

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE MINERIA

**“ESTUDIO DE LOS EXPLOSIVOS INDUSTRIALES  
Y SU APLICACION EN LA MINERIA”**

**T E S I S**

**PARA OPTAR EL TITULO DE  
INGENIERO DE MINAS  
GUIDO HURTADO SMITH**

**PROMOCION 1963 “Luis Briceño Arata”**

**LIMA - PERU**

**1969**

A la memoria de mi inolvidable madre  
quien en todo momento me alentó para  
la culminación de mi carrera.

A mi querida esposa quien me alentó en la  
culminación de mi tesis.

Mi sincero agradecimiento :  
Al señor Decano Ing<sup>o</sup> Lucio Aguilar  
Condemarín y a los Catedráticos de  
la Facultad quienes con sus sabias  
enseñanzas han contribuido en mi  
formación profesional.

Mi agradecimiento:

Al Ing° Luis Briceño Arata  
por su dirección en el pre  
sente trabajo.

Mi agradecimiento:

Al Ing<sup>o</sup> Francisco Sotillo Palomino  
Jefe del Departamento de Minas, por  
haber revisado el presente trabajo.

Mi agradecimiento:

A las siguientes Compañías Mineras que me han  
brindado facilidades, y sin cuya ayuda no hu-  
biera podido culminar el presente trabajo.

Cerro de Pasco Corporation

Luossavaara Kiisumavaara S.A.

Minas de Cobre de Chapi S.A.

I N D I C E

ESTUDIO DE LOS EXPLOSIVOS INDUSTRIALES Y SU APLICACION

EN LA MINERA

Pág. No.

PROLOGO

CAPITULO I

CARÁCTERISTICAS DE LOS EXPLOSIVOS . . . . . 1

- 1.- Densidad.
- 2.- Energía.
- 3.- Velocidad de Detonación.
- 4.- Volumen gaseoso.
- 5.-Temperatura de Detonación.
- 6.-Tamaño y Duración de la llama de explosión.
- 7.-Balance de oxígeno.

CAPITULO II

PIROFISICA PRACTICA . . . . . 25

- 1.- Objeto de las pruebas empíricas.
- 2.- Sensibilidad al choque.
- 3.- Sensibilidad al cebo.
- 4.- Ensayo de combustión.
- 5.-Ensayo de Explosión.
- 6.- La prueba de Trauzl.
- 7.- Método Francés.
- 8.- Prueba práctica de cebos.
- 9.- Estudio de la conservación.- Estabilidad Física.

CAPITULO III

Pág. No.

EL CONCEPTO DE VIVACIDAD . . . . . 41

- 1.- Coeficiente de vivacidad.
- 2.- Teorema de la velocidad de Emisión.
- 3.- Progresividad Química.
- 4.- Determinación de la velocidad específica y la vivacidad.

CAPITULO IV

DETONACION . . . . . 47

- 1.- Definición.
- 2.- Concepto de onda crítica.

CAPITULO V

LA ECUACION DE ESTADO Y EL COVOLUMEN. . . . . 52

- 1.- Generalidades.
- 2.- Ecuación de Estado.
- 3.- Covolumen.
- 4.- Cálculo de la presión y el Covolumen de la Dinamita-Goma.

CAPITULO VI

LA DETONACION DE GASES . . . . . 62

- 1.- Mecanismo de la propagación.
- 2.- Caracteres de la Onda Explosiva.

3.- Otra expresión de la velocidad.

4.- Valor de r.

CAPITULO VII

LA DETONACION DE SOLIDOS Y LIQUIDOS . . . . . 73

1.- Generalidades.

CAPITULO VIII

EXPLOSIVOS INICIADORES . . . . . 79

1.- Generalidades.

2.- Conveniencia.

3.- Principales Iniciadores.

CAPITULO IX

ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ESPECIES EXPLOSIVAS

INDUSTRIALES . . . . . 86

1.- Explosivos Sintéticos y Elementales.

2.- Explosivos Compuestos.

3.- Explosivos Antigrisú.

4.- Explosivos de Seguridad.

CAPITULO X

FULMINANTES Y MECHAS . . . . . 117

CAPITULO XI

GENERALIDADES SOBRE EL USO DE LOS EXPLOSIVOS

EN CATERAS Y MINAS . . . . . 133

GENERALIDADES SOBRE EXPLOSIVOS EN MINERIA

DE OPEN PIT . . . . . 144

CAPITULO XII

EXPLOSIVO ANFO . . . . . 148

CAPITULO XIII

EXPLOSIVO SLURRY . . . . . 170

CAPITULO XIV

NORMAS DE SEGURIDAD EN EL MANEJO DE LOS

EXPLOSIVOS . . . . . 176

APENDICE . . . . . 180

CONCLUSIONES . . . . . 185

BIBLIOGRAFIA . . . . . 188

## P R O L O G O

El transcurso de los años nos ha demostrado, de que el progreso humano se realiza mucho más rápidamente, sin limitaciones de ninguna especie, cuando su inmediata aplicación consiste en la más eficaz destrucción de la humanidad.

Esto se ha repitdo constantemente y de modo especial en el curso de la historia del desarrollo científico de los explosivos. La pólvora -el primero de ellos-, se utilizó durante cuatrocientos años en la guerra, antes de pensarse en el modo como pudiera mejorar el rendimiento del trabajo humano.

Cada etapa en el progreso, cada descubrimiento de un explosivo de mayor potencia, van inexorablemente unidos a un abuso de la fuerza así adquirida. Antes de finalizar el si glo XIX, quizá el mayor movimiento de espionaje internacional fue el organizado para descubrir la naturaleza de la Melinita y de la Pólvora B que poseía en exclusiva el ejército francés y Alfredo Nobel, en un principio informador técnico de Napoleón III, e inventor de la pólvora sin humo; él murió lamentando las consecuencias causadas por sus propios descubrimientos.

Este rápido e incompleto kaleidoscopio retrospectivo resulta ya una anacrónica caricatura de la carrera actual en los explosivos modernos que están demasiado presentes

## II

en la conciencia de todos, para repetir de nuevo su amarga historia.

Y sin embargo, los explosivos han sido también, y continuarán siendo, origen de los mejores frutos del progreso técnico de la humanidad.

La Minería, como fuente de materias primas, hubiera sido impotente para satisfacer las necesidades crecientes del hombre, si se hubiera visto forzada a emplear sólo métodos mecánicos de arranque, e incluso limitada al uso de la pólvora negra, inútil en zonas húmedas, peligrosísima en la explotación del carbón y poco eficaz en cualquier voladura.

Ha de cumplir el Ingeniero de Minas una noble misión: La de justificar el uso de la potencia sobrehumana de los explosivos en beneficio del hombre. Para ello necesita un conocimiento profundo, tanto científico como técnico de la naturaleza y característica de aquellos y más específico de los que concretamente ha de utilizar en su vida profesional.

Estos conocimientos deben establecerse teniendo en cuenta las siguientes razones:

En primer lugar, porque su profesión requiere la explotación más económica de los yacimientos y para ello necesita combinar las técnicas de Laboreo de Minas, con sus conocimientos de Petrografía y Geología, y los de las características tanto físicas como químicas de los explosivos que puede utilizar.

### III

Después, porque si bien es cierto que los explosivos sólo son peligrosos cuando no se les conoce, también es verdad que no bastan unas normas generales, para evitar los accidentes; sino que es preciso que el ingeniero o el técnico reaccione rápidamente ante cualquier situación, sabiendo de antemano cómo la estabilidad, la velocidad de detonación, la temperatura alcanzada, los gases producidos por un explosivo, pueden afectar a la seguridad de sus hombres e instalaciones.

## CAPITULO I

### CARACTERISTICAS DE LAS SUBSTANCIAS EXPLOSIVAS

Lo mismo los explosivos que las pólvoras actúan principalmente por su calor de combustión, y se distinguen de los combustibles ordinarios por el hecho de que el oxígeno necesario para la combustión se encuentra combinado con el propio cuerpo, encadenado al nitrógeno del radical nítrico; por ello los explosivos son combustibles relativamente pobres en energía. La combustión de 1 kg. de nitroglicerina deja en libertad, aproximadamente, 1500 Kcal, mientras que la combustión de 1kg. de bencina desarrolla 1100 kcal. Un automóvil de cuatro plazas que en 100 km. consume 10 litros (7.3 kg) de bencina necesitaría (si el motor del automóvil pudiera funcionar con explosivos) no menos de 32 litros (49 kg) de la más potente dinamita, ó 52 litros (83 kg) de trinitrotoluol, el tan conocido explosivo utilizado como carga de las granadas rompedoras.

