	3330	3130	2970	3180	3130	3200	3060
Diámetro Crítico (pulgadas)	1,5	2,0	1,5	2,5	2,75	1,5	2,0
Presión detonación(kbares)	37,5	34,5	14,3	31,6	36,9	40,5	36,3

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3. MEZCLA LIQUIDA DE NITROPARAFINAS / MEZCLA OXIDANTE GRANULADA EN BASE A NITRATOS

Cuando se discutían los diversos elementos que podían componer la fase líquida del anterior explosivo binario, se mencionó la sensibilidad de las nitroparafinas, de ellas, las más interesantes son el nitrometano y el nitroetano; este tipo de materiales están considerados más como un solvente que como un explosivo. Es muy utilizado en los modelos a escala de explosiones, en la llamada carga nuclear, y como un estimulador de la potencia de combustibles para aeromodelismo o motores de automóviles de ensayo.

El nitrometano se obtiene por nitración del gas metano por ácido nítrico en fase vapor a 400 °C, es líquido a temperatura ambiente, hierve a 102 °C y tiene un punto de inflamación de 36°C, desde mediados del siglo pasado, es estudiado por diversos investigadores. Es inestable en presencia de sodio y aminas, por ejemplo, mezclado con etilendiamina al 5% en volumen, forma el denominado PLX (Picatiny Liquid Explosive) que se usa para el desminado de zonas cubiertas por estos artefactos anti – personales. La ONU cataloga al Nitrometano como Líquido Inflamable Clase 3, ello supone que el material deberá transportarse con ciertas regulaciones, a partir de un accidente en los 60's, donde se inflamaron 60000 litros, el material ya no se despacha en tanques.

El explosivo binario que se propone, tendrá como principal componente líquido a este compuesto orgánico que contiene un potencial energético alto, y sin embargo no es sensible al fulminante No. 6, para mezclarlo con un sólido, poroso, absorbente y que sea insoluble en el nitrometano, escogido entre las sales nitradas de los metales alcalinos y alcalino-térreos, o entre los percloratos de estos metales o del radical amonio. Como carga de la fase sólida se propone la utilización de tierra diatomácea o arena silícea expandida. Se preferirá que las partículas sólidas tengan un tamaño uniforme de cerca de 500 micras, que les permita arrastrar a su alrededor una capa de aire, la que limitará la fase líquida en los intersticios vacíos, si las partículas son sinterizadas el mezclado mejorará visiblemente. Si se consiguen todas estas características, el mezclado no requerirá de agitación mecánica, lográndose una mezcla homogénea por la acción capilar que ejercerán las partículas finamente divididas. La mezcla no se separará ni estratificará, por lo que no requiere agentes gelificadores o que confieran acción tixotrópica a la mezcla.

Para la fase líquida, las mejores mezclas son aquellas que contienen un 95% en peso de Nitrometano y un 5% de Xilol, en lugar de éste último, que es caro, se utilizará el nitrometano y un pariente aromático suyo, el Dinitrotolueno, una porción de cualquier hidrocarburo aromático o alifático combustible, también será bien recibida, pues lo importante de agregar elementos combustibles es equilibrar la deficiencia de oxígeno que los compuestos oxidantes traen. Lo que se tratará de evitar en todo caso es el líquido exceda el volumen intersticial entre las partículas sólidas, en estos casos una porción pequeña de gasolina hace menor la proporción de líquido agregado. Esta mezcla líquida, deberá poder ser transportado en botellas, cilindros o bolsas de polietileno/polipropileno.

La fase sólida granulada, es la oxidante y podrá ser transportada y almacenada convenientemente en envases flexibles o rígidos de plástico, papel o cartón; su primera función es proveer una base porosa que permita que el líquido se disperse a su alrededor por capilaridad, haciendo que la mezcla sea una íntima combinación de líquido, sólido finamente dividido y aire. La segunda función es proveer energía adicional a través de la reacción de los grupos oxidantes con el exceso de combustible que el líquido provee, los gases que el quemado del combustible produzca, serán también agotados por los grupos oxidantes, en una segunda etapa de la reacción. Los sólidos que dan mejores resultados son las partículas finamente divididas (> Malla 250) de nitrato de amonio, nitrato de potasio y de sodio, los que han sido tratados para aumentar su densidad Bulk. Las mejores proporciones entre la fase sólida y la fase líquida, expresadas como % en peso, son:

- Fase Sólida: Nitrato de Amonio (- Malla 250) (Densidad bulk 1.4 g/cc) 72.5 %
- Fase Líquida: (Nitrometano 95% Xilol 5% en peso) 27.5 %.

4.3.4. MEZCLA LIQUIDO INFLAMABLE / SOLIDO INSENSIBLE PARA PRODUCIR EXPLOSIVO PLASTICO

Conjuntamente con las nitroparafinas, otro tipo de sustancias, que fueron formuladas para un uso completamente diferente, y que sin embargo tienen un importante papel en la formulación de explosivos binarios, son las hidrazinas, investigadas por la NASA desde 1948 para ser utilizadas como propelentes de los cohetes, la compañía ARC empezó a fabricarlas para estos fines desde 1953, siendo los principales abastecedores del proyecto Titán, y luego desarrollaron sales y derivados orgánicos a partir de la hidrazina base ($\text{NH}_2\text{-NH}_2$), que se utilizan como fungicidas, herbicidas y como desincrustante en el tratamiento de agua para calderos. La Hidrazina o Diamina, hierve a los 113 ° C, su punto de inflamación es 38 ° C, de acuerdo a reportes de la OSHA, fechados en 1996, se le considera como cancerígeno, sin embargo, la ONU la cataloga como Líquido Inflamable Clase 3.

Astrolite fue el primer explosivo binario que utilizó a la hidrazina como base de una formulación para explosivo binario, la fase líquida se mezclaba al 8,5% en peso con la fase sólida, en un contenedor que proporcionaba el proveedor, la parte líquida estaba constituida por una mezcla de 43,48% de hidrazina, 18,26% de Metanol y 38,26 % de una solución acuosa de Nitrato de Amonio al 34% en peso. La parte sólida había sido reducida a polvo, para poder contar con las propiedades de capilaridad al momento del mezclado; estaba constituida por 87% de Nitrato de Amonio, 9% de Perclorato de

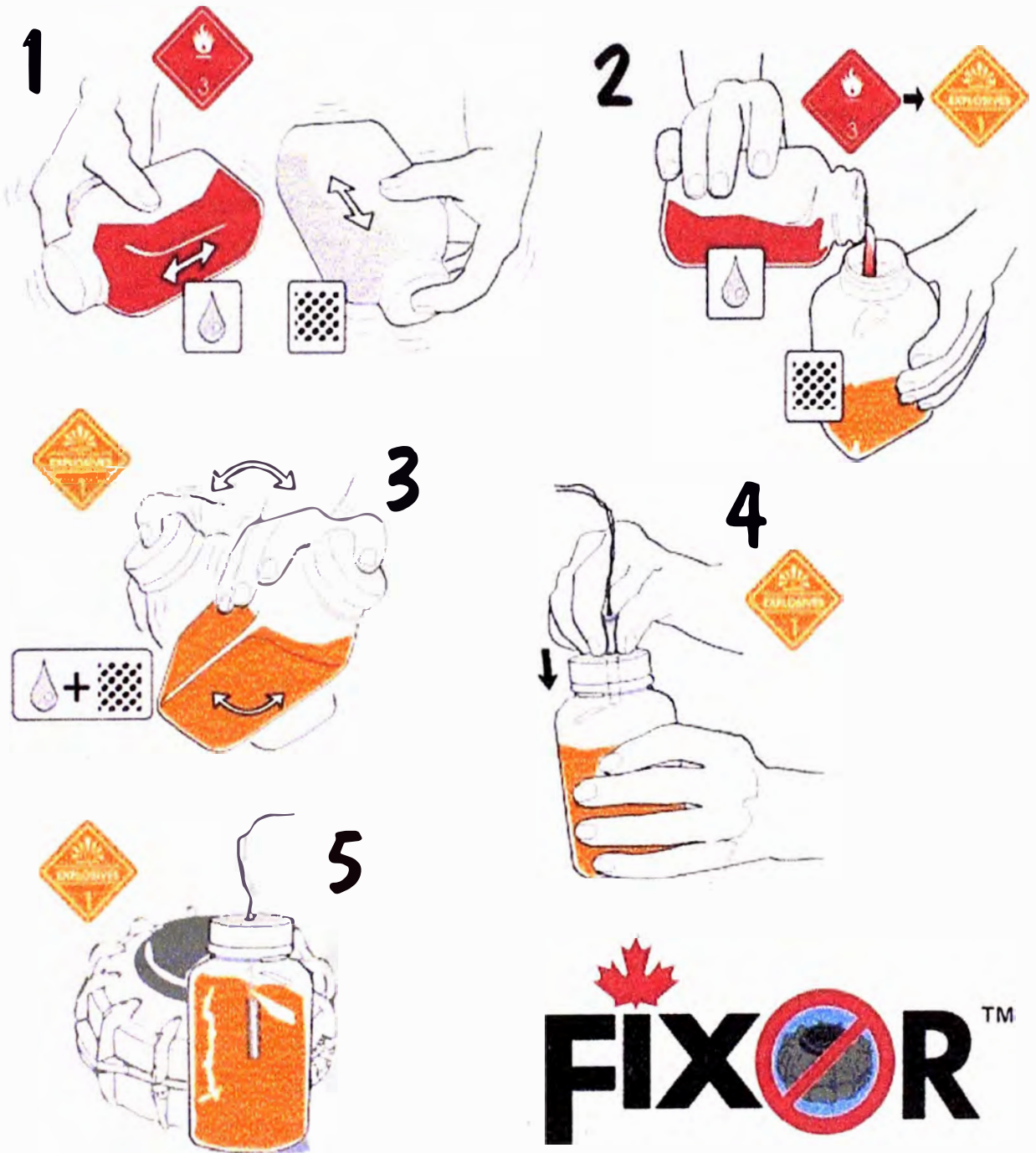
Amonio y el saldo era materia inerte. El explosivo resultante de la mezcla alcanzaba velocidades por encima de los 20000 pies por segundo (unos 6000 m/s). A partir de este primer producto se desarrollaron otros, tendientes a neutralizar la flamabilidad de la hidrazina y el comportamiento higroscópico de la solución sólida.

La muy buena velocidad de detonación de estas mezclas, planteó la posibilidad de utilizar el producto como cebo o boosters de otros compuestos menos sensibles, el desarrollo lo anunció MREL en 1997, quien presentó ante la EOD (Explosives Ordnance Disposal) Canadiense un producto que podía ser utilizado con éxito en la desactivación de minas anti - personales, o como cebo para ANFO, Heavy ANFO y similares. El producto denominado FIXOR fue probado con éxito en Kosovo, y su manipuleo resulta realmente fácil (Ver Fig. 4.7). Constituido por una fase líquida inflamable, y un polvo inerte, puede almacenarse y transportarse sin restricciones, su tiempo de vida es indefinido, hasta que no se mezcle. La coloración del producto indica el buen mezclado, el líquido rojo y el polvo amarillo, se convierten en una sustancia plástica de color naranja que alcanza los 5400 m/s de velocidad de detonación, una vez que es iniciado por un fulminante No.6, o mas comúnmente por un nudo del cordón detonante.

Este tipo de producto, está constituido por un derivado de la hidrazina, podría ser la 1.2 dimetilhidrazina, o la dimetilenhidrazina, el que se mezcla con un combustible liviano, puede ser una gasolina, o metanol, la presencia de los grupos metilo inhibe la formación de gases nitrosos en la combustión de la hidrazina, similarmente reduce la avidéz del grupo amina nitrógeno en el ataque a células humanas, por lo que los fabricantes podrían afirmar que el producto es inocuo para la salud humana.