El anterior razonamiento, aunque exacto, es tan sólo puramente teórico, y de él no cabe deducir la consecuencia, que al más lego en Química sorprendería, de pretender la substitución de la dinamita por la bencina en la carga de las bombas. A las pólvoras y explosivos les es común la propiedad de que por una acción exterior (excitación, ignición) se convierten repentinamente en gases, con desarrollo de tal cantidad de calor que hace aumentar hasta unas diez mil veces el

volumen inicial del cuerpo. La enorme expansión de los gases formados provoca una presión irresistible en las paredes del recipiente que los contiene, que se traduce en la trituración o cuarteamiento de la piedra que rodea el agujero del barrenado. A esta acción casi repentina de los explosivos se debe, no la cantidad de energía desarrollada, que como antes dijimos es menor que la de muchos combustibles ordinarios, sino el alto potencial de dicha energía, la potencia, que es mucho mayor que en cualquier otro combustible, cuya combustión requiere para su desarrollo un tiempo considerablemente mayor. Podríamos compararlo al efecto de la caída desde cierta altura de una masa de 1 kg. efecto que será muy diferente si se trata de un bloque de madera o de una barra de hierro aguzada cayendo de punta.

La fuerza destructora de un explosivo, su "poder rompedor" depende principalmente de tres factores a saber :

1. La densidad o concentración de carga, expresada en kl./lit.;
2. La energía o capacidad de trabajo, expresada en kcal/kg.;
3. La velocidad de detonación o propagación de la explosión. expresada en m/seg.

Cuando más altos sean los valores de estas características, que pueden determinarse experimentalmente en todo explosivo, tanto mayor será su facultad de destrucción o

poder rompedor.

### 1. Densidad

La densidad absoluta o peso específico absoluto nos indica el peso del explosivo puro, cristalizado, contenido en un volumen de un centímetro cúbico o de un litro, no contando en este volumen los huecos o espacios intermedios de aire. Esta es la máxima densidad imaginable o densidad de cristal, que para los explosivos constituye un dato de importancia, pues de él depende la densidad de carga. Esta última, también dato muy importante, nos dá a conocer el peso de explosivo, más o menos comprimido, contenido en un litro, y siempre será menor que la densidad de cristal, para aproximarse a la cual se necesitarían enormes presiones de carga, como de 4000 a 4500 kg/cm<sup>2</sup>. Así por ejemplo, la densidad de cristal del trinitrotoluol (trinitrotoluol puro) es de 1,67, mientras que el producto fundido, por el aire que ha quedado incluido entre los cristales, sólo tiene una densidad de 1,54; la máxima densidad de carga posible, de 1,61 a 1,615, requiere una presión de 3500 kg/cm<sup>2</sup>. o la agitación incesante, perturbadora de la cristalización, al solidificarse la masa fundida.

La importancia de la densidad como característica de un explosivo, quedará patente con el siguiente ejemplo: el calor de combustión del explosivo de aire líquido llamado oxiliquita importa 2000 kcal/kg, mientras que el de la dinamita

gelatina es tan sólo de 1600 kcal/kg. A igualdad de peso posee, pues, la oxiliquita un 25 % más de energía que la dinamita gelatina, pero cargadas en cartuchos o introducidas en el agujero de un barreno, se invierte la consecuencia por las diferentes densidades de carga de 1,1 para la oxiliquita y de 1,5 para la gelatina, resultando una energía de 2200 kcal por litro de oxiliquita y de 2400 kcal por litro de gelatina explosiva.

## 2. Energía (calor de detonación)

La energía, medida en Kcal/kg. como calor de detonación (calor de explosión), es la característica más importante de toda sustancia explosiva, pues de la magnitud del calor desarrollado depende la fuerza, la presión y, por consiguiente, el trabajo destructor de la expansión de los gases desprendidos por el explosivo. Estos gases son el agente de conversión de la energía térmica en energía mecánica, creando la fuerza impulsora ( $\int P dt$ ) que desarrolla el trabajo rompedor.

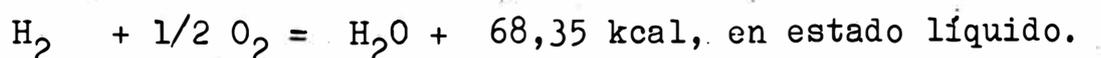
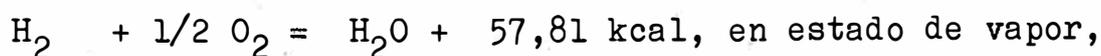
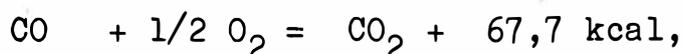
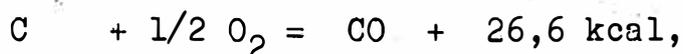
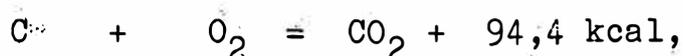
El calor de detonación puede determinarse experimentalmente con el calorímetro de explosivos o, lo que es mejor, calcularse por la ecuación de descomposición. Los métodos de determinación prácticos (análisis de gases) y teóricos (termoquímicos y termodinámicos) con esto relacionados fueron desarrollados principalmente por A. Schmidt en el "Chemisch-Technischen Reichsanstalt" de Berlín. Para este cálculo

lo se necesitan los calores formación de las sustancias que componen el explosivo y los calores de combustión de los elementos carbono e hidrógeno que siempre se presentan en los componentes del explosivo, y de los no tan comunes azufre, fósforo o metales ligeros. Para establecer la sencilla ecuación de detonación (combustión) de la nitroglicerina, necesitamos considerar las siguientes cifras:

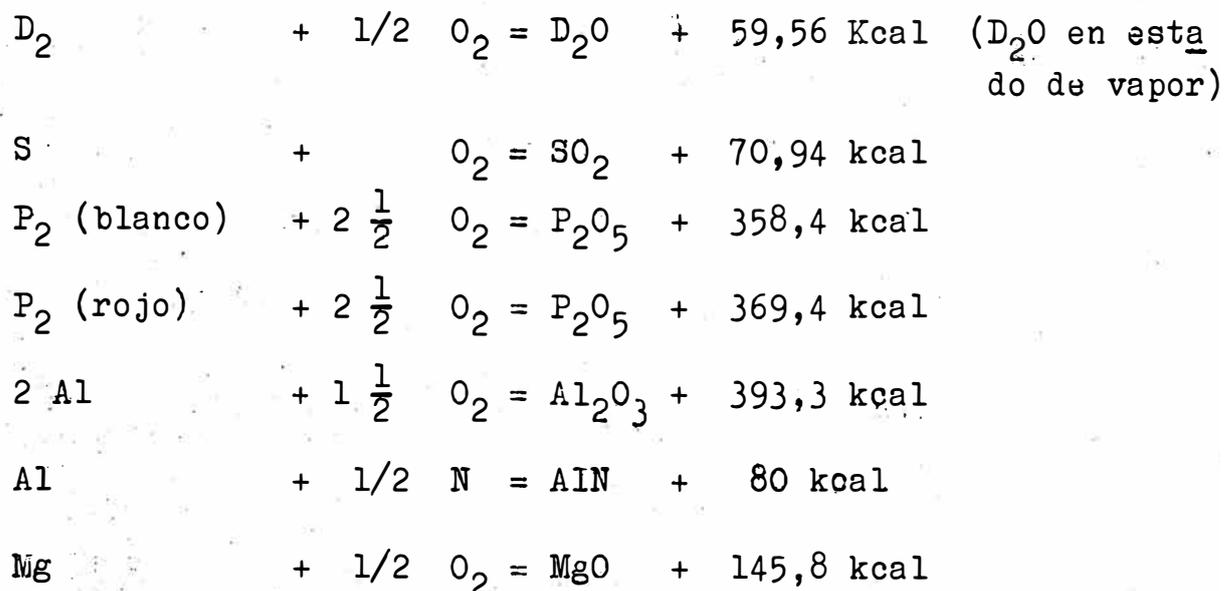
Peso molecular de la nitroglicerina, 227,094; calor de formación  $+ 88,4$  kcal/mol ó  $+ 389,3$  kcal/kg.

Si los calores de combustión o, lo que es lo mismo, los calores de formación de los óxidos, están referidos al kilogramo, tendrán que ser convertidos para los cálculos estequiométricos al átomo gramo o a la molécula-gramo (mol).

Calores moleculares de combustión a presión constante ( $Q_p$ ) :



El calor molecular de vaporización del agua a  $20^\circ$  importa, pues,  $68,35 - 57,81 = 10,54$  kcal (y  $9,71$  kcal a  $100^\circ$ ).



El calor de detonación de la nitroglicerina se calcula por la siguiente ecuación de descomposición:



$$4 \times 227,094 = 12 \times 94,4 + 10 \times 57,81 - 4 \times 88,4$$

$$908,376 \text{ gramos} \dots \dots \dots 1357,3 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ kg} \dots \dots \dots 1494,2 \text{ kcal a presión constante}$$

Este calor de detonación ( $Q_p$ ) se refiere a la explosión al aire libre con el agua formada en estado de vapor. Si se verifica la explosión a volumen constante, como aproximadamente ocurre en el agujero de un barreno, no ejercen los gases al dilatarse trabajo alguno contra la presión atmosférica, y el calor de detonación es algo mayor, aproximadamen-

te 0,582 kcal por mol. de gas (desde 20°). Tendremos, pues :

$$Q_v = Q_p + (12 + 10 + 6 + 1) 0,582 = 1357,3 + 16.88 = 1374,18 \text{ kcal para } 908,376 \text{ gramos, o sea } 1512,8 \text{ kcal/kg con el agua en estado de vapor.}$$

No es raro, con el engañoso fin de indicar más al tos calores de detonación, referir éstos al estado final, con el agua formada condensada, es decir "líquida", aunque sabido es que el trabajo de destrucción de dicha agua se debe a la expansión de la misma en estado de vapor. El cálculo del calor de detonación con agua "líquida" es algo más complicado, pues al más alto calor de combustión por la condensación del agua se añade además el trabajo de la presión atmosférica en el volumen del vapor, que prácticamente desaparece al condensarse, lo que representa un calor adicional de  $10 \times 0,582$  kcal:

$$Q_p \text{ agua líquida} = 12 \times 94,4 + 10 \times 68,35 - 4 \times 88,4 + 5,82 \\ 908,376 \text{ gramos} = 1468,52 \text{ kcal ó } 1616,6 \text{ kcal/kg.}$$

Para  $Q_v$  agua líquida, se obtiene, puesto que la explosión se verifica a volumen constante, sin la influencia de la atmósfera:

$$12 \times 94,4 + 10 \times 68,35 - 4 \times 88,4 + (12 + 10 + 6 + 1) \times 0,582 = \\ 1479,6 \text{ kcal/908,376 gramos ó } 1628,8 \text{ kcal/kg.}$$

En los explosivos con "oxígeno desequilibrado", que no se descomponen con oxidación completa, como sucede a la nitroglicerina, sino que en los productos de la combustión se presentan gases combustibles, como el óxido de carbono, e incluso carbono elemental en forma de hollín, el cálculo térmico es mucho más complicado, a lo que todavía se añade el que la descomposición del explosivo depende de las condiciones exteriores (medio y densidad de carga), pudiendo por ello variar los productos de la explosión de un caso a otro.

### 3. Velocidad de detonación

La velocidad de detonación es la característica más impresionante de un explosivo; se mide en metros o kilómetros por segundo y nos indica la rapidez con que a partir de un punto de la masa del explosivo se propaga la descomposición de éste. Si nos dicen que la velocidad de detonación del trinitrotolueno es de 6800 m/seg. esto significa que si llenamos con trinitrotolueno fundido, sin dejar huecos, una tubería de 6800 m. de largo y provocamos la explosión en uno de sus extremos, la onda detonadora tardará un segundo en llegar al otro extremo, oyéndose la explosión durante 21 ó 19 segundos, con sonido decreciente o creciente, según que el observador se sitúe en el extremo de dar fuego o en el opuesto.

Cuanto más alta sea la velocidad de detonación tanto mayor será la acción destructora (poder rompedor) sobre to

do lo que al explosivo rodea. La gasificación y el desarrollo de la presión se verifican tan rápidamente que, aún encontrándose el explosivo sin "ataque" (sin nada que lo comprima), destruye/<sup>cuanto</sup> a su alrededor se encuentra, pues el aire que lo envuelve no tiene tiempo para retroceder y actúa como si fuera una sólida pared. Las velocidades de detonación de los explosivos industrialmente utilizados están comprendidas entre 3000 y 8000 m/seg, correspondiendo a los explosivos ultrarrrompedores de zona de velocidad de 7500 m/seg . en adelante. La más alta velocidad de detonación medida correspondió a la mezcla tetranitrometano-toluol, con 9300 m/seg. A igualdad de energía, el aumento de la velocidad de detonación intensifica la acción del explosivo, lo mismo ocurre con el efecto de la caída de una barra de acero que, sin alterar le el peso, se aguza cada vez más por la punta con que percute; su acción penetrante, al irse localizando cada vez más, aumentará.

La velocidad de detonación de cualquier explosivo incluso del más rápido, puede medirse experimentalmente con mucha exactitud, con tanta que no es necesario experimentar más que con trayectos de algunos centímetros. Por lo general se utilizan barras de 20 a 100 cm. en razón de que las cargas fundidas o prensadas no son del todo homogéneas y las pequeñas variaciones de velocidad que ello pudiera ocasionar se reparten así en un trayecto de cierta extensión, obteniéndose

dose una velocidad promedio, es decir, compensada. Tan sólo con los fulminantes o explosivos iniciadores se contenta uno con barritas de a lo sumo 10 cm. de largo, por lo peligroso que resulta la operación de la carga y el apriete de la misma en los tubos.

El cronógrafo de chispa de SIEMENS, con zona de medición desde  $1/10$  hasta  $1/1\ 000\ 000$  de segundo, fue utilizado durante varios decenios como instrumento universal para estas mediciones. Un circuito eléctrico establecido a través de la barra de explosivo es interrumpido sucesivamente por la explosión en dos puntos, haciendo saltar dos chispas sobre la superficie de un tambor recubierto con negro de humo y animado de alta velocidad de rotación. De la distancia entre las marcas ocasionadas por las dos chispas y de la velocidad periférica del tambor, se deduce la velocidad de detonación. Más sencillo y más aplicado hoy es el cronógrafo óptico. La barra, al hacer explosión, se fotografía sobre una película que recubre al tambor giratorio. El cálculo se practica lo mismo que con el cronógrafo de chispa, pero, además, por la forma recta o curva de la línea fotografiada puede saberse si la velocidad de detonación ha sido constante, irregular o progresiva, dentro del trayecto de medición.

El principio del cronógrafo óptico, igual que el del cronógrafo de chispa, se comprende fácilmente a la vista de la figura 1).

La barra o "trayecto" de explosivo AB (a la derecha de la figura) de longitud L, toma fuego en A y detona en el tiempo t hasta el extremo B. La imagen de la explosión sobre la película, reducida e invertida por el objetivo fotográfico, sería la L' con el tambor en reposo, y la A'B' con el tambor girando en el sentido que marcan las flechas. Si c es la velocidad periférica del tambor y l el corrimiento de la imagen en el tiempo de detonación, la velocidad de detonación se deducirá por la fórmula.

$$D = \frac{L \cdot c}{l}$$

Experimentando con una barra de trilita de 100 cm. de largo con la máxima velocidad periférica del tambor de 200 m/seg. (con velocidades mayores se rompe la película por la fuerza centrífuga) y con un corrimiento medido de 30.8 mm. resultará la velocidad de detonación.

$$D = \frac{1 \times 200}{0,0308} = 6\ 500 \text{ m/seg.}$$

En la figura 2 se reproduce la imagen de la detonación de 100 cm. de pentrinita con velocidad periférica del tambor de 100 m/seg. Como puede verse, un error de medición en el corrimiento de 0.1 mm. nos dará una variación del 0,8% en la velocidad de detonación medida, lo que deberá tenerse muy en cuenta si se trata de comparaciones de precisión.

En la figura 1, a la izquierda, se da una imagen

de detonación con explosión iniciada en el punto medio A del trayecto, propagándose hacia los dos extremos B y D y con tres velocidades diferentes, siendo la más rápida la correspondiente al tiempo  $t/4$  con su imagen más inclinada o de menos corrimiento C'D'.

Para los procesos muy rápidos, en los que se desee un corrimiento más acentuado de la imagen de la detonación, se utiliza el cronógrafo inglés de cámara con espejo giratorio y película fija, dispuesta esta última sobre la parte cóncava de un segmento cilíndrico). Sin embargo, este cronógrafo también tiene su límite, por la escasa luz que proporciona la estrecha ranura requerida para la nitidez de la imagen.

Por último, citaremos el método indirecto de DAUTRICHE, el más barato y cómodo, pero que exige un "testigo" (cuerda detonante de hasta 2 m de longitud) con velocidad de detonación conocida .

La velocidad de detonación es altamente influenciada por la densidad del explosivo, alcanzando, por lo general, su valor máximo y constante con el más alto peso de carga posible por litro. Esto sólo es válido para los compuestos químicos definidos, cristalizados y puros; en las mezclas explosivas con nitrato amónico y adiciones coloides, como la dinamita de seguridad y la gelatina explosiva, se presenta la máxima velocidad de detonación entre una densidad media y un lí-

mite superior, pasado el cual desciende; por ello ocurre a veces en los taladros muy profundos con larga carga, que la onda de detonación, que va comprimiendo el explosivo que queda debajo de la masa que va detonando, hace aumentar la densidad de carga, llegándose a veces a un estado de equilibrio que deja sin hacer explosión a las capas más profundas. Un ejemplo de la tendencia contraria lo tenemos en la autoaceleradora dinamita de base inerte, que en los primeros 25 cm. presenta una velocidad de detonación de 2 400 m/seg. desde los 25 hasta los 60 cm, 2 700 m/seg, y a partir de aquí aumenta hasta la máxima y constante velocidad de detonación de 6 100 m/seg. En más pequeña escala, también influyen en la velocidad de detonación la intensidad de la iniciación, la resistencia de la envoltura y el diámetro del cartucho, si bien estos factores sólo influyen en forma sensible en algunos explosivos aislados o grupos de explosivos. Particular es el comportamiento de la dinamita al "alterarse", por el almacenamiento, en su sensibilidad, con disminución progresiva de la velocidad de detonación, especialmente con clima caluroso y húmedo (trópicos), llegando a fallar y a resultar inutilizable.