Finalmente el polvo inerte está constituido por tierra de infusorios, talco, o sílice, productos que contienen en su estructura metales alcalino-térreos (magnesio en el caso del talco, calcio en el caso de la tierra de infusorios) la presencia de estos metales origina el comportamiento hipergólico del producto, esto es, la mezcla puede auto iniciarse, o aumentar su poder energético al ser iniciada por un detonador. Posiblemente se le agreguen agentes oxidantes como nitrato de amonio o aluminio pulverizado, con la finalidad de aumentar la sensibilidad

Fig. 4.7 CINCO ETAPAS PARA EL MEZCLADO DEL EXPLOSIVO FIXOR



Fuente: Folleto Técnico de FIXOR

4.4. ANALISIS DE LAS TECNICAS DE FABRICACION DESCRITAS

Haciendo un rápido repaso de las técnicas aquí presentadas, se puede concluir que salvo la primera, todas incluyen una operación de mezclado muy sencilla, basada en la acción capilar que ejercen las partículas muy finamente disgregadas. La primera de las mezclas presentadas tiene una dificultad de uso, que parece casi insalvable: la operación de mezclado es sumamente complicada, requiere de calentamiento, los finos deben ser tamizados, la mezcla debe hacerse a 110 °C, y todo ello debe realizarse en el lugar de las operaciones, es verdad que como lo indicáramos, los camiones mezcladores son cada vez más sofisticados, y la dificultad del mezclado podría ser resuelta por ellos, pero es obvio que significará una operación al menos más costosa que las que proporciona el resto. El método fue sugerido a fines de los 70's, época en que la producción de Nitrato no había logrado el grado de perfeccionamiento que ostenta ahora. El explosivo binario sensibilizado por sulfato de calcio, es sin embargo, interesante de evaluar cuando se analiza el precio del nitrato de amonio liviano, especial para voladuras, comparado al del nitrato de amonio grado agrícola, el que puede utilizarse bajo las técnicas sugeridas.

Con la intención de resumir los métodos aquí presentados, se preparó la tabla de la Fig. 4.8, es fácil observar que las mezclas 2, y 4 merecen un estudio mayor, el que proponemos en los dos acápite siguientes. Nos parece interesante comentar que los otros tres métodos, siguen un mecanismo similar para su detonación: los componentes líquidos son absorbidos y dispersados en la matriz porosa sólida por acción capilar, para producir una mezcla en la que esencialmente las partículas sólidas están rodeadas por una capa de líquido, el cual, a su vez está cubierto por una mínima capa de gas, normalmente aire. Cuando un fulminante u otro tipo de iniciador, explota en la mezcla, la altísima presión que genera la detonación, comprime las diminutas burbujas de gas, adiabáticamente, produciendo temperaturas extremadamente altas, que son transferidas al líquido circundante, el cual llega a explotar por calor, y comprime a nuevas burbujas de gas, propagando de esta manera la detonación a través de la mezcla. Si el sólido contiene grupos oxidantes, estos reaccionarán con la mezcla caliente y rica en oxígeno que los circunda, añadiendo más energía a la explosión y generando una mayor cantidad de gases, hasta agotar a toda la mezcla. La cantidad de aire debe hallarse entre el 2% y el 50% en volumen, de la mezcla.

Tanto el método que utiliza la mezcla nitrometano / nitrato de amonio, como el que utiliza derivados de la hidrazina y polvo inerte con presencia de metales alcalino-térreos, se comercializan fundamentalmente como cebos iniciadores de explosivos más insensibles,

Mezcla Tipo	1	2	3	4
Año de Fabricación	1976	1996	1989	1995
Fase Líquida	Combustible del tipo Diesel 2 o Similar, Aceite "quemado"	Perclorato de Sodio 56 % Agua 31% Etilenglicol 13 %	Nitrometano 95% DNT 4% Gasolina 1%	Derivado metílico de la hidrazina y metanol
Composición Porcentual	5,5 a 7 %	64%	27,5%	50%
Fase Sólida	Nitrato de Amonio 80% Sulfato de Calcio 12% Agua 3,5% Nitrocelulosa 4,5%	Aluminio Granulado 92% Microbalones 8%	Nitrato de Amonio Malla 250 Dens. 1.4 g/cc	Talco, Dolomita, Sílice o Perlita expandida, sensitivizador metálico.
Composición Porcentual	94,5 a 93 %	36%	72,5 %	50%
Características del producto mezclado	Sólido en gránulos Apariencia pulverulenta	Densidad 1,38 g/cc VOD 3330 m/s Diámetro crítico 1,5" Insensible al No.8	Densidad 1,25 g/cc VOD 4600 m/s Sensible al No.8 Duración indefinida	Densidad : 1.4 g/cc VOD 6200 m/s Sensible al No. 8 Duración 24 horas
Presentación del Binario	Bolsas por 50 Kgr	Sólido: Bolsas, cartuchos o granel Líquido: Cilindros, bidones o granel	Sólido : Bolsas de polietileno / polipropileno Líquido : Frasco de plástico	Envases plásticos con tapa roscada y preparada para la inserción del fulminante
Orientada a	Mejorar performance y sensibilidad del Nitrato de Amonio Grado Fertilizante	Reemplazar carga principal de voladuras.	Reemplazar Cebos y cargas anti - minas	Reemplazar Cebos y cargas anti - minas
Ventajas	Puede usarse nitrato de menor precio	Estable, Buen desempeño, Sin restricciones en transporte y almacenamiento	Fácil de preparar, estable. Sin restricciones en transporte y almacenamiento	Fácil de preparar, estable. Sin restricciones en transporte y almacenamiento
Desventajas	Difícil de preparar en zona de operaciones. Poco resistente a la humedad	Poco resistente a la humedad.	Poco resistente al agua. Sensible al fuego. La compra del nitrometano es difícil.	Debe ser utilizado en forma inmediata.

Fig.4.8 CUADRO RESUMEN DE DIVERSOS METODOS DE PREPARACION DE EXPLOSIVOS BINARIOS

bajo distintas marcas como Kinepack o Kinestick para los de nitrometano y Fixor para los de derivados de hidrazina. No es tema de este trabajo realizar una monografía sobre alguno de estos explosivos, la intención es demostrar las posibilidades que estos materiales tienen en un mercado que requiere de productos con mayor seguridad, y que también permitan ahorrar costos. El caso de Fixor tiene un componente que lo hace muy atractivo en una época, como la nuestra, en que las posibilidades de manejo ilegal de explosivos son altas, porque los derivados de hidrazina, en presencia de productos alcalinos, tienden a degenerarse en poco tiempo, unas cinco horas en promedio, pasado el cual, el material ya no servirá como explosivo, esto evitaría su uso como material para bombas y otros fines que los grupos terroristas pueden encontrar para los explosivos tradicionales.

La segunda de las técnicas que describimos, nos parece, tiene un potencial realmente alto, la fabricación de polvos metálicos, está restringida en toda Europa, fábricas tan importantes como Chemetal o la Société de Poudres Explosifs, se han trasladado de Francia, Alemania y Suiza, hacia Europa del Este, donde la reglamentación ecológica no es tan drástica como en los países que hoy integran la Comunidad Europea. Las legislaciones estadounidense y japonesa, más flexibles, aún permiten la fabricación de estos productos en zonas que no tengan mayor población, Brasil ha sido el primero de los países sudamericanos que ha ofrecido ciertas ventajas para empresas europeas dedicadas a la manufactura de metales en polvo, esto es una posibilidad muy interesante para las empresas de nuestro país, y particularmente para las empresas de explosivos, quienes obtendrían materias primas, hoy difíciles y caras en su consecución, a condiciones y cantidades más favorables.

Descartando la primera de las técnicas descritas, todas las demás son relativamente sencillas en la manufactura de los productos a comercializar, se debe de contar con un mezclador de productos sólidos, en alguno de los casos un equipo de reducción de tamaño, y un blender para la preparación del producto líquido, las inversiones mayores serán los silos de producto preparado, la unidad de envasado y el almacén de insumos y productos terminados. Consideramos que por el alto costo que significaría importar nitrometano; las opciones más interesantes son la del explosivo binario constituido por polvo de aluminio como base de la fase sólida, y perclorato de sodio o nitrato de amonio como base de la solución acuosa líquida; y en el caso de obtener el derivado de la hidrazina, la fabricación de explosivos del tipo FIXOR

4.4.1. VENTAJAS DE LA MEZCLA PARA PRODUCIR EXPLOSIVO PLASTICO

La fabricación de explosivos binarios del tipo FIXOR, es relativamente sencilla si se cuenta con los componentes de la fase líquida, la fase sólida está compuesta de sílice, talco, o diatomita, cualquiera de estos productos es de fácil adquisición en nuestro país, si se quiere aumentar la sensibilidad, se le agregaría nitrato de amonio o aluminio pulverizado, que no incrementaría mayormente ni el costo ni la dificultad en conseguirlos, los costos son relativamente bajos, una TM de cualquiera de estos productos, se cotiza en aproximadamente 300 US \$.

Su manufactura requiere de un mezclador de sólidos, por la naturaleza del producto este puede ser del tipo extrusora, con la boquilla dispuesta directamente sobre un equipo dispensador, que se halla sobre una báscula, y podría automatizarse así el empaque y despacho del producto, los empaques individuales de 0,5 Kg. se disponen en cajas de 40 unidades cada una, el peso total del empaque master sería de unos 22 kilos, cantidad que es permitida por la ONU para el manejo de cualquier sustancia. Otra presentación podría ser en bolsas transparentes de polietileno, por 25 kilos, la cual va dentro de un saco de polipropileno. El costo de los envases para 0,5 Kg. y las cajas incrementarían el costo en unos a 30 US \$ por tonelada, en el caso de los sacos el costo se incrementaría en unos 15 US\$.

La fase líquida establece ciertas dificultades en su manufactura, si se trabaja directamente con la hidrazina, el producto final, no cubrirá las especificaciones de no toxicidad, adicionalmente su inestabilidad será mayor, así como la sensibilidad al fuego, por esta razón FIXOR utiliza derivados metílicos de la hidracina, los cuales prepara en Ontario, ARC compañía que produce la hidracina como propelente, puede entregar ilimitadas cantidades del derivado que se necesita, sin embargo, su costo US\$ 14 por galón, es excesivo, para conseguir un precio de venta que sea atractivo, (como alternativa al ANFO, por ejemplo), si se consiguiese una mezcla al 40% de este producto, siendo el resto gasolina y metanol, los costos para la fase líquida, serían superiores a los 2000 US \$ por TM, esto es un juego de fase sólida y líquida, equivalente a 1 Kg. de explosivo, tendría un costo aproximado de 1.16 US\$, valor bastante mayor al del ANFO, pero interesante si lo comparamos a los precios de los iniciadores, el precio del binario es equivalente a los costos de materia prima de un booster fundido, o al 80% del costo de insumos de un Kg. de Explosivo Plástico C-4. Productos con los que podría competir con buenas perspectivas, considerando que en el caso de elegir el binario no se contemplarían costos de almacenamiento y transporte especiales.

4.4.2 POSIBILIDADES DE LA MEZCLA ACTIVADA POR ALUMINIO GRANULADO.

Como en los casos anteriores, la manufactura del producto, es relativamente sencilla, los proveedores de las materias primas entregan los materiales con las características que se soliciten, lo que hace elemental el proceso de mezclado, la fase sólida requiere de un silo, y un mezclador de tornillo sin fin, en la salida de este tipo se instala una báscula y un equipo de empaquetado, este equipo sería la parte sofisticada de la operación, al poder empaquetar bolsas tubulares, continuas del producto, en diámetros adecuados para la operación del usuario final: 2 ½", 3", 3 ½" y otras medidas que alcancen demandas importantes. El binario en base a aluminio granulado, no es totalmente sensible al fulminante No. 8, prefiriéndose utilizar boosters de 50 y 100 g para su iniciación, este producto no tiene una utilización como iniciador de cargas insensibles, por ende, la otra presentación para venta con que podría ofrecerse en el mercado, es una bolsa de 50 Kg. o el despacho a granel.

La fase líquida requerirá de un agitador de paletas, un equipo de bombeo, tres silos: uno para el Nitrato de Amonio grado Técnico, otro para el Nitrato de Calcio grado técnico, y un tercero para la solución oxidante preparada, los tres deben ser del tipo tanque elevado. Los dos primeros, estarán conectados al equipo de mezclado por transportadores de tornillo, y el tercero deberá conectarse al sistema de bombeo, que saldrá del tanque de mezclado, de tal manera que el proceso pueda ser completamente automático. El expendio de la fase líquida se hará a partir del tanque de solución oxidante, y podrán utilizarse para su despacho bidones de plástico, cilindros metálicos recubiertos internamente con una capa de material resistente a la oxidación, o tanques de solución a granel, los que estarán premunidos de equipos de bombeo y mangueras de irrigación, con las que hacer el mezclado con la fase sólida granulada.

El área de fabricación para un proceso como el que se plantea, deberá ser lo suficientemente amplia para permitir el flujo de camiones, y la facilidad de las operaciones de mezclado por separado, fase sólida y líquida, en la Fig. 4.9 se boceta un Layout de lo que sería una planta de preparación de los componentes de este explosivo binario. La zona de recepción de materia prima, cuenta con un patio de descarga, previo al lugar en el que se almacenarán los Nitratos, estos serán transportados por un montacargas a la zona de alimentación a silos, donde las bolsas, de preferencia Big Bags, se rasgan y depositan en un tanque del cual parte un transportador de tornillo a su respectivo silo.

Fig. 4.9 LAYOUT DE PLANTA DE FABRICACION DE EXPLOSIVO BINARIO

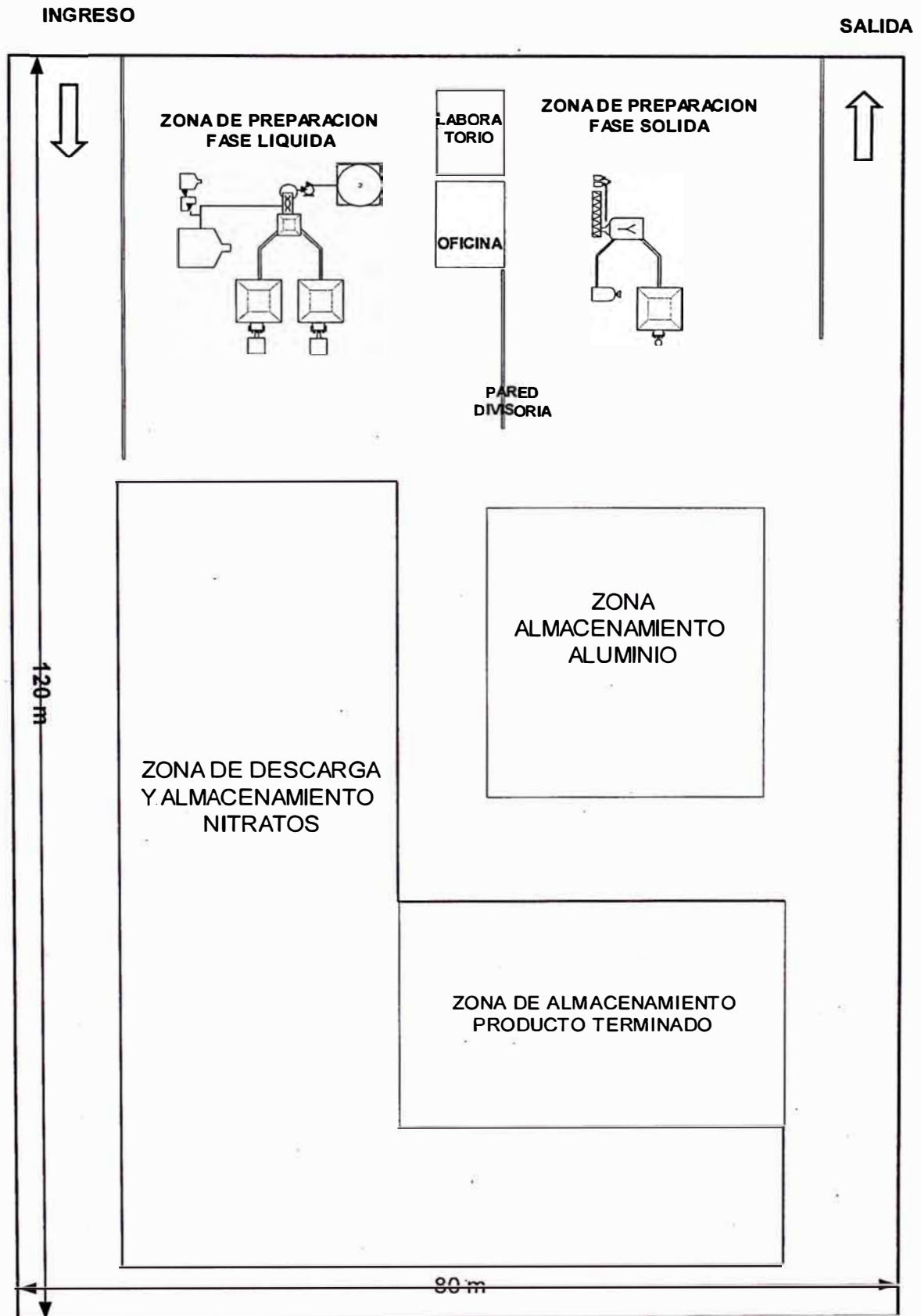
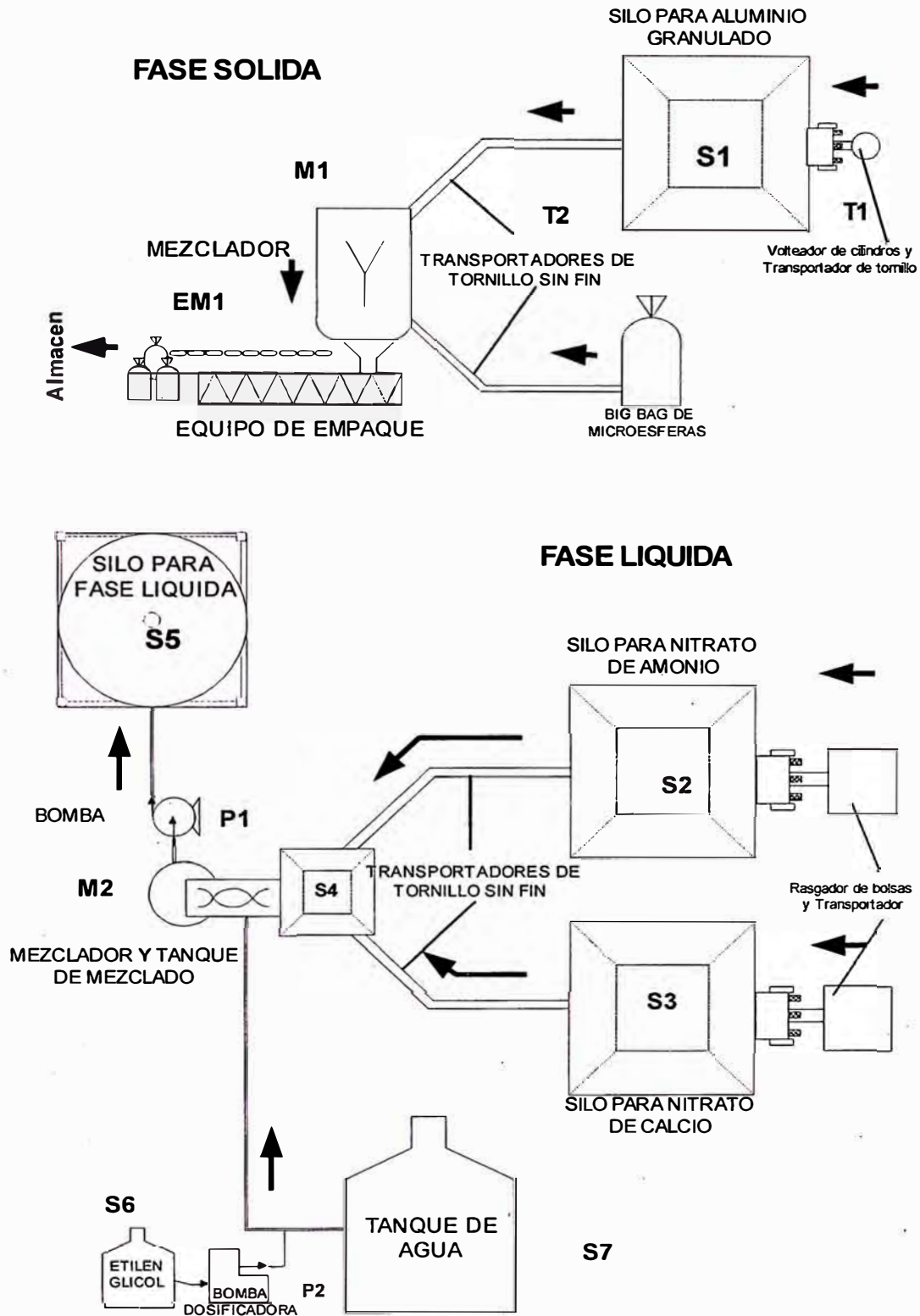


Fig 4.10: DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LOS EQUIPOS DE MANUFACTURA DE LAS FASES SOLIDA Y LIQUIDA DE UNA PLANTA DE EXPLOSIVOS BINARIOS EN BASE A ALUMINIO GRANULADO



El abastecimiento de agua debe ser continuo y abundante, se recomienda contar con un tanque de abastecimiento en la zona de mezclado, en lugar de una corriente continua de agua, para evitar el arrastre de sólidos indeseables, o productos metálicos disueltos que podrían alterar la reacción del explosivo binario. La zona de mezclado de la fase sólida, estará igualmente constituida por un patio de descarga para los cilindros metálicos en que se despacha el aluminio, se almacenarán en esta zona los cilindros de etilenglicol, y las microburbujas de vidrio o plástico. El aluminio se traslada a la zona de mezclado, donde un volteador hermético de cilindros, lo alimenta al mezclador. Los empaques de microburbujas, se venden con válvula de descarga, la que se conectará un tanque, desde se dosifica a la mezcla por gravedad. La operación de embalado, cuenta con algunas modificaciones, que permiten producir una manga plástica de diversos diámetros, la que se interrumpe cada cierta longitud, 16 ó 24 pulgadas serán las más comunes, el material sólido se insufla en esta manga, y va quedando a manera de salchichas gigantes, listo para que se le pueda agregar la fase líquida por un conducto, que a manera de bolsa interna está en el eje de la manga, esta especie de tubo central tiene micro perforaciones, que permiten el flujo del líquido, pero no la salida del sólido (Fig. 4.11 a). Estas "salchichas" se arrollan sobre un carrete para su despacho.

La dificultad principal para el uso del producto es el mezclado en la zona de operaciones, la fase sólida al ser pulverulenta, al aplicarse directamente a un taladro en la superficie de trabajo, creará una nube de polvo, que por ser aluminio es considerada contaminante y riesgosa para la salud, para evitar esta posibilidad, dentro de las operaciones de su manufactura, se establece el embalaje en envases especiales. Una alternativa que evitaría el uso de la manga plástica en la fabricación misma del producto, es el empleo de tubería plástica en el momento del carguío de los taladros, en este caso la presentación del producto es en bolsas de material poroso o micro perforado, que permite su manipuleo, pero a la vez es permeable al flujo de la fase líquida, los sacos del producto sólido son enviados a través del tubo, hasta el fondo del taladro, y luego la fase líquida es bombeada en su interior (Fig. 4.11 b). Las dificultades para reemplazar a emulsiones y cartuchos de dinamita de más de 1 ½" de diámetro, se resuelven por el empleo de "salchichas" de material poroso conteniendo el material sólido seco, y "tapones" para los taladros, que evitarían el "chorreado" de la solución líquida, si estos hacen un ángulo positivo respecto del suelo.

Considerando que se requiere de un iniciador del tipo booster, para denotar al explosivo binario, y queriéndose evitar el transporte de explosivos convencionales, los

cebos pueden ser reemplazados por explosivos binarios del tipo Fixor o Kinpack, de esta forma los únicos explosivos a trasladar serían detonadores, que por su larga vida útil, pueden adquirirse una o dos veces al año, y que por su pequeño volumen, requerirán de un almacén más bien pequeño, y consecuentemente barato.