La propagación segura y uniforme de la detonación, para determinada masa de explosivo, depende de un diámetro crítico, pues al pasar a diámetros inferiores la explosión se va haciendo cada vez más lenta hasta llegar a la extinción

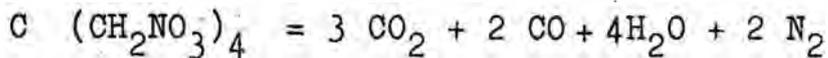
completa). Este "diámetro crítico" es una característica de todo explosivo y puede determinarse experimentalmente con cargas cilíndricas de diversos diámetros, o mejor aún con cargas cónicas, a las que se comunica el fuego por la base para que la onda de detonación se propague hacia el vértice. Si el proceso de la explosión se registra en un veloz tambor giratorio de película fotográfica o en la cámara de espejo rotativo, puede deducirse el curso de la propagación de la onda de detonación para cada punto de la longitud del cartucho.

Característicos de todo explosivo son también los tres siguientes factores: volumen gaseoso desarrollado, temperatura de detonación o explosión y temperatura, tamaño y duración de la llama de explosión.

#### 4. Volumen gaseoso (volumen normal)

El volumen de los gases producidos (exhalación), por 1 kg. de explosivo, convertido a la temperatura de 0° y a la presión de 760 mm. de mercurio y expresado en litros, es el llamado volumen específico de los gases ( $v_0$ ) y también volumen normal. Este volumen no depende exclusivamente de la ecuación de descomposición, sino también de la forma de dar fuego, de la densidad de carga y del ataque. El volumen normal puede determinarse experimentalmente con la bomba de presión, pero el cálculo por la ecuación de descomposición es mucho más sencillo.

Para el ultrarrompedor tetranitrato de pentaeritrita se obtiene de la ecuación de descomposición (prescindiendo de la variación del "equilibrio de los gases" por la presión, que modifica muy poco el volumen absoluto):

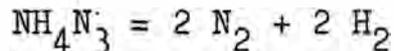


316,15 gramos  $(3 + 2 + 4 + 2) \times 22.415 = 246,6$  litros

1 kg desarrolla, por consiguiente, 780,0 litros de gases a 0° y 760 mm.

Sólo hay pues que multiplicar el número de moles de gases producidos en la explosión por el conocido volumen de un mol (para los gases perfectos 22,415 litros) y así se obtendrá el volumen normal (al nivel del mar).

El máximo volumen de gases lo produce la azida amónica.



Con 1 493 litros por kilogramo. Para el nitrato de guanidina se calculan 1 101 litros/kg. y para la trimetilentrinitramina, el más rico en gases de los explosivos altamente rompedores, 982 litros/kg, mientras que la mezcla de descomposición sin residuo nitrato amónico-trinitrotol sólo proporciona 892 litros/kg. de gases de la detonación.

El llamado volumen de detonación o de explosión ( $v_t$ ), a consecuencia de la dilatación ocasionada por el desprendimiento de calor, viene a ser como unas diez veces el vo

lumen normal. Teóricamente se calcularía por la fórmula.

$$V_t = V_0 \frac{273 + t}{273},$$

siendo  $t$  la temperatura de detonación.

Para la nitroglicerina, con un volumen normal  $V_0 = 715,6$  litros y una temperatura de detonación  $t = 4910^\circ$ , resultaría:

$$v_t = 715,6 \frac{273 + 4910}{273} = 13594 \text{ litros.}$$

Esta cifra nos indicaría el máximo volumen posible de los gases dilatados por la explosión, pero es un valor puramente teórico que en ningún caso puede alcanzarse en la práctica.

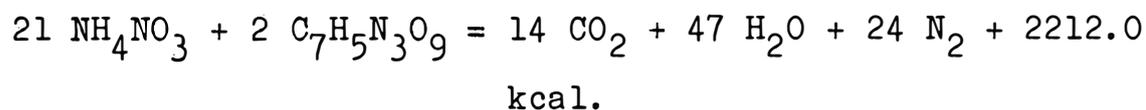
Respecto a los volúmenes hay que observar que aumentarán con la altura del lugar (descenso de la presión atmosférica). Así por ejemplo, en Zurich, con una presión de 720 mm., será el volumen 1,065 veces mayor que al nivel del mar, y en el alto valle de Engadin (610 mm.). 1,246 veces, lo que se traducirá en mayor intensidad del "rebufo" de la explosión.

Los explosivos con gran volumen normal rinden más que los que desarrollan menor volumen gaseoso, en el supuesto de que las restantes características sean aproximadamente iguales.

### 5. Temperatura de detonación.

La temperatura de detonación es aquella que alcanzan los gases de la explosión en virtud del repentinamente desprendido calor de descomposición del explosivo. Las temperaturas de detonación de los explosivos rompedores están comprendidas entre los 2 500 y los 6 000°.

La temperatura de detonación  $t$  es igual al calor desprendido en la detonación dividido por el calor específico medio del volumen de gases formado. Sin entrar en más detalles, vamos a aclarar lo expuesto con el cálculo de la temperatura de detonación, de la conocida mezcla de oxidación completa formada por el explosivo de nitrato amónico "aldorfita" con 21,27 % de trinitrotolulol:



$21 \times 80,05 + 2 \times 227,134 =$   
 $= 2 135,32 \text{ gramos} \dots \dots 2 212,0 \text{ kcal} = 2 212 000 \text{ cal} = Q_v$   
 1 kg... 1 035,9 kcal (a vol. const., con el agua en estado de vapor).

Los calores específicos medios de los gases de la explosión a volumen constante ( $c_v$ ) entre 0° y una temperatura (supuesta) de 2 9000° son:  $\text{CO}_2$  11,58 cal/mol,  $\text{H}_2\text{O}$  9,03 cal/mol,  $\text{N}_2$  6,28 cal/mol, luego el calor necesario para elevar en 1° la temperatura del total de gases formados, será :

$$14 \times 11,58 + 47 \times 9,03 + 24 \times 6,28 = 737,25 \text{ cal} = \Sigma_d$$

$$\text{resultándole } t = \frac{Q_v}{\Sigma_d} = \frac{2\,212\,000}{737,25} = 3\,001^\circ$$

Como el cálculo ha sido basado en la temperatura de  $2900^\circ$ , la temperatura de detonación buscada será aproximadamente la media aritmética entre  $2900^\circ$  y  $3001^\circ$ , es decir  $2\,950^\circ$ . Para aumentar la exactitud "horquillando" valores, podría partirse ahora de la temperatura de  $2950^\circ$  y rehacer el cálculo con los calores específicos medios entre  $0^\circ$  y dicha temperatura. La temperatura absoluta de detonación que con frecuencia aparece en los cálculos (ecuación del ABEL) es  $T = t + 273^\circ$ , o sea en nuestro caso,  $2950^\circ + 273 = 3223^\circ$

MURAOUR Y AUNUS han elaborado recientemente una tabla de calores específicos moleculares medios para temperaturas desde  $0^\circ$  hasta  $6\,000^\circ$  en la que junto a los gases corrientes de la detonación han sido incluidos el C. (hollín) y el OH.

El cálculo de temperaturas de detonación aumenta en inseguridad con valores crecientes, porque los calores específicos medios de los gases más allá de los  $3\,500^\circ$  sólo se conocen aproximadamente y porque además los conocimientos que poseemos acerca de las disociaciones exotérmicas (desdoblamiento molecular) en las altas regiones de presión y temperatura son incompletos. Sería pues un error aceptar las temperaturas de detonación reducidas al bajo nivel de las tempe

raturas de combustión calculadas. Si por ejemplo, la temperatura de la llama del gas detonante (soplete oxhídrico) se indica como máximo en  $2700^{\circ}$ , porque a esta temperatura sólo el 61 % del agua producida puede existir y el resto se compone de  $H_2$  y  $O_2$  inalterados junto con los altamente termoabsorbentes (rebajadores de temperatura) elementos de disociación H, O y OH, ello es válido a la presión atmosférica normal, mientras que las disociaciones a las presiones de detonación, por lo menos cincuenta mil veces más altas, son mucho menores, o sea que las temperaturas de explosión no descienden, ni con mucho, en aquella proporción. Hasta qué punto se aproxima el cálculo y la realidad a los  $5000^{\circ}$ , no puede todavía precisarse. Sin embargo, las temperaturas de explosión hasta los  $4000^{\circ}$  representan valiosos términos de comparación, en particular para las pólvoras sin humo.

Por otra parte, ni las temperaturas de detonación, ni los calores de explosión, ni los volúmenes gaseosos, pueden considerarse como valores fijos, pues el desarrollo de la explosión depende de la densidad del explosivo, de la intensidad de la iniciación y de la resistencia de la envoltura, o sea que varía de un caso a otro.

Además de la luz que desprenden los gases de la detonación, calentados a elevada temperatura, otra luminosidad, característica particular de los explosivos rápidamente detonantes que se descomponen con oxidación completa, que se atri

buye a la rápida elevación por la detonación de la temperatura del aire circundante. Este efecto luminoso no es pues debido a la incandescencia de los gases de la explosión sino al aire adyacente que adquiere una temperatura muy superior a la detonación. La onda de compresión ocasionada por la explosión, no actúa con carácter adiabático (reversible), sino que se trata de una "compresión de HUGONIOT" de carácter irreversible. Esta va acompañada de una elevación de temperatura múltiplo de la que se presenta en la compresión adiabática. A una compresión del aire el décuplo corresponde en este caso una temperatura de aproximadamente  $10\ 000^{\circ}$ ). Así, la mezcla, de sin par poder rompedor, tetranitrometano) Toluol produce un relámpago de 3 a 4 millonésimas de segundo con temperaturas calculadas de  $27\ 00^{\circ}$  en el argo y de  $10\ 500^{\circ}$  en los gases diatómicos del aire. La máxima luminosidad la da pues el gas raro monoatómico argo con su pequeño calor específico, lo que comprueba que el origen de la luminosidad se encuentra en el aire ambiente. Las discusiones sobre este curioso y enigmático fenómeno están aún sobre el tapete.

#### 6. Tamaño y duración de la llama de explosión.

Desde hace tiempo se sabe que el peligro en las minas de carbón (explosiones de grisú y de polvo de carbón) está íntimamente relacionado con la temperatura y la duración de las llamas lanzadas por el explosivo. Hoy disponemos de medios que, lo mismo que los cronógrafos ópticos, registran la

explosión en una película giratoria que permite calcular la longitud y la duración de la llama. La máxima extensión superficial de ésta puede verse también en una placa fotográfica ordinaria, y de esta forma se ha comprobado llamas de 2 m en el ácido pícrico, de 1,15 m en la pólvora negra y de 0,1 m en la dinamita de seguridad del 65%, mientras que los explosivos de seguridad contra el grisú sólo dan llama de pocos centímetros. Mayores diferencias que en el tamaño se encuentran en la duración de la llama, por ejemplo: de 0,4 a 0,8 milisegundos en las mezclas de seguridad y de 1,5 segundos (o sea unas dos mil veces más) en la pólvora negra.

#### 7. Balance del oxígeno.

Otra característica importante, aunque sólo desde el punto de vista químico, de todo explosivo y también de las pólvoras es el balance del oxígeno, que nos indica el número de gramos de oxígeno que en 100 gramos de explosivo faltan para la combustión completa o sobran de la misma. El balance del oxígeno hace posible una valiosa clasificación de los explosivos dentro de grupos afines, pues la energía, el poder rompedor y también la sensibilidad a la percusión depende de aquél. Explosivos pobres de oxígeno y de cuya explosión resultan gases inflamables en el aire, tienen que ser excluidos de las minas de carbón, tampoco son admisibles en trabajos subterráneos los explosivos y pólvoras que exhalan óxido de carbono, por el peligro de envenenamiento que representan.

Las diferencias de carácter químico entre los explosivos de nitratos alifáticos y los explosivos nitroaromáticos queda expresada elocuentemente con los balances de oxígeno. ¿Por qué, por ejemplo, el monitrato de glicerina con defecto de oxígeno del 52,5 % no es ya un explosivo, mientras que el trinitrotoluo<sup>l</sup> detona con viveza aún con -74% ?Porque los calores de formación de los hidrocarburos fundamentales tienen signos contrarios, positivo, es decir exotérmico, en el alifático propano, del que procede la glicerina, y negativo, endotérmico, en el aromático toluol, cuyo núcleo benzólico tiene tendencia a la descomposición por la tensión interna. Los calores de formación del propano y del toluol son respectivamente de + 615 y - 52 kcal/kg.

Si bien la determinación de la mezcla ideal en los explosivos de dos componentes es fácil deducir por la ecuación química de combustión, el problema se complica cuando intervienen más componentes. Los dos ejemplos que siguen nos harán ver cómo se simplifican los cálculos valiéndose de los balances del oxígeno:

a) Cálculo de unas gelatinas explosivas de combustión completa (descomposición ideal) empleando nitroglicerina químicamente pura y nitroglicerina industrial y el mismo algodón colodión del 12,37 % N, correspondiente a un defecto de oxígeno del 36.06 %.

Admitiendo unos excesos de oxígeno del 3,52 y del

2,68 % para la nitroglicerina pura y para la industrial con 4 % de dinitroglicerina basta resolver las siguientes proporciones:

$$(3,52 + 36,06) : 36,06 = 100 : x$$

91,11 % de nitroglicerina pura

8,89 % de algodón colodión

$$(2,68 + 36,06) : 36,06 = 100 : x$$

93,08 % de nitroglicerina industrial

6,92 % de algodón colodión

es decir, casi un 2 % menos de algodón colodión en el segundo caso, lo que comercialmente tiene su importancia.

b) Balance del oxígeno de una dinamita de seguridad del 25%, antes muy utilizada en Francia y en Suiza:

23,5 % nitroglicerina	+ 3,52 X 0,235 = + 0,827
1,5 % algodón colodión (12,2 % N)	- 37,0 X 0,015 = - 0,555
21 % tri-líquido (17,2 % N)	- 90,1 X 0,21 = + 18,92
55,5 % nitrato amónico	+ 19,99 X 0,555 = + <u>11,094</u>
Balance del oxígeno	- 7,55%

Este explosivo con balance negativo desprenderá al detonar una pequeña cantidad del óxido de carbono y sólo puede ser utilizado en galerías bien ventiladas. Las composiciones actuales tienen un pequeño exceso de oxígeno, por lo menos el 0,5 %.

Si en una mezcla explosiva se presentan solamente componentes definidos por el contenido de nitrógeno (algodón

gelatinizado, nitrocompuestos aromáticos líquidos), los correspondientes balances del oxígeno entre las combinaciones de más baja y de más alta nitración tienen que ser determinados gráficamente.

Lo mismo que en las mezclas detonantes de gases y polvo, también en las mezclas explosivas líquidas y sólidas existen una más o menos amplia zona de dosificación, que no puede calcularse, sino que hay que determinar experimentalmente. Así por ejemplo, la muy rompedora mezcla explosiva de trinitrometano-toluol, cuya dosificación óptima es 86,46 % 13,54 % no admite menos del 12 ni más del 60 % de toluol.

## CAPITULO II

PIROFISICA PRACTICA

1. Objeto de las pruebas empíricas .- Todas las características de los explosivos, se pueden medir, salvo la temperatura, que en el estado actual de la técnica resulta imposible medir directamente, todas las restantes pueden, medirse con ayuda de instrumentos adecuados; pero en los laboratorios de explosivos se determinan, además de las características racionales, otras cifras empíricas o prácticas, en las que, como en el efecto útil que puede producir una carga explosiva, se combinan el potencial, el volumen específico, la densidad, la fuerza específica y la velocidad de detonación, dando una idea del efecto del explosivo sin necesidad del empleo de fórmulas. La prueba Trauzl es tal vez la más interesante de estas pruebas, de las que sólo mencionaré las más importantes.

2. Sensibilidad al choque .- Un decigramo de explosivo, en polvo o en la forma comercial de empleo, colocado en una capsulita de acero deformable y cubierta con una lámina del mismo metal, se coloca sobre el yunque (fig. 2), que lleva el aparato entre las guías por los que desciende la maza percutora, de dos kilogramos.

La explosión por choque depende, en buena parte, de la naturaleza de las superficies en cuyo contacto se en-

cuentra el explosivo, por lo que, a cada ensayo, debe renovarse la capsulita y tapa. También tiene marcada influencia el grado de pureza del explosivo y su granulación; así, por ejemplo (con la maza standard de 2 kgs), la tetranitrometilina bruta detona en el cincuenta por ciento de los ensayos con una altura de caída de 1,15 m. cuando los granos pasan por los cedazos de seda números 3 y 5 y la sensibilidad sube hasta elevar la altura a 1.40 m., si a los granos se les disminuye de tamaño para que pasen por el tamiz número 5 y p queden retenidos en el número 8. El mismo explosivo purificado por recristalización y en la granulación que pasa por el tamiz 3 y es retenido por el 5, precisa ya de 2.20 metros de altura de caída; estos ejemplos son suficientes para poner de relieve cuán normalizado ha de estar el ensayo para que los resultados sean comparables. Con las reservas expuestas, trascribimos la tabla de sensibilidad al choque expresada en kilográmetros, tal como ha sido comprobada en los laboratorios de la Compañía L.K.A.B. (Mina Kiruna - Suecia ).