Fig. 4.11a: PRESENTACION DEL PRODUCTO

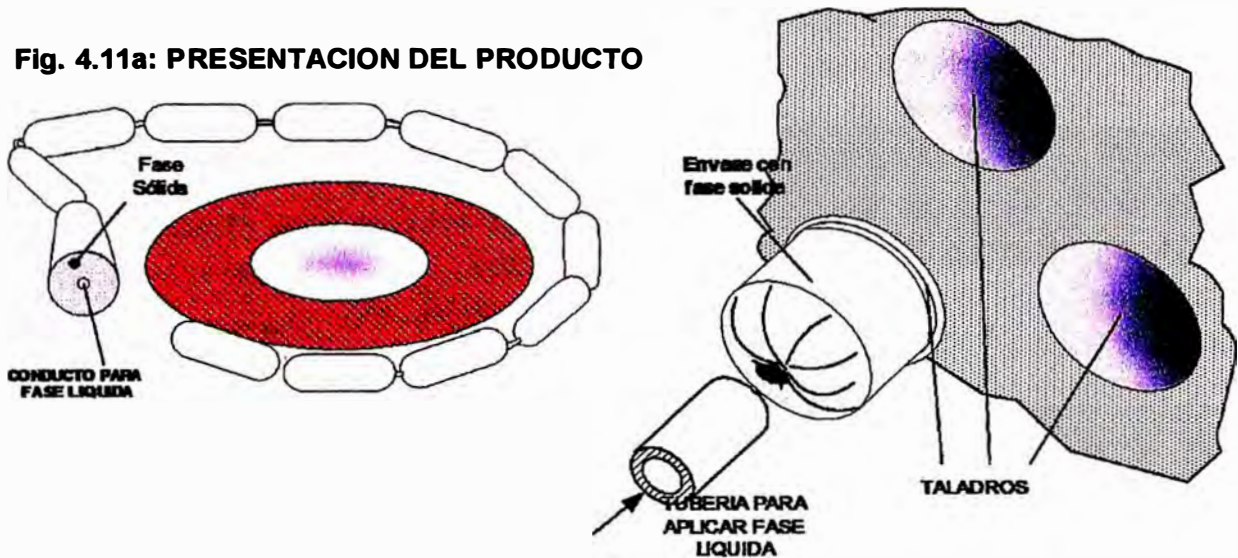


Fig. 4.11b: CARGUIO EN TALADROS CON EXPLOSIVO BINARIO

Sobre una planta de fabricación de este tipo de explosivos, es que **realizaremos un estudio preliminar, que no tendrá la profundidad de un estudio de factibilidad**, pero que podrá mostrar el costo del producto y su comparación con la inversión original que habría de hacerse para poder manufacturarlo.

V. EVALUACION ECONOMICA

5.1. COSTO PRELIMINAR DE UNA PLANTA DE FABRICACION DE EXPLOSIVOS BINARIOS

Para levantar la información necesaria, utilizaremos algunas de las reglas heurísticas en selección de equipos, que se nos proporcionó en el Curso de actualización de conocimientos al que asistimos entre Agosto y Diciembre del 2002, en principio, definiremos la cantidad de material explosivo a fabricar, estamos considerando en un principio trabajar con pequeñas minas, tendientes al cambio de tecnologías, y para quienes *resulte interesante cambiar la dinamita y las emulsiones a granel por explosivos binarios*, en tanto representaría ahorros en almacenamiento y transporte, el consumo mensual de una operación minera mediana es alrededor de 200 TM de explosivos por mes, si consideramos 3 clientes de este tamaño, tendremos una cantidad de consumo de **600 TM mensuales para iniciar operaciones**. La cantidad a producir por turno de 8 horas será pues 600 TM, y la capacidad instalada el triple de este valor.

En la tabla siguiente hacemos los cálculos básicos para establecer los valores de diseño preliminar:

Material	% en Peso	Flujo (TM/turno)	Densidad (g/cc)	Flujo (gal/turno)
Fase Sólida		6,54	0,45	
Aluminio HPS 10	31,4	6,28	0,54	
Microesferas	1,00	0,20	0,125	
Etilenglicol	0,30	0,06	1,10	15,85
Fase Líquida		13,46	1,22	2915
Nitrato de Amonio	20,50	4,10	0,75	
Nitrato de Calcio	30,20	6,04	1,05	
Agua	10,30	2,06	1,00	544,25
Etilenglicol	6,30	1,26	1,10	332,9

Equipos necesarios para la preparación de la fase Líquida: Se han utilizado las tablas de Técnicas Heurísticas del libro de Richard Turton "Análisis, Síntesis and Design of Chemical Process", Ed. Prentice Hall Int, USA, 1998 Páginas 237 y siguientes:

A) Tanques de Almacenamiento

De la regla 6 de la Tabla 9.6, el Volumen deberá ser cuando menos equivalente a 30 minutos del flujo de alimentación al proceso. De la Regla 5 de la Tabla 9.7, se requiere de un 15 % de holgura, para tanques menores a 500 galones, y 10% para

tanques cuya capacidad supere los 500 galones. El caso del tanque de almacenamiento para la fase líquida, es diferente, en tanto se ha considerado un tiempo mínimo de 3 días de producción (9 turnos) Entonces:

Tanque	Flujo Másico (TM/8h)	Densidad (TM/m ³)	Flujo Volum. (m ³ /hora)	Tiempo req. (minutos)	Volumen (m ³)
S2 N.Amonio	4,10	0,75	0,683	86,25	0,982
S3 N. Calcio	6,04	1,05	0,719	86,25	1,033
S4 Mezclador	13,46	1,22	1,379	86,25	1,982
S5 Almacén	13,46	1,22	1,379	4320	99,288
S6 Etilenglicol	1,26	1,10	0,143	86,25	0,205
S7 Agua	2,06	1,00	0,258	86,25	0.371

Para determinar las dimensiones de los tanques se usará la Regla 1 de la Tabla 9.7: para Volúmenes inferiores a 1000 (3.8 m³) galones, los Tanques serán verticales con parantes, y la Regla 3 : por encima de 10 000 galones (38 m³) úsese tanques verticales con bases de concreto. Considerando además que la relación óptima deberá ser L/D = 3. Para el cálculo de los costos, se utiliza la fig. 13-56 del Peters & Timerhaus "*Diseño de Plantas y su Evaluación Económica*" Ed. 1978, para tanques hechos en acero 304. La estructura mecánica y la cimentación, calculada es aproximadamente el 80% del precio del tanque. Con estas consideraciones se confecciona la Tabla:

Tanque	Volumen (gal)	Diámetro (m)	Longitud (m)	Costo de TK (US \$)	Estructura (US \$)
S2 N.Amonio	258	0,745	2,235	2800	2300
S3 N. Calcio	270	0.759	2,277	2800	2300
S4 Mezclador	520	0.944	2,832	4000	3200
S5 Almacén	26 000	3.480	10,440	22000	17600
S6 Etilenglicol	54	0,441	1,323	500	400
S7 Agua	97	0,540	1,620	1500	1200

Para el cálculo de las dimensiones de **dos transportadores rotatorios**, de la Fig. 5.2, se considera el 50% del volumen de los silos, para el cálculo del costo se ha tomado de base al texto de Peters y Timerhaus, Fig. 13-94, con estas consideraciones, se tiene:

Equipo	Volumen (m ³)	Diámetro (pulg)	Largo (pies)	Potencia (HP)	Costo US\$
Transportadores T2	0,49	6	10	2	3000

Los transportadores están hechos en acero 304, los motores y la transmisión cuestan US\$650 cada uno.

Como se requiere de una **mezcladora (M2)**, se ha preferido utilizar una **de hélice**, pues es la mas sencilla para las operaciones de mezclado y agitado de la solución acuosa, De las Rules of Thumbs del libro de Wallas "**Chemical Process Equipment: Selection and Design**", 1988 Butterworths Publishers; siguiendo la regla 2 para mezcladores: la potencia necesaria es: 1.5 HP por cada 1000 galones, por lo que se requerirá de un motor de 1 HP. El costo del equipo se toma de Peters y Timerhaus, obra citada, en la Fig. 13.72 donde se sugiere un equipo portátil de hélice, avaluado en US\$ 500, hecho en acero inoxidable 304.

Finalmente se requerirán, **dos molinos de bolas** para el acondicionamiento de los Nitratos, el cálculo del costo se basa en el flujo másico por 24 horas, para el calculo del costo de instalación y bolas necesarias (90 US\$/TM) se utiliza la Fig. 13.78 de la obra de Peters y Timerhaus, de esta manera se determinan:

Equipo	Flujo Másico (TM/8h)	(TM /24h)	Costo Inst (US \$)	Costo Bolas (US \$)
T3 (Amonio)	4,10	12,30	4500	1080
T3 (Calcio)	6,04	18,12	6000	1620

La **bomba para la alimentación** al depósito de fase líquida, se calcula en US\$2000 de la Fig. 13.39, de la obra de Peters, a partir del flujo en galones por hora anotado en la Tabla 5.2, y considerándola construida en acero inoxidable.

Los equipos complementarios y el rasgador de bolsas se calculan en unos 2000US\$.

Para la manufactura de la **fase sólida**, se requiere de un **siló, para el aluminio en polvo**, el que es calculado similarmente a los de la fase líquida, considerando un tiempo de residencia mínimo de 45 minutos, y hecho en acero inoxidable 304:

Equipo	Flujo (gal/h)	Tiempo req. (minutos)	Volumen (gal)	Diámetro (m)	Longitud (m)	Costo de TK (US \$)	Estructura (US \$)
Silo S1	383,77	86,25	551,70	0,961	2,883	4000	3200

Similarmente, se necesitará de un **transportador rotatorio (T2)** de 6" y 2 HP , (US\$3000) ya que las microesferas, se alimentan al mezclador por gravedad, desde el

mismo envase en que las despacha el proveedor, que cuenta para tal fin con un dispositivo válvula.

El **mezclador**, no es otra cosa que un tanque con agitación, que requerirá de un tiempo mínimo de residencia de 45 minutos, los cálculos son similares a los de los tanques, sin embargo su costo, en el que se incluye el motor y las hélices, se calculará a partir de la Fig. 13.56, del texto de Peters y Timerhaus:

Equipo	Flujo (gal/h)	Tiempo req. (minutos)	Volumen (gal)	Diámetro (m)	Longitud (m)	Costo de TK (US \$)	Estructura (US \$)
Mezc M1	479,78	86.25	689,68	1,034	3,102	4500	3600

Para finalizar con los equipos necesarios, el correspondiente al **sistema de pesado y embalado (E1)**, se ha calculado a partir de la Tabla 7.19 del *“Manual del Ingeniero Químico”* (5^{ta} Ed) de Perry y Chilton, Ed. McGraw Hill 1986, se ha considerado un equipo denominado SWF, que es empleado para el envasado de polvo herbicida, a un costo de US\$ 25000, que incluye el pesado y sellado con boquilla especial, pero que también permiten el uso de sacos y bolsas estándar.

Cada uno de los equipos define áreas de funcionamiento, que darán origen a estaciones de trabajo, se necesitarán como mínimo 4 operarios en la Zona de Fase Líquida: un montacarguista, un responsable de mezcla, un laboratorista, y un apoyo para las funciones de almacenamiento. En el área de manufactura de la Fase Sólida, serán necesarios 3 operarios, un montacarguista, un operario de mezcla y un apoyo. Se requiere de un supervisor para las operaciones, y un administrador, encargado de la logística de planta, controles y pagos.

Se asume un salario de US\$1/hora y un sueldo de US\$3/hora, valores que son comerciales para nuestro medio. Con estos costos, y el de los insumos, se establece en la Fig. 5.4, la inversión y el costo primo para la manufactura del explosivo binario: en bolsas de polietileno y sacos de polipropileno, conteniendo la fase sólida. Y en cilindros para la fase líquida.

En la inversión consideramos el costo de adquisición de un terreno, el que puede ubicarse en la carretera al Sur o al Norte, semi - rurales o eriazos, un costo aproximado es US\$ 3 / m² , las obras civiles, remoción de escombros, nivelación y cimentación, se consideran a US\$ 2.1 / m², las edificaciones se han calculado a priori en 25000 US\$, el establecimiento de los servicios (agua, electricidad, telefonía) se consideran en unos 12000 US\$. No se ha considerado una oficina de ventas ni los

costos administrativos, financieros ni comerciales, expresándose estos en un porcentaje del costo primo.