Fulminato de Mercurio	0,5	kilográmetros
Trinitrorresorcinato de plomo	0,6	"
Nitruro de plomo	1,1	"
Nitroglicerina	0,4	"
Pentrita	0,8	"
Exógeno	1,2	"
Trinitrorresorcina	2,4	"

Tetranitrometilánilina	3,0	kilogramos
Acido pícrico	6,0	"
Trinitrotolueno	8,0	"
Dinamita	0,6	"
Dinamita-goma	0,65	"
Grisú-dinamita clorurada	1,70	"
Cloratita	1,0	"
Explosivo Favier	10,0	"

3. Sensibilidad al cebo .- La medida de la sensibilidad de un explosivo al cebo consiste en determinar el tipo más débil de detonador que asegura, en identidad de condiciones, la explosión completa de un petardo.

Se opera al aire libre, asegurándose de poder encontrar y recoger los fragmentos de petardo que no hayan detonado, observándose igualmente si el petardo tirado sobre una plancha de plomo marca sobre la misma, al detonar, una marca de sus mismas dimensiones.

Difiere este método, esencialmente, de las condiciones prácticas de utilización de los explosivos, sobre todo en las explotaciones de minas y canteras), en las que el atraque facilita la detonación completa, pero proporciona con ello un amplio margen de seguridad, pues si obtenemos detonaciones completas al aire libre, tendremos la certeza de que con el mismo cebo lograremos idénticos resultados en los trabajos de minas, aún cuando el atraque no sea muy perfecto.

De una manera general puede afirmarse que la sensibilidad de un explosivo al cebo es FUNCION DE SU VELOCIDAD DE DETONACION, permitiendo el estudio de las sensibilidades, trazar curvas que ponen bien claramente de relieve las relaciones que existen entre las curvas de velocidades de detonación (función, como sabemos, de la densidad del explosivo) y las de las sensibilidades; la sensibilidad, que disminuye al principio muy lentamente, decrece más rápidamente hacia la zona del máximo de velocidad y se hace, su curva figurativa, casi vertical rebasada la carga límite, es decir, en la zona de las detonaciones incompletas.

En general, la sensibilidad varía a la inversa de la compresión y con mucho más sensibles los explosivos pulverulentos que los compactos, cualquiera que sea el método empleado para lograr esta compacidad (fusión, gelatinización o compresión).

Frecuentemente hay interés en reducir la sensibilidad al choque de los explosivos, como medida de seguridad, y esto puede traducirse en una insensibilidad al cebo, que no permita la explosión por cebado directo debiendo recurrirse a un detonador o multiplicador intermedio o secundario, consistente en la interposición entre el cebo y el explosivo principal de otros explosivos más sensibles, o más frecuentemente, de una fracción de la carga del mismo explosivo en un estado de mayor sensibilidad; por ejemplo, trilita pulveru -

lenta para hacer detonar una masa de trilita compacta, a la que por presión, se le ha dado un peso específico = 1,6.

El papel del multiplicador es bien fácil de comprender, da nacimiento a una discontinuidad mucho mayor que la del cebo, que es capaz de provocar la formación de la onda explosiva en la sustancia menos sensible.

Muchas veces se recurre al empleo de vainas metálicas, cuya inercia hace que no se rompan hasta después de la gasificación total del multiplicador, creando así la discontinuidad con explosivos corrientes. La misma pólvora negra da muy excelentes resultados empleándola como multiplicador, en fino polvorín envainada en cápsulas metálicas; la facilidad de inflamación de la pólvora negra elimina, además, el peligro de fallos por falta de toma de fuego.

4. Ensayo de Combustión .- Se practica habitualmente este ensayo llenando un canutillo metálico de sección constante de un reguero o cordón regular del explosivo en estudio y viendo si la inflamación se logra con la llama de una simple bujía esteárica, o precisa la llama más caliente de un mechero Bunsen y si la inflamación lograda en el extremo del reguero se transmite o no a la parte que no está en contacto con la llama excitadora, y la velocidad de propagación de la combustión.

Las indicaciones obtenidas caracterizan, por compa

ración, la seguridad del explosivo en relación con los peligros de incendios del local y empaque que lo contenga.

La pólvora negra (que es la mixtura de inflamación más fácil y segura, por contacto con una llama o chorro de fuego de un explosivo iniciador) da lugar a una combustión muy viva, que se transforma en explosión cuando se propaga a una gran masa o cuando la presión aumenta ( $U = K.P$ ) porque los gases producidos son contenidos y no pueden expansionarse.

Las mezclas cloratadas, que tan sensibles son al choque y la fricción, arden en el canutillo con mucha más lentitud y los nitroderivados aromáticos se apagan sin transmitir la combustión más allá de la zona en contacto con la llama iniciadora.

5. Ensayo de explosión .- La sensibilidad térmica se estudia calentando progresivamente el explosivo y determinando la temperatura en que se produce la explosión.

Los resultados de este ensayo pueden diferir extraordinariamente si no se practica con estricta sumisión a unas reglas fijas. La norma más extendida es colocar un decígramo de explosivo en un tubo de ensayo de fuertes paredes que se introduce en un baño de aceite, previamente calentado a 100 grados y provisto de agitador, prolongando la calefacción de forma que la temperatura se vaya elevando a razón de grados por minuto. En estas condiciones se obtienen los

siguientes resultados:

S U S T A N C I A S	Punto de explosión
Nitrocelulosa mal estabilizada	130 a 140 grados
Fulminato de mercurio	175 a 180 "
Nitrocelulosa estabilizada	180 a 185 "
Dinamita núm 1	220 a 210 "
Pólvora negra	280 a 285 "
Nitruro de plomo	más de 335 "

Pero si en el tubo de ensayo, mantenido a la temperatura constante de 174°, se introduce un decígramo de nitrocelulosa perfectamente estabilizada, tal como se la emplea en la fabricación de pólvoras, que hemos dicho que en el ensayo practicado en la forma antes descrita decrepita entre 180 y 185°, termina por hacer explosión al cabo de un tiempo más o menos largo, según sea el estado de agregación de la muestra. es esto debido a las reacciones catalíticas aceleradoras de la descomposición térmica y que estudiaremos con todo detalle en su lugar.

Manteniendo idénticas las condiciones, podrá deducirse el tiempo al cabo del cual se produce la decrepitación para cada temperatura, y llevando los resultados a un gráfi-

co temperaturas-tiempos, la asintota de la curva obtenida indicará la temperatura mínima de decrepitación, es decir, la (temperatura de explosión).

Para las sustancias de las que hemos anotado en el cuadro precedente, los "puntos de explosión", éstas son las siguientes:

S U S T A N C I A S	Temperatura de explosión
Fulminato de mercurio	137 grados
Nitrocelulosa estabilizada	174 "
Dinamita núm. 1	192 "
Nitruro de plomo	320 "

Vemos, pues, que se conserva la misma ordenación que para los puntos de explosión.

6. La prueba de Trauzl .- Consiste en hacer detonar una carga de 10 gramos del explosivo en ensayo, iniciada con un cebo óctuple, dentro de un barreno de 25 mm. de diámetro y 125 mm. de profundidad (fig. 3), labrado en un bloque de plomo dulce de 200 mm. de diámetro y 200 mm. de altura, cuya masa debe estar toda ella a quince grados.

El explosivo se introduce en un petardo o cartucho de papel de estaño atado con un hilo fuerte y se atraca con arena fina.

La explosión produce un ahuecamiento interior del bloque (fig. 4) en forma de pera, que cuando ha sido muy grande ocasiona también un abarrilamiento exterior.

Limpiados los residuos de arena se puede averiguar el volumen de la pera llenándola de agua vertida desde una probeta graduada.

La cifra Trauzl es el ahuecamiento en centímetros cúbicos debido a los 10 grs. de explosivo, es decir, el volumen de la pera, descontando el volumen inicial del barreno y el imputable al cebo, que deberá averiguarse en ensayos previos, si no es conocido.

Se atribuye a este ensayo el defecto de dar cifras demasiado altas con las mezclas que dejan residuos sólidos debido a que éstos se adhieren a las paredes y estando a la temperatura de la explosión las reblandecen transmitiéndoles el calor por conductividad, pero esto no es exacto porque la duración de la explosión es lo suficientemente breve para no dar lugar a este efecto perturbador.