Fig. 5.1 INVERSIÓN PARA LA PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE PLANTA DE EXPLOSIVOS BINARIOS

INVERSIÓN APROXIMADA PARA PLANTA FABRICACIÓN DE EXPLOSIVOS BINARIOS (EN US\$) VOL. DE PRODUCCIÓN 7200 TM/AÑO	
EQUIPOS	99500
- Silos Fase Líquida	33600
- Transportadores fase líquida	7300
- Mezcladora de Hélice	500
- Molinos de Bolas	13200
- Equipos Complementarios	4000
- Silo Fase Sólida	4000
- Transporte fase sólida	3000
- Mezclador	4500
- Sistema de embalado	25000
- Equipos de Control (5% de Equipos)	4400
INFRAESTRUCTURA	110800
- Cimentación de Equipos	24800
- Compra de Terreno	28800
- Movimiento de Tierras	20200
- Edificaciones Básicas	25000
- Instalación de Servicios	12000
TOTAL Inversión Básica	210300
- Oficinas Ventas Administración (10%)	21000
- Marketing y Asistencia Técnica (5%)	10500
TOTAL Inversión puesta en mercado	241800
- Capital de Trabajo (3 meses de funcionamiento)	900000
TOTAL INVERSION	1'141 800

Considerando una producción de 600 TM mensuales, sobre la base de 300 días útiles de trabajo, se han calculado los siguientes datos para establecer el costeo preliminar:

Fig. 5.2: OBTENCION DEL COSTO UNITARIO PRELIMINAR PARA UNA PLANTA DE EXPLOSIVOS BINARIOS EN BASE A ALUMINIO GRANULADO

COSTEO PRELIMINAR PLANTA DE FABRICACIÓN EXPLOSIVOS BINARIOS (US\$)				
COMPONENTE DEL COSTO	CANTIDAD ANUAL	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	VALORIZACIÓN
MATERIA PRIMA				2'783 080
- Aluminio HPS-10	2260,1	TM	825	1'864 500
- Microbalones 3M (K-1)	72,0	TM	3950	284 400
- Etilenglicol	475,2	TM	290	137 750
- Nitrato de Amonio	1476,0	TM	120	118 080
- Nitrato de Calcio	2174,4	TM	174	378 350
OTROS INSUMOS				643 467
Material de Empaque ⁽¹⁾	1440	Millar	435	626 400
Agua	741,6	m ³	0.36	267
MANO DE OBRA DIRECTA	16800	Horas	1	16 800
COSTO PRIMO				3'443 347
MANO DE OBRA INDIRECTA	4800	Horas	3	14 400
SERVICIOS Y OTROS GASTOS ⁽²⁾				142 253
COSTO DE FABRICACIÓN				3'600 000
COSTO ADMINISTRATIVO (10%)				360 000
COSTO DE VENTA (15%)				540 000
COSTO FINANCIERO (2.5%)				100 000
COSTO TOTAL				4'600 000
PRODUCCIÓN ANUAL = 7200 TM	Costo Unitario			638,88

(1) *Se consideran Bolsas para la Fase Sólida y el despacho de la Fase Líquida en cisternas*

(2) *El calculo se basa en el consumo eléctrico y telefónico, así como otros gastos como vigilancia, protección y alimentación del personal*

(3)

El costo por TM es 638,88 US\$, sin impuestos ni utilidades. Un análisis de la devolución de la inversión y las posibilidades del negocio, se revisan en el próximo acápite.

5.2. COMPARACION DE LOS COSTOS DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO VS. INVERSION PROPUESTA

El transporte de 25 TM de explosivos en el país suele resultar bastante caro, si se le compara con otros productos a transportar; un promedio, aún sin efectivizarse la Ley de transportes de carga e interprovincial, que fijaría valores homogéneos para todo el país es US\$ 650 por 500 Km desplazados, y US\$ 150 por cada 100 Km adicionales, comparativamente, cualquier otra carga, cuesta US\$ 400 por los primeros 500 Km. y US\$80 por cada 100 Km adicionales.

Las custodias policiales, se establecen sin un criterio técnico, un viaje de 500 Km, arbitrariamente se fija en 5 días de custodia, mientras otro de 1000 Km, requiere de 8 días de asistencia de los agentes policiales, los días de custodia se cuentan por 12 horas de servicio, y cuestan US\$ 23,5 por efectivo para ese lapso. Una fórmula aproximada es 2 días de custodia por los primeros 50 Km (un servicio a Chancay es cotizado así) y 1 día adicional por cada 150 Km recorridos. Todo transporte debe contar con 2 custodias, y se ha dispuesto que un vehículo que moviliza explosivos, no puede transportar más de 25 TM, así su capacidad sea mayor (límite nacional 32 TM), si se organiza un transporte en caravana para transferir una mayor cantidad, deberá añadirse una camioneta de custodia con 2 custodias adicionales.

Paralelamente es necesario considerar, que el fabricante de explosivos, deberá contar con un **Seguro contra daño a terceros**, que cubre no solo el costo de los daños a la vida, la salud y la propiedad que pudiese ocasionar una detonación de la carga. Un valor modesto para este seguro, es un millón de dólares, por la que se paga un promedio de US\$ 4500 mensuales como concepto de prima. Concepto que indirectamente paga el usuario, pues el fabricante lo sumará en su estructura de costos. Evidentemente el costo de los seguros es mucho menor para un producto no explosivo, unos US\$ 850 mensuales por un seguro que cubre los mismos riesgos.

Adicionalmente a estos gastos, debe incluirse los costos de **Almacenamiento**, pues tanto el Fabricante como el usuario, deberán contar con almacenes, llamados polvorines, que cumplan con determinadas normas (Sintetizadas en el Anexo 1), la fabricación de estas estructuras, incluidos los parapetos o barricadas para su protección, es un aproximado de 50 US\$ por m² de construcción, una tonelada de explosivo requiere de un mínimo de 1,8 metros cuadrados, para su correcta estiba, y ventilación. Por el contrario, para cualquier otro tipo de producto, no explosivo, las necesidades de

almacenamiento son menores (unos 0,8 metros cuadrados por TM), y la construcción de una estructura no deleznable cuesta unos 15 US\$ /m².

Con estos datos se han preparado las tablas de comparación (Fig. 5.6, 5.7 y 5.8) de gastos de Transporte, Custodia y Almacenaje, que nos permitirá evaluar el tamaño del ahorro que podríamos provocar usando explosivos binarios. Para tal fin hemos considerado que **7200 TM anuales** (la producción propuesta), son **trasladadas en viajes de 25 TM**, a razón de un promedio de **900 Km por viaje** (Consideramos la planta ubicada en Lima, y las distancias recorridas hacia los principales centros mineros: Cajamarca 1000 Km., Huaraz 500 Km., Arequipa 1200 Km.) . En consecuencia se harán 288 viajes promedio al año, cada uno de 900 Km.:

Fig. 5.3 COMPARACION DE AHORROS EN TRANSPORTE CUSTODIA ALMACENAMIENTO Y SEGUROS USANDO EXPLOSIVOS BINARIOS

COMPARACIÓN DE GASTOS POR TRANSPORTE (EN US \$)					
VOLUMEN A TRANSPORTAR: 7200 TM ANUALES					
VIAJE PROMEDIO 25TM - 900 Km.	COSTO POR VIAJE DE PRODUCTO		AHORRO POR VIAJE	NÚMERO DE VIAJES /AÑO	AHORRO ANUAL
	EXPLOSIVO	NO EXPLOSIVO			
PRIMEROS 500 Km.	650	400	250	288	72000
SIGUIENTES 400 Km.(1)	600	320	280	288	80640
(1) US\$150 / 100 Km.	AHORRO TOTAL EN TRANSPORTE				152640

COMPARACIÓN DE GASTOS POR CUSTODIA (EN US \$)					
VOLUMEN A TRANSPORTAR: 7200 TM ANUALES					
VIAJE PROMEDIO 25TM - 900 Km. 2 CUSTODIOS	COSTO POR CUSTODIA		COSTO X KMS. DE CUSTODIA	NÚMERO DE VIAJES /AÑO	AHORRO ANUAL
	DÍAS DE CUSTODIA	PRECIO POR DIA DE CUSTODIA			
PRIMEROS 50 Km.	2	23,5	94	288	27072
SIGUIENTES 850 Km.(2)	6	23,5	282	288	81216
(2) 1 DIA / 150 Km.	AHORRO TOTAL EN CUSTODIA				108 288

COMPARACIÓN DE GASTOS POR ALMACENAMIENTO (EN US \$)					
VOLUMEN A TRANSPORTAR: 7200 TM ANUALES					
ALMACENAMIENTO PROMEDIO 4 MESES DE CONSUMO	CANTIDAD A ALMACENAR (TM)	M² POR TM	ÁREA NECESARIA M²	COSTO POR M² (US \$)	AHORRO ANUAL
PRODUCTO EXPLOSIVO	2400	1.8	4320	50	216 000
PRODUCTO NO EXPLOSIVO	2400	0.8	1920	15	28 800
AHORRO TOTAL EN ALMACENAMIENTO					187 200

PAGOS MENSUALES (US\$)	PROD. EXPLOSIVO	PROD. NO EXPLOSIVO	AHORRO/ MES	AHORRO ANUAL
AHORRO POR SEGUROS	4500	850	3650 / mes	43 800

Resumiendo:

AHORRO EN TRANSPORTE	AHORRO EN CUSTODIA	AHORRO EN ALMACENAJE	AHORRO EN SEGUROS	AHORRO TOTAL (US \$)	AHORRO POR TM
152 640	108 288	187 200	43 800	491 928	68,32

La idea principal que nos llevó a hacer el análisis fue determinar si el producto, podía sustituir a las cargas principales en las voladuras. Por ello comparamos el costo de nuestro explosivo binario: 638,88 US\$, con los precios de las cargas de fondo más conocidas:

COSTOS POR TM DE LAS CARGAS PRINCIPALES PARA VOLADURAS (US \$)					
LOS COSTOS DE ALMACENAJE Y TRANSPORTE SOBRE 7200 TM					
	ANFO	HEAVY ANFO	DINAMITAS	EMULSIONES	BINARIOS
PRECIO DE VENTA	370,00	440,00	1 600,00	1 350,00	800,00
ALMACENAJE Y TRANSPORTE	106,54	106,54	106,54	106,54	38,22
COSTO PUESTO EN MINA	476,54	546,54	1706,54	1456,54	888,32

Con los costos propuestos nos sería imposible competir con el ANFO y el HANFO, nuestros esfuerzos irán dedicados entonces a la sustitución de dinamitas y emulsiones, productos que se hallan cotizados entre los 1300 y 1800 US\$ la TM, por ello sugeriríamos un precio de venta de 800 US\$ / TM, y paralelamente nos orientaríamos a que parte importante de nuestro mercado estuviera constituido por la mediana minería, segmento para el cual la seguridad es un valor imprescindible.

Si las condiciones que hemos planteado inicialmente, esto es, vender las 7200 TM producidas al costo de US\$ 800 / TM, y nuestros costos se mantienen en los anotados en la Tabla 5.5, podremos corroborar lo viable de nuestro proyecto con un análisis de Tasa Interna de Retorno (Ver Anexo 6), el mismo que nos hace ver que el valor de la inversión podría recuperarse en 22 meses, y la inversión es sobradamente interesante si asumimos un plazo para la evaluación de este proyecto en 5 años.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

Las diversas tecnologías aquí expuestas, están encaminadas a crear un producto que pueda despacharse desde su lugar de fabricación, al lugar en que lo requiera el usuario, en empaques convenientes, (el uso de dos tipos de envase es una práctica común, cuando se trata de materiales que están destinados a servir como cebos o boosters). Sin embargo la principal dificultad para el uso masivo de los explosivos binarios es la hasta ahora imposibilidad de poder despacharlos a granel, ciertas características los hacen aún sofisticados para reemplazar a un producto tan sencillo en su uso como el ANFO, creemos que la posibilidad que brindamos en este estudio, es muy interesante. Si bien no los podemos despachar a granel, el explosivo binario en base a aluminio granulado, brinda las seguridades necesarias, y la facilidad en su manejo, si la fase sólida es despachada en bolsas de polipropileno y la fase líquida se moviliza en cisternas o cilindros.

Una circunstancia que encarece el producto es el manejo de los insumos, que al no producirse en nuestro país, hacen necesario, tener grandes áreas de almacenamiento y evidentemente un desembolso de dinero importante en mantener stocks altos, la solución puede corregirse si llegamos a firmar acuerdos con nuestros proveedores, para conseguir contratos que aseguren el abastecimiento y mejoren las condiciones de pago, fundamentalmente en lo referido a los tiempos de entrega y las fechas desde donde correrán los plazos de financiamiento. Un producto como el aluminio, tiene tiempo indefinido de caducidad, los precios de mercado pueden mejorarse, empleando otros proveedores regionales, Brasil y Venezuela son fabricantes de este producto.

Los plazos para pagar la inversión son relativamente cortos, considerando una utilidad interesante, y que justifica la inversión, sin embargo, debemos señalar que esta es sólo una primera aproximación a este campo, recomendamos hacer un análisis mucho menos superficial que al aquí vertido. Un análisis de factibilidad, acompañado de pruebas de laboratorio, empleando otras sales oxidantes de más fácil adquisición, nos parece necesario. Particularmente nos parece interesante el utilizar nitrato de sodio y chatarra de aluminio, con el fin de abaratar los costos. También la alternativa de agregar algún producto combustible a la masa de aluminio, con el fin de sensitivizar mayormente el producto, y llegar a diámetros críticos alcanzados sólo por las dinamitas.

Para iniciar la competencia con las dinamitas y emulsiones, el explosivo binario que proponemos, deberá usar la tecnología propuesta en el acápite 4.4.2, esto es un equipo de envasado que permita la presencia de un conducto central para la alimentación de la fase líquida, se deberá entonces revisar los cuadros de costeo y agregar en el precio de envases, las cajas individuales o carretes para el embalado de las “salchichas”. Esta presentación tendría éxito, pues no supone mayores sofisticaciones.

El mercado de dinamitas y emulsiones puede ser un campo interesante, para estudiar el comportamiento de este tipo de productos en la rotura y desplazamiento de rocas, materiales como FIXOR o KINEPACK, lo hacen en estratos demasiado reducidos del mercado, considero que el explosivo binario en base a aluminio, es mucho más versátil, y tiende a ser más barato, las posibilidades de utilizar un gas combustible, licuefactado, que pueda embeberse en polvo de aluminio, es una idea que debería desarrollarse en los próximos años. Esta ha sido realmente la característica más saltante en el desarrollo de nuevos productos del mundo de los explosivos: la nitroglicerina inefectiva sola, se embebió en tierra diatomácea y nació la dinamita, el combustible fue absorbido por las partículas de Nitrato y el ANFO ha reinado durante los últimos 60 años, que nuevo producto, dejado de lado por años como demasiado sensible, difícil de manejar, o muy caro, está destinado a convertirse en la estrella de este nuevo siglo, nosotros apostamos al Aluminio.

Creemos haber completado las expectativas que nos propusimos al inicio de este trabajo, es decir, preparar un resumen, fácilmente entendible, sobre la tecnología de explosivos, interesar al lego por las posibilidades que estos productos tienen en su utilización, comprender cual ha sido el desarrollo de la industria de explosivos, y hacer un pequeño estudio, diminuto quizás, sobre el siguiente paso en el desarrollo lógico de esta industria: los explosivos binarios.

VII. BIBLIOGRAFIA:

- ISEE (International Society of Explosives Engineers) **Blaster's Handbook 17th Ed.** (1998) 2nd printing 2000 Ed. ISEE – Ohio USA Págs. 21 y ss.
- Konya C.J. y Albarrán E. – **Diseño de Voladuras** – 1st Ed.(1998) Ed. CUICATL – México Pags. 23 y ss.
- Cooper P. W. – **Explosives Engineering** (1997) - 1st Ed. (1997) Ed. Wiley –VCH Inc. New York USA Capítulos. 3 y 4
- Fire and Safety – **Recognition of Explosives** – (1999) Fire and Safety Educacional Library www.fireanssafety.edu.uk
- IME (Institute of Makers of Explosives) – **Safety in the Transportation, Storage, Handling and Use of Explosive Materials** (Safety Library No. 17) – (Feb. 1991) Ed. IME Washington USA.
- Garmendia L. – **El Control de Armas, Munición y Explosivos de uso Civil en el Perú** – 2da Ed. (1976) Lima Perú Ed. MININTER
- DuPont Mexicana – **Manual de Voladuras de DUPONT** 5ta Ed (1969) Ed. Casa Mexicana
- Brown J. Y Conkling J. – **Insensitive binary explosive production process** – (1998) USPTO Pat 5750057. www.uspto.gov
- Hansen G. & Trapp R. – **Formulation of multi-component explosives** – (1993) USPTO Pat 5226986. www.uspto.gov
- Hurst G. – **Porous Particles Containing dispersed organic liquid and gaseous components** (1970) USPTO Pat 3718512 www.uspto.gov
- Young D. – **Particulate high explosive** (1976) USPTO Pat. 3959044 www.uspto.gov
- Perry R. & Chilton C. – **Biblioteca del Ingeniero Químico** – (1986) 5ta Ed. Vol. III Ed. McGraw Hill
- MREL Company – **FIXOR Advantages** –(2003) – Fixor Bulletin www.fixor.com
- Peters & Timerhauss - **Diseño de Plantas y su evaluación económica para Ingenieros químicos** (1978) Ed. Géminis Buenos Aires
- Walas S. – **Chemical Process Equipment Selection and design** – (1999) Ed. Butterworth – Heinemann Kansas USA.

VIII. APENDICES:

8.1 EXTRACTO DE LA LEGISLACION NACIONAL SOBRE EXPLOSIVOS

INTRODUCCION:

La idea básica de estas directivas, es que en la práctica sirvan como un manual de procedimientos, sin haber sido definidas como tal. El motivo de este accionar es que debemos compatibilizar las normas legales nacionales definidas en el DS 019 – 71 de la DICSCAMEC, con las normas internacionales que rigen el manipuleo, almacenamiento y transporte, definidas por el Capítulo 49 y 27 del Código de Regulaciones Federales de los EE UU, el Manual de la IMO para Materiales Peligrosos, y el libro de Recomendaciones para el Manejo de Sustancias Peligrosas del Comité de Expertos de la ONU; esta compatibilización no es siempre posible, dado que la reglamentación nacional se halla desfasada, respecto a la internacional, que es evaluada y corregida cada dos años.

DEFINICIONES:

Los términos que se describen a continuación, están basados en las definiciones de las fuentes mencionadas:

- **Agente de Voladura:** Cualquier material o mezcla de combustible y un oxidante, que es utilizado en el cebado de voladuras, y no se le considera como explosivo, si el producto sin confinar no puede iniciarse por la explosión de un detonador no. 8.
- **Alto Explosivo:** Cualquier material que genera una onda expansiva cuya velocidad es mayor a los 2500 m/seg., cuando son iniciados por medio de una cápsula detonante u otro tipo de detonador, aún cuando no se hallen confinados. Ej.: Dinamitas, Emulsiones sensibilizadas, pólvora flash, munición de salva, etc.
- **Barricada:** Todo obstáculo natural o artificial, que aisle o rodee a una fuente de potencial explosión, y que sirva de protección y atenuación de los efectos de la onda explosiva. Si se utiliza un accidente natural del terreno, o si se prepara una barricada del tipo artificial, esta deberá estar separada a un metro de la construcción que se piensa proteger, deberá contar con un metro de espesor en la parte superior, su pendiente será natural, y su altura deberá exceder en un metro a la parte mas alta de la construcción a proteger.
- **Compatibilidad:** Capacidad que tiene determinado explosivo, para ser almacenado o transportado con otro, sin aumentar el riesgo intrínseco que ya posee. Se establecen clasificaciones y tablas que permiten realizar esta combinación de manera apropiada.

- **Detonador:** Cualquier artefacto que contiene una carga explosiva detonante primaria, que sirve para la iniciación de un explosivo de mayor potencia. El termino incluye, pero no se limita a: fulminantes eléctricos (sísmicos, de retardo e instantáneos), cápsulas detonadoras y fulminantes no eléctricos instantáneos y de retardo (fulminantes mecánicos, y sus variedades).
- **Polvorín Tipo I (ATF):** Polvorín del tipo permanente, para el almacenamiento de altos explosivos o detonadores, su locación debe determinarse por la tabla cantidad – distancia, anexa a estas directivas. Las paredes pueden ser construidas en ladrillo, concreto, metal, madera o una combinación de estos, los techos podrán ser hechos en cualquier material no poroso, y protegidos por chapa de fierro, los pisos deberán ser pulidos y cubiertos por material antifricción. Las puertas deberán tener una estructura de cuatro pulgadas de madera dura, cubierta por plancha de acero de ¼ de pulgada de espesor. Su construcción permitirá ventilación e iluminación indirectas, y estará localizada en un terreno plano que permita un drenaje rápido en caso de inundaciones.
- **Polvorín Tipo II (ATF):** Polvorín de tipo provisional, o móvil, puede estar constituido por una estructura metálica del tipo container, asegurándose que cumpla con los requisitos de seguridad, ventilación y resistencia al impacto de una bala. Su ubicación estará determinada por la tabla cantidad - distancia, y en su interior deberá respetarse las distancias que fija la norma nacional.
- **Tabla Cantidad – Distancia:** Relación obtenida experimentalmente, fija la distancia que deberá existir entre un depósito de explosivos y diversos tipos de edificaciones, carreteras y centros poblados, atendiendo a la cantidad de material que se guarda en su interior, y el daño o riesgo potencial que podría existir en el caso de una voladura en masa.

POLVORINES DISPOSICION Y REGLAMENTACION

De acuerdo a lo definido por el Reglamento de DICSCAMEC en los Artículos 59 al 79, y considerando adicionalmente la directiva 001-2001- IN – 1703, pueden resumirse en lo siguiente:

- Los polvorines deberán alojar en su interior una cantidad de explosivos tal, que cumpla las distancias establecidas de acuerdo a la tabla cantidad – distancia, atendiendo al tipo y categoría que les corresponde.
- Categorías para el uso de las Tablas Cantidad distancia:
 - Categoría 1: Pólvora sin humo con espesor mayor de 0.019"

- Categoría 2: Pólvoras sin humo monoperforadas con espesor menor a 0.035", o multiperforadas menores a 0.019" , o que contengan menos de 20% de Nitroglicerina, pólvoras sin humo para pistolas y escopetas.
- Categoría 3: Pólvora sin humo con mas del 20% de NG, compuestos de ceba (boosters), explosivos detonantes iniciadores, altos explosivos, pólvora negra
- Categoría 4: Nitrocelulosa con 30% de agua, Nitrato de Amonio, ANFO, DNT, Explosivos preparados con Agua.
- Grupos de Compatibilidad: explosivos de distinto grupo no podrán almacenarse en un mismo lugar:
 - Grupo 1: Dinamitas
 - Grupo 2: Nitrato de Amonio, ANFO, Akremitas, DNT, Nitrocelulosa
 - Grupo 3: Composición A, A-2, A-3, B, C, C-2, C-3 y C-4; Nitroguanidina, Explosivos D, nitroalmidón, Pentolita, Acido Pítrico, TNT.
 - Grupo 4: Tetril, RDX
 - Grupo 5: Azida de Plomo, estignato de plomo, fulminato de mercurio, PETN
- Los polvorines deberán estar ubicados y construidos en lugares que impidan posibilidades de siniestro, aseguren la ventilación, eviten las sustracciones y de preferencia se hallen barricados.
- Dentro de los polvorines, los explosivos se colocaran en empaques debidamente identificados, sobre parrillas con tratamiento ignífugo, cada ruma de cajas o empaques, no tendrá una altura mayor a los 2 metros, estarán separadas entre sí por lo menos 5 cm, y se mantendrá una distancia mínima de un metro entre de las paredes del polvorín y las rumas de cajas.
- Todo polvorín deberá estar permanentemente vigilado.

8.2 CUADRO DE COMPATIBILIDAD DE MATERIALES EXPLOSIVOS:

Las materias reglamentadas no podrán almacenarse conjuntamente en un polvorín ni cargarse en común en un mismo vehículo, excepto cuando esto esté autorizado con arreglo a la siguiente tabla de compatibilidad:

Grupos Compatibilidad	A	B	C	D	E	F	G	H	J	L	N	S
A	X											
B		X		(1)								X
C			X	X	X		X				(2) (3)	X
D		(1)	X	X	X		X				(2) (3)	X
E			X	X	X		X				(2) (3)	X
F						X						X
G			X	X	X		X					X
H								X				X
J									X			X
L										(4)		
N			(2) (3)	(2) (3)	(2) (3)						(2)	X
S		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X

La «X» indica que las materias u objetos de los diferentes grupos de compatibilidad pueden almacenarse conjuntamente en un mismo polvorín o cargarse conjuntamente en un mismo compartimento, contenedor o vehículo.

Notas:

(1). Los bultos que contengan materias y objetos asignados a los grupos de compatibilidad B y D podrán ser cargados conjuntamente en el mismo vehículo a condición de que sean transportados en contenedores o compartimentos separados, de un modelo aprobado por la autoridad competente o un organismo designado por la misma, y que estén diseñados de manera que se evite toda transmisión de la detonación de objetos del grupo de compatibilidad B o las materias u objetos del grupo de compatibilidad D.

(2). Los diferentes objetos de la División 1.6, Grupo de compatibilidad N (1.6 N), sólo podrán transportarse o almacenarse conjuntamente como objetos 1.6 N, si se prueba mediante ensayos o por analogía que no existe riesgo suplementario de detonación por influencia entre unos y otros objetos. En caso contrario, deberán ser tratados como pertenecientes a la División de riesgo 1.1.