Las cifras Trauzl de algunos explosivos son las siguientes:

Nitroglicerina	540
Dinamita-goma	500
Pentrita	499
Exógeno	460
Acido pícrico	315
Trilita	290

Algunos autores toman como explosivos tipo la nitroglicerina, a la que asignan la cifra ciento, como número abstracto; en este caso las cifras Trauzl son:

Nitroglicerina	100
Dinamita-goma	92,7
Pentrita	92,4
Exógeno	85,2
Acido pícrico	58,3
Trilita	53,7

7. Método francés .- En Francia, la prueba Trauzl se efectúa con las mismas precauciones que en el método internacional pero se expresa, en vez de en centímetros cúbicos, por el peso del explosivo que se considera capaz de producir en el bloque de plomo la misma oquedad que 15 gramos de ácido pícrico, que es lo que toma por unidad.

El método francés constituye una medida de la energía utilizable en la explosión, puesto que a volúmenes iguales corresponden trabajos iguales y la energía puesta en jue

go es proporcional al peso del explosivo que ha producido el trabajo. Si para producir el trabajo de 15 gramos de ácido pícrico es preciso emplear 20 grs. del explosivo estudiado podemos decir que actuando sobre plomo tiene una aptitud de trabajo  $\frac{3}{4}$  de la del ácido pícrico.

Como se eliminan, con este método, de un golpe todas las variables que condicionan el ahuecamiento del bloque, a saber: calidad del metal, temperatura del bloque, etc. se obtienen coeficientes sensiblemente constantes para cada explosivo, contrariamente a lo que ocurre con el método internacional.

8. Prueba práctica de cebos .- El aparato que se utiliza aparece representado en la figura 5. Su fundamento consiste en la comparación de la mayor o menor perforación que, según la potencia del cebo, produce en una plancha cuadrada de plomo de unos 7 mm. de espesor.

El aparato es de hierro y el asa lleva un refuerzo en la parte superior con un orificio por donde se introduce el cebo a frotamiento suave. Sobre la base del aparato se coloca un cilindro de acero con un hueco en el centro (un tubo de acero sin soldadura) y encima de él la plancha de plomo en ésta se marca el centro trazando con lápiz las dos diagonales, teniendo la precaución de que al colocar el cebo sobre la plancha de plomo caiga en el punto de cruce de las dos diagonales y éste a su vez se corresponda con el hueco cen -

tral del cilindro. En la figura 6 aparecen los efectos logrados sobre las planchas al detonar los cebos, con el concurso de una mecha lenta.

Para expresar el resultado de esta prueba en una cifra podrían emplearse placas de plomo de 15 mm. de espesor, que no son perforadas por ninguno de los cebos usuales y medir el volumen del cráter formado llenándolo de agua desde una bureta de análisis graduada en décimas de cc. no lográndose mayor aproximación en la determinación de la cifra porque al ser rugosa la línea divisoria del cráter es imposible apreciar más. El cráter debe llenarse gota a gota, colocándose la bureta en forma que esté el orificio de salida muy próximo al cráter para evitar salpicaduras.

#### 9. Estudio de la conservación. Estabilidad física

a) Humedad .- Ciertos explosivos contienen sales delicuescentes o son más o menos descompuestos por el agua y quedan inútiles en estado húmedo. El secado no les devuelve siempre sus propiedades iniciales, la sensibilidad al cebo, por ejemplo, siendo este caso general a todos los explosivos, que con la humedad sufren alteraciones físicas (modificación de la estructura cristalina, de la compacidad, etc.).

La incorporación de ciertas sustancias flegmatizantes (aceite de ricino, vaselina, etc.) basta, a veces, para proteger las sales delicuescentes de una acción moderada de la humedad.

Un encartuchado cuidadoso permite igualmente el empleo, de explosivos higroscópicos; tal ocurre con la dinamita, que protegida por cartuchos parafinados se conserva bien durante largo tiempo. Es importante practicar ensayos de higroscopiedad de los explosivos desnudos y encartuchados en su forma comercial, midiendo el aumento de peso que experimentan como consecuencia de su exposición a la humedad, a temperatura constante bajo una campana y a cuya atmósfera se le regula, a voluntad, el grado de saturación por medio de una solución de ácido sulfúrico. Para el más fácil examen de los resultados pueden trazarse curvas isotermas tomando como ordenadas los aumentos de peso que corresponden a diversos tiempos de exposición para cada estado higrométrico.

Este estudio se completa con la investigación de las características y sensibilidad que corresponden a cada estado del explosivo.

b) Compresión .- Hemos dicho ya repetidas veces que la densidad de los explosivos influye mucho en la sensibilidad al cebo y en la velocidad de detonación, y es interesante comprobar que, en la forma usual de encartuchado, no hay peligro de que pueda rebasarse la densidad límite por un ataque demasiado enérgico.

c) Calor .- Desde el punto de vista físico, la acción del calor puede provocar modificaciones importantes. Un calentamiento anormal, durante el almacenamiento, puede producir un re-

blandecimiento (explosivos plásticos), favoreciendo el aplastamiento a la compresibilidad y el enfriamiento subsiguiente puede aumentar la compacidad hasta rebasar la densidad límite e inutilizar al explosivo.

d) Exudación .- El reblandecimiento puede ser seguido de una separación más o menos profunda de los ingredientes en las mezclas que contienen materias grasas (aceite de ricino, vaselina, parafina, nitro-derivados aceitosos) La exudación se estudia de un modo muy sencillo, colocando la muestra explosiva sobre un papel secante en la estufa a 40° y examinando el avance de la mancha oleosa y el aumento de peso del papel.

Un caso particular, importantísimo, es el de las dinamitas: éstas, por defectos de fabricación o por bruscas alternativas de calor y fríos, exudan la nitroglicerina, haciéndose muy peligroso el manejo de cartuchos exudados por la extrema sensibilidad al choque de la nitroglicerina.

e) Frío y congelación .- Interesa asegurarse hasta qué límite inferior de temperatura puede seguirse utilizando un explosivo. Las pruebas deben referirse a la sensibilidad al choque y al cebo a diversas temperaturas, que, en nuestra Patria pueden limitarse a los -10°

En general una disminución de la sensibilidad con el enfriamiento que puede obligar a tener que utilizar en zonas muy frías, detonadores más fuertes para asegurar la de

tonación completa de los petardos o cartuchos.

Cuando el enfriamiento ha dado lugar a la congelación del explosivo, la sensibilidad aumenta bruscamente, haciéndose superior no sólo a la que tiene en temperaturas inmediatas a la congelación, sino a la de los 15°, lo que se explica por la localización del efecto mecánico y su correspondiente transformación en calor, en un material más rígido.

Dentro de los explosivos usuales, la congelación no puede presentarse más que en las nitrocelulosas húmedas y en las dinamitas.

En las dinamitas, la congelación puede presentarse mucho más fácilmente y la cuestión tiene mayor trascendencia. Una dinamita congelada es mucho más sensible al cebo, por lo que no son de esperar fallos; además, su sensibilidad al choque es también extraordinaria (la simple percusión del cartucho al dejarlo caer en su alojamiento del taladro o al atracar éste), y por ello los reglamentos de todos prohíben el uso de dinamita congelada. Se hace preciso por tanto descongelarla antes de su utilización no está exenta de riesgos y además puede dar lugar a explosiones de la nitroglicerina, tan peligrosas durante la congelación.

Es, pues, conveniente mantener en los almacenes de dinamita un sistema de calefacción que los ponga a cubierto de la posible congelación del explosivo, y si, a pesar del mismo, llegara a congelarse, de no disponerse para el deshecho.

lado de personal experto y medios adecuados, lo más prudente es destruirla. En regiones muy frías puede resultar conveniente el empleo de las llamadas "dinamitas incongelables", en las que una parte de nitroglicerina ha sido sustituida por un peso igual de nitroglicol.

## CAPITULO III

EL CONCEPTO DE VIVACIDAD

1. Coeficiente de vivacidad .- La fracción  $\frac{a \cdot k}{l_1}$

es para cada pólvora una constante en la que se engloban la composición química ( $k$ , velocidad específica de combustión), la forma geométrica del grano ( $a$ , característica de forma) y el tamaño del mismo ( $l_1$ , máximo espesor quemado) y como la velocidad de emisión, en cada instante, es directamente proporcional a esta fracción, es la misma una característica importante, de cada pólvora que se denomina coeficiente de vivacidad o simplemente vivacidad, ya que cuanto mayor sea esta constante mayores serán las velocidades de emisión y, por tanto, la pólvora deflagrará, en igualdad de condiciones, en un tiempo menor, es decir, será "viva", mientras que si la vivadad es pequeña, tardará más en deflagrar y será "lenta".

La vivacidad se representa usualmente por la letra  $A$ ., es decir,

$$A = \frac{a \cdot k}{l_1}$$

2. Teorema de las velocidades de emisión .- La superficie y velocidad de emisión iniciales  $s_0$  y  $E_0$  se hallarán haciendo  $y = 0$  en las fórmulas generales, es decir,

$$s_0 = \frac{V_0}{2} \quad .a; \quad E_0 = V_0 \cdot \frac{a \cdot K}{2l_1}$$

y si dividimos por ellas los valores generales para un instante cualquiera:

$$\frac{S}{S_0} = 1 + 2.\lambda . y + 3\mu . y^2$$

$$\frac{E}{E_0} = (1 + 2.\lambda . y + 3\mu . y^2)^p \quad \text{con lo que} \quad \frac{S}{S_0} = \frac{E}{E_0} . p$$

importantísima propiedad que nos dice que: las velocidades de emisión son directamente proporcionales a la superficie, o sea, que crece cuando éstas aumentan y a la inversa. Vemos pues, un medio de regular, como antes decíamos las velocidades de emisión.

En los granos macizos la superficie decrece y la producción de gases va también disminuyendo y el explosivo se llama DEGRESIVO.

En los granos huecos (láminas perforadas, prismas acanalados, etcétera) se puede compensar (dándoles dimensiones adecuadas) la disminución de la superficie externa con el aumento de la superficie interna, para que la superficie total de emisión vaya aumentando a medida que el grano se quema y ocurriéndole lo mismo a la producción de gases, el explosivo se llama PROGRESIVO.

A la progresividad así lograda se llama geométrica.

3. Progresividad química .- En los explosivos formados por granos diminutos resulta técnicamente imposible hacer huecos, pero como quiera que la velocidad de emisión.

$$E = V_0 \cdot \delta \cdot A \cdot p (1 + 2\lambda \gamma + 3\mu \gamma^2)$$

es también directamente proporcional al peso específico  $\delta$  del explosivo, todavía es posible hacer progresivos estos diminutos granos macizos sin más que conseguir que la densidad de los mismos vaya aumentando hacia el interior, para lo que se recurre a la dispersión en la masa del grano ya fabricada, de sustancias inertes desde el punto de vista explosivo (alcanfor, centralita, etc.), que dificultan la deflagración. Como estas sustancias se difunden a través del grano conforme a las leyes de la coloides-química, con una concentración variable y decreciente hacia el interior, similar a la distribución del aire en las distintas capas de la atmósfera, cuya concentración disminuye a medida que vaya quemándose el grano, la concentración de la sustancia retardadora de la emisión irá disminuyendo y, por lo tanto, aumentando la densidad y con ella la producción de gases; es decir, el explosivo será progresivo.

4. Determinación de la velocidad específica y la vivacidad .- De la ecuación de la velocidad de emisión,

$$E = S \cdot \mu \cdot \delta = V_0 \cdot \delta \cdot \frac{\omega \cdot K}{\lambda_1} \cdot p (1 + 2\lambda \gamma + 3\mu \gamma^2) = V_0 \cdot \delta \cdot A \cdot p \cdot \psi(\gamma)$$

tenemos que:

$$u = \frac{d.l}{d.t} = \frac{V_0}{s} \cdot A \cdot p \cdot \psi(y) \text{ y siendo } dl = l_1 dy$$

$$l_1 \frac{dy}{dt} = \frac{V_0}{s} \cdot A \cdot p \cdot \psi(y); \frac{dy}{dt} = n \cdot A \cdot p \cdot \psi(y)$$

$$\frac{dy}{\psi(y)} = n \cdot A \cdot p \cdot dt$$

$$\int_0^y \frac{dy}{\psi(y)} = n \cdot A \cdot \int_0^t p \cdot dt$$

de donde:

$$A = \frac{\int_0^y \frac{dy}{\psi(y)}}{n \int_0^t p \cdot dt}$$

Con el auxilio de un manómetro registrador, efectuando una serie de tiros en la probeta para, obtener el valor más probable de la presión para cada instante puede construirse gráficamente la curva de presiones (ver fig. 8) y el área comprendida entre la curva, el eje de las x y las ordenadas extremas es la  $\int_0^t p \cdot dt$ ; en cuanto a la integral

$\int_0^y \frac{dy}{\psi(y)}$  si resulta laborioso su cálculo analítico puede integrarse gráficamente y la relación de ambas es el valor de la vivacidad.

Si la función  $\psi(y)$  fuera desconocida, con lo que no puede intentarse la resolución  $\int_0^y \frac{dy}{\psi(y)}$  ni aún gráficamente.

te, puesto que:  $p = P \cdot q$  y por tanto,

$$A \cdot P \cdot n \int_0^t dt = \int_0^y \frac{dy}{q \psi(y)}$$

en la que la integral del segundo miembro es constante para todos los explosivos de la misma familia, haciendo en la probeta dos tiros con densidades distintas  $\Delta_1$  y  $\Delta_2$  y midiendo las presiones máximas  $P_1$   $P_2$  y los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  podremos plantear el sistema de dos ecuaciones.

$$\log A + \log P_1 = \log c = \log t_1$$

de los que podremos despejar  $\log A$  y  $\log c$

$$\log A + \log P_2 = \log c - \log t_2$$

En explosivos de la misma familia, es decir, de idéntica forma y composición química, como A.P.  $t = c$ , traducida al lenguaje nos dice: que la vivacidad es inversamente proporcional a la duración de la deflagración; tomando logaritmos la expresión se convierte en  $\log A + \log P = \log c - \log t$ , que aplicada a un explosivo determinado (en vez de una familia) nos dice que la vivacidad y la constante  $c$ , o lo que es lo mismo, la función  $\psi(y)$  son independientes de la densidad de carga.

Finalmente, cuando el exponente de  $p$  en la fórmula de la velocidad de combustión no sea la unidad, es decir,  $u = k \cdot p^m$  podemos igualmente investigar el valor de este índice, puesto que  $A \cdot p^m \cdot t = c$ , con lo que  $\log A + m \cdot \log p =$

log c - log t para lo que bastará que efectuemos una serie de tres tiros con densidades de carga  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$  y  $\Delta 3$  para poder plantear un sistema de tres ecuaciones de la que podremos despejar los valores de log A, log c y m.

Para calcular el valor de la velocidad específica de combustión K como  $A = \frac{a \cdot K}{l_1}$  una vez conocida la velocidad A y la forma y dimensiones del grano, es decir, la característica de forma a y la mitad de la menor dimensión del grano  $l_1$ ;  $K = \frac{A \cdot l_1}{a}$

## CAPITULO IV

LA DETONACION

El fenómeno de la detonación es extremadamente complejo y aún no completamente conocido, a pesar de los considerables trabajos de ilustres experimentadores y de pirofísicos teóricos. Se caracteriza por un velocidad de reacción extremadamente grande (4770 metros en el algodón-pólvora, 6500 metros en la trilita, 7000 en el ácido pícrico, etc.) que Berthelot estudió experimentalmente, con todo el detalle y precisión que consentían los medios de su tiempo en mezclas gaseosas explosivas encerradas en tubos rectos y curvados de longitud variable entre los 20 y 40 metros, y de diámetros variables entre 1, 5 y 13mm. de acero, plomo, caucho y vidrio; admitiendo como fruto de sus experiencias que la detonación es un proceso ondulatorio, con una velocidad de propagación uniforme y característica (para cada explosivo) independiente de la presión inicial de la mezcla gaseosa (para límites entre 1 y 3 atmósferas) y de la naturaleza, resistencia y diámetro del tubo, aunque en los excesivamente capilares, se comprueba una disminución de esta velocidad.

Experiencias análogas practicadas por Berthelot y Vieille con explosivos, sólidos encerrados también en largos tubos, permitieron comprobar que la velocidad de detonación de los mismos es función del DIAMETRO y la RESISTENCIA de los

tubos, así como de la comprensión o peso específico del explosivo; es decir, del DIAMETRO, DENSIDAD DE CARGA y ATRAQUE.

Como ya hemos dicho, una misma especie química, o mixtura explosiva, puede deflagrar o detonar, e incluso en grandes masas, la descomposición puede pasar por las tres fases; es decir, comenzar siendo una combustión ordinaria y evolucionar a deflagración y finalmente a detonación. Para que esto sea posible es indispensable que la cantidad de explosivo exceda de un mínimo, que se ha denominado MASA CRITICA. La masa crítica varía con la naturaleza química del explosivo, y mientras en el nitruro de plomo es tan pequeña que resulta imponderable, en la trilita es superior a la tonelada. Una masa muy inferior a la crítica puede hacerse detonar con una iniciación suficientemente enérgica, y, por ejemplo, la trilita, cuya masa crítica excede a los mil kilogramos, puede hacérsela detonar en el bloque Trauzl (10 gramos) con un cebo adecuado.

La diferencia física esencial entre deflagración y detonación consiste en que en la primera los gases calientes de la reacción se mueven alejándose de la superficie de emisión, mientras que en la detonación son centrípetos, presionando hacia el interior del explosivo no detonado, elevando la presión del medio (sólido, líquido o gaseoso) y originando en el mismo una vibración o movimiento ondulatorio que se llama onda de choque.

Acabamos de decir que en los explosivos sólidos la velocidad de detonación crece con el diámetro del petardo y con la densidad del explosivo; hay un diámetro por encima del cual ya