(3). Cuando se transporten o almacenen objetos del Grupo de compatibilidad N con materias u objetos de los grupos de compatibilidad C, D o E, los objetos del grupo de compatibilidad N se considerarán pertenecientes al grupo de compatibilidad D.

(4). Las materias y objetos del grupo de compatibilidad L podrán almacenarse y cargarse en común en el mismo vehículo con las materias y objetos del mismo tipo pertenecientes a ese mismo grupo de compatibilidad.

8.3 GLOSARIO:

Accesorios de Voladura: Artefactos y materiales explosivos que sirven para iniciar a los altos explosivos, se consideran accesorios: la mecha de seguridad, fulminantes, cordones detonantes y boosters o cebos.

Aceptor: Una carga de explosivo o de agente de voladura, que recibe el impulso de una carga donante que esta explotando.

Altura de Banco: la distancia vertical desde el tope del banco al piso, o al tope del próximo banco.

ATF : Oficina de control Americana, denominada BATF (Bureau of Alcohol, Tobacco y Firearms) Oficina de control sobre Alcohol, tabaco y armas de fuego.

Balance de Oxigeno: El porcentaje de oxígeno en un material explosivo en exceso o defecto del que es necesario para producir una reacción ideal.

Banco: (Bench) La zona destinada a ser volada, cuya forma es alargada horizontalmente, y presenta un desnivel importante con respecto al resto del terreno. En este terreno, son perforados hoyos verticalmente hacia abajo. El banqueo es la operación de excavación con explosivos y maquinaria pesada.

Barreno: Un hoyo perforado en la zona que va a detonarse, con el propósito de contener a una carga explosiva. Por extensión se dice del agujero que se perfora horizontalmente o con un ángulo, con una barrenadora manual, para diferenciarlo del **Taladro**, que se hace con una maquina taladradora de gran tamaño, generalmente usada en las Voladuras a tajo abierto (agujeros verticales hacia abajo).

Bordo: La distancia del barreno a la cara libre mas cercana. O la distancia entre barrenos medida perpendicularmente. También se define como bordo la cantidad de material a volarse por un determinado hoyo, usualmente medida en yardas cubicas o toneladas.

Carga Explosiva: Cantidad de material explosivo, depositado dentro de un barreno para su posterior detonación.

Carga de Fondo (Main charge): El material explosivo que se coloca al fondo de la Columna, encargado de realizar el mayor trabajo de voladura.

Cargado neumático: Forma de llenar los taladros o barrenos, utilizando una compresora para impulsar el material explosivo dentro del agujero.

Carga de Columna: (columna de explosivo): La cantidad de explosivo depositada en un taladro, hasta alcanzar determinada distancia.

Columna Explosiva: Barreno que se halla cargado de material explosivo, y provisto de un iniciador.

Diámetro Crítico: El mínimo diámetro para permitir la propagación de la onda de detonación a una velocidad estable. El diámetro crítico es afectado por las condiciones de confinamiento, temperatura y presión de la columna de explosivo.

Disparo: También conocido como tiro, es la explosión de la primera columna explosiva en una voladura.

Elemento de Retardo: Dispositivo pirotécnico que, se coloca al interior de un detonador para producir una pausa predeterminada en la iniciación de la detonación. Este lapso permite que exista una secuencia en la sucesión de disparos, que se traduce en un rotura uniforme de la roca.

Explosivos Clase 1.4: Material explosivo que se halla empacado de tal forma que su detonación no causa daño masivo, aun se inicie por un incendio. Esta asociado a la secuenciación de voladura.

Fragmentación: (Breakage) Un término usado para describir la distribución de los fragmentos de roca que origina una detonación.

Factor de Carga (Powder Factor): La cantidad de explosivo utilizada en una voladura, expresada en peso, por unidades de peso de roca removida.

Fulminante No. 8: Los fulminantes se confeccionaron en cilindros de papel prensado o hierro, inicialmente con fulminato de mercurio, como elemento explosivo. La numeración que se le asignó, del 4 al 12 (solo los pares) estuvo siempre basada en el denominado No. 6, este artículo utilizaba 1 gramo de Fulminato de Mercurio, como elemento detonador. El No. 4 utilizaba medio gramo, el No. 8 dos gramos, el 10 tres gramos y el 12 cuatro gramos de la sustancia explosiva. Hoy en día, ya no se usan envases de cartón o hierro, el metal que constituye la carcasa puede ser aluminio, cobre o bronce y la carga explosiva es la PETN, el iniciador de esta carga es Azida de plomo, TNR, HNS ó una mezcla de ellos. Un fulminante No 6 tiene 0,35 gr. de PETN y un No. 8 tiene 0,78 gr. de este material. Puesto que resulta difícil comprobar los pesos de cada elemento, para determinar su diferencia, se usa la prueba Trauzl, consistente en la utilización de un cilindro de plomo sólido, al que se le hace un agujero para colocar en su interior al detonador, luego de la detonación se mide el desarrollo volumétrico ocasionado por los fulminantes en mención. Un valor mínimo de 26 centímetros cúbicos caracteriza al No. 6, en el caso del No. 8 el valor no deberá ser inferior a los 39 cc.

IME (Institute of Makers of Explosives): Agrupación sin fines de lucro, que reúne a los principales fabricantes de explosivos de USA y Canadá, orientada a la mejora de las condiciones de seguridad con que se fabrican, manipulan, transportan y almacenan los explosivos.

Mortero Balístico: Instrumento de laboratorio usado la medir la fuerza relativa de materiales explosivos.

Plantilla de Voladura: La forma en que se han de distribuir las cargas explosivas para conseguir la mayor eficiencia del disparo, dependerá de la naturaleza de los explosivos y el suelo a volar.

Resistencia al Disparo: Criterio con que se designa a la propiedad que una construcción puede tener, (Polvorín o Planta de Proceso, por extensión vehículo utilizado para mezclar explosivos) para que sus paredes puedan soportar un proyectil M2 de 150 granos disparado a una velocidad de 2700 pies/seg. por un rifle calibre .30 desde una distancia de 100 pies.

Rocas Voladoras: (Flyrock) Fragmentos de rocas impulsadas por la fuerza de la explosión en un área determinada como zona de voladura.

Sensibilidad al Fulminante: Cualquier explosivo que se inicia por efecto de un Fulminante No.8 (Detonator No. 8 Test).

Shock Tube: Un tubo de plástico de pequeño diámetro, impregnado en su interior con una sustancia explosiva, tal que permite la transmisión de la onda de choque en su interior sin romper las paredes que la confinan, actualmente el método más usado para la iniciación de detonadores.

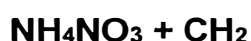
Tiempo de Vida Media: El máximo periodo de almacenaje que puede tener un producto explosivo, antes que se torne riesgoso o pierda propiedades físicas.

Tiro Cortado (Misfire): Una disparo no completado por acción de los accesorios, originada por su calidad o por defectos en la manipulación. Es la mayor fuente de accidentes y lo más indeseable en una operación de voladura.

8.4 CALCULO DE LA ENERGÍA DE EXPLOSIÓN PARA EL ANFO

La primera dificultad para establecer el cálculo de la energía de Explosión para la mezcla Nitrato de Amonio más diesel 2, resulta de la forma en que se establecerá una fórmula para el combustible. La segunda dificultad provendrá de los gases que se convenga podrán resultar de la explosión, pues es un tanto común, presenciar humos pardo rojizos, grises y hasta negros, lo que indicará en cada caso desequilibrios de la mezcla, del lado del nitrato, el combustible, y una inadecuada iniciación.

Siendo el fuel oil (diesel para nosotros, gasóleo para argentinos y mexicanos), una mezcla de alcanos, alquenos, tanto cíclicos como simples, aromáticos y dependiendo de su origen, a esta mezcla deberán sumarse trazas de azufre, aminas y hasta compuestos de peso molecular más alto, En el ejemplo que se cita en la Fig. 4.4, hemos seguido lo sugerido por Van Wylen y Sonntag¹ quienes, luego de algunos ensayos del calor de combustión de diversos tipos de diesel, en una bomba de calor, determinaron que la fórmula más cercana de acuerdo a los resultados era C_{14,42} y H_{26,85}. Esta expresión es muy parecida a la propuesta CH₂, es más, la diferencia que origina esta suposición es inferior al 1% en peso molecular. En la actualidad, el uso de modificadores de cetano, eliminadores de gomas, mejoradores de viscosidad y combustión pueden llegar al 1% en volumen de la mezcla combustible, con estas consideraciones levantamos la primera dificultad, pudiendo expresar la fórmula para la combustión del ANFO como:



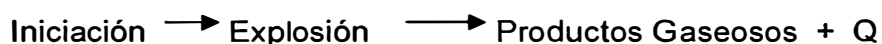
Para solucionar la segunda situación nos valdremos de las reglas de Kistiakowsky y Wilson² que se resumen en:

- Todo el Nitrógeno forma N₂
- Todo el Hidrógeno es convertido por combustión a H₂O
- Cualquier oxígeno sobrante de la formación de H₂O, oxida al carbón como CO
- Cualquier oxígeno sobrante de la formación de CO oxida al CO hasta CO₂
- Cualquier oxígeno remanente forma O₂
- Podrían formarse trazas de NO_x

Bajo estas reglas, y conservando la relación del ANFO (94,39% nitrato / 5,61% combustible), la ecuación de la reacción será:



Que esquematizada será:



¹ *Classical Thermodynamics - Van Wylen y Sonntag 2nd Ed. Pag. 618*

² *The chemistry of explosives – Cap. 9 – J Akhavan Royal Society of Chemistry 1998*

El Q, producido a volumen constante, y considerando que el calor de iniciación es irrelevante frente a la cantidad de calor producida, nos permite determinar la energía Standard de explosión, siguiendo la ecuación de Hess:

$$Q_p = \sum \Delta H_p (\text{Producto}) - \sum \Delta H_p (\text{Explosivo})$$

Es esta ecuación que nos permite determinar cada uno de los calores de formación, desde la formulación de la reacción:

Explosivos: Nitrato de Amonio (NH_4NO_3) = - 87.3 kcal/mol

Diesel (CH_2) = - 13 kcal/mol³

Productos: - Dióxido de carbono (CO_2) = -94.1 kcal/mol

Agua (H_2O) = -57.8 kcal/mol

Nitrógeno (N_2) = 0 kcal/mol

Ahora remplazamos los valores en la ecuación de calor

$$\sum \Delta H_p (\text{Explosivo}) = 3 * (-87.3) + (-13) = - 274.9 \text{ kcal}$$

$$\sum \Delta H_p (\text{Producto}) = (-94.1) + 7 * (-57.8) + 3 * (0) = - 498.7 \text{ kcal}$$

Luego:

$$Q_p (\text{Explosivo}) = -(- 498.7) + (-274.9)$$

$$Q_p (\text{Explosivo}) = \mathbf{223.8 \text{ kcal}}$$

Como el peso Molecular de la mezcla es $3 * (80,04) + 1 * (14,02) = 254,14 \text{ g}$

Entonces el calor de formación de una mol de la mezcla ANFO será:

$$\text{Calor de Detonación} = \mathbf{223.8 \text{ kcal} / 0,25414 \text{ Kg.} = \underline{\underline{880,6 \text{ Kcal/ Kg}}}}$$

Que es el valor que propusimos en la Fig. 4.4 y nos da un índice del desalojo de calor que se produce en una voladura a cielo abierto (Open Pit) donde se consumen como promedio 40 TM de ANFO, es decir mas de 35 millones de Kcal, esto no cuenta la potencia adicional que logra el desarrollo expansivo de los gases producidos, esto es materia de otro trabajo.

³ NTIS Tables (En Wikipedia o cualquier otra referencia)

8.5 GRAFICAS UTILIZADAS

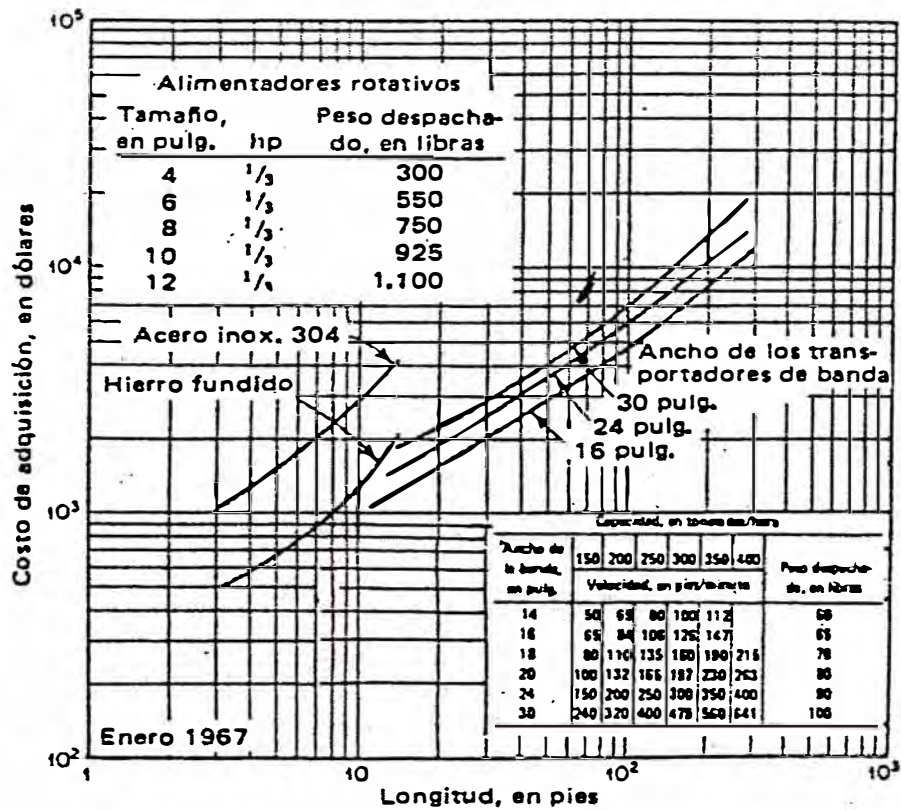


Fig. 13-84. Equipos para transportar materiales. Costo de bandas transportadoras y alimentadores rotativos. El precio no incluye el costo del motor y de la transmisión. El precio de las bandas transportadoras incluye los marcos de acero soldados, las poleas de ambos extremos, canaletas de 5 pulgadas de diámetro, la polea de retorno, cojinetes de rulemanes, mecanismo para levantar el tornillo, la banda de 4 telas, 28 onzas y ejes de acero laminado en frío.

Tomado de *Diseño de plantas y su evaluación económica para Ingenieros Químicos* Peters & Timmerhaus 2da Ed. Buenos Aires 1978. Pág. 531

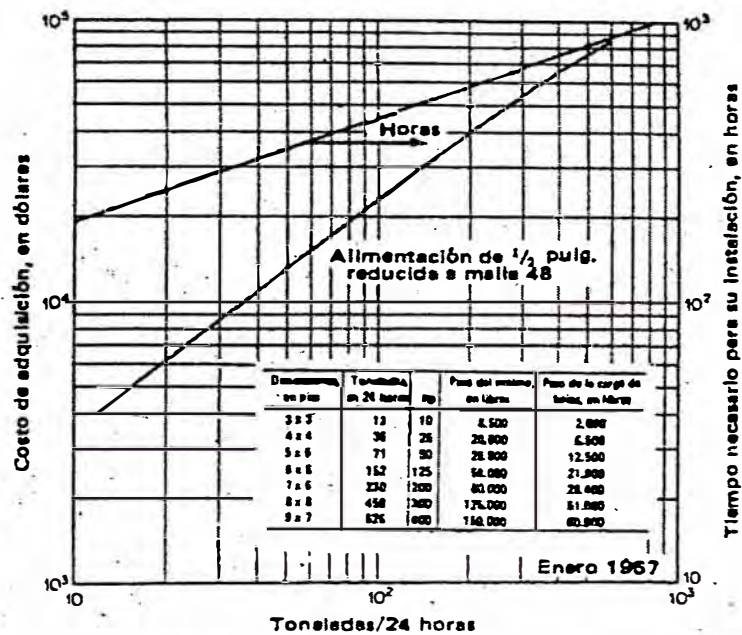


Fig. 13-78. Molinos de bolas. Las bolas cuestan \$ 90/tonelada. El precio incluye el revestimiento, el motor, la transmisión y defensas.

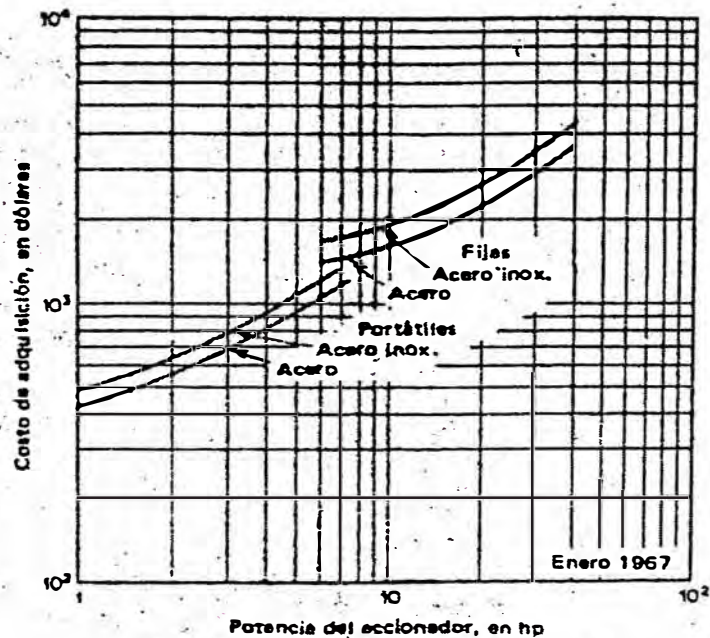


Fig. 13-72. Costo de mezcladores de hélice.

Tomado de *Diseño de plantas y su evaluación económica para Ingenieros Químicos* Peters & Timmerhaus 2da Ed. Buenos Aires 1978. Págs. 519 y 523

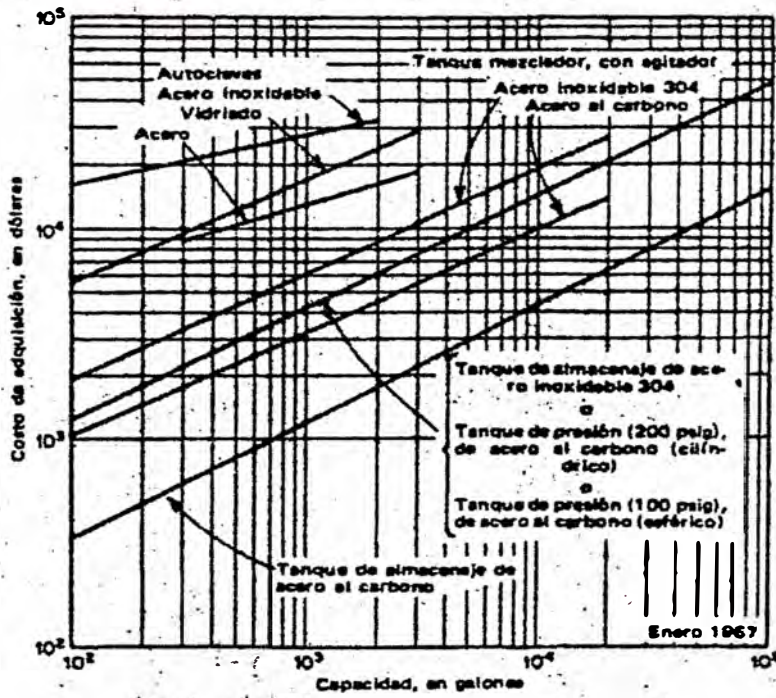


Fig. 13-56. Costo de tanques mezcladores, de almacenaje y de tanques de presión. En el caso de los tanques mezcladores, el precio incluye la unidad accionadora.

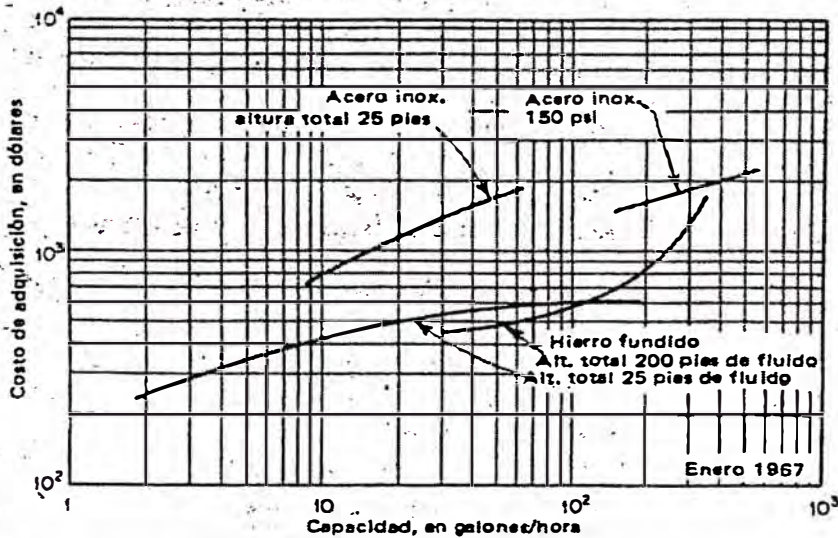


Fig. 13-39. Costo de las bombas alternativas utilizadas para líquidos cuyo peso específico se encuentra comprendido entre 0,8 y 1,3. El precio incluye la bomba y el motor.

Tomado de *Diseño de plantas y su evaluación económica para Ingenieros Químicos* Peters & Timmerhaus 2da Ed. Buenos Aires 1978. Págs. 499 y 485

8.6 CÁLCULO DEL TIR Y EL VAN:

Para el Cálculo del Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno, contaremos con los siguientes valores, obtenidos de las tablas de las Figuras 5.4 y siguientes:

INVERSIÓN INICIAL	900,000.00	US\$
CAPITAL DE TRABAJO INICIAL	241,200.00	US\$
CANTIDAD A PRODUCIR	7200.00	TM / año
PRECIO DE VENTA PROPUESTO	800.00	US\$ / TM
COSTO DE FABRICACIÓN	688.38	US\$ / TM
IMPUESTOS	40%	Sobre Utilidades

Para la Depreciación se ha definido un plazo de 5 años en los cuales las tasas para la depreciación de maquinaria y equipo se asumen como 25%, 30%, 20%, 15% y 10%.

El Capital de Trabajo Inicial no será salvado al final del período, ya que se considera como Préstamo parte de la Inversión Inicial.

Con estos datos se confecciona el siguiente Flujo de Fondos:

PERÍODO	0	1	2	3	4	5
+ VENTAS	0	5 760 000	5 760 000	5 760 000	5 760 000	5 760 000
- COSTOS	0	4 599 936	4 599 936	4 599 936	4 599 936	4 599 936
- DEPRECIACIÓN	0	60 450	72 450	48 360	36 270	24 180
UTILIDAD A. I.	0	1 099 614	1 087 614	1 111 704	1 123 704	1 135 704
- IMPUESTOS	0	439 845	435 045	444 681	449 481	454 282
UTILIDAD D. I.	0	659 768	652 568	667 022	674 222	681 422
+ DEPRECIACIÓN	0	60 450	72 450	48 360	36 270	24 180
- INVERSIÓN	241,800	0	0	0	0	0
- CAPITAL TRABAJO	900,000	0	0	0	0	0
FLUJO DE FONDOS	- 1 141 800	720 218	725 018	715 382	710 492	705 602

Si consideramos un valor de interés pasivo del 6% anual y un 4% de inflación anualizada, convendremos en que una tasa del 10% para el cálculo del Valor Actual Neto será adecuada, así:

PERÍODO	0	1	2	3	4	5
FLUJO DE FONDOS	- 1 141 800	720 218	725 018	715 382	710 492	705 602
VAN	- 1 141 800	654 743	599 188	537 478	485 275	438 123
SALDO (RECUPERO)	0	- 487 057	112 131	649 609	1 134 884	1 573 007

Esto es la inversión se recupera en 1 año y aproximadamente $(487\ 057 / 599\ 188) * 12 = 10$ meses un total de 22 meses.

Para el cálculo del TIR, utilizamos el mismo flujo de caja, y se obtiene la solución de la ecuación:

$$0 = \sum (FF)_t / (1 + TIR)^t$$

Con un TIR equivalente a 56% bastante más interesante que el que cualquier banco podría ofertar, es más el valor compite con los de las Bolsas en ascenso de Chile y Perú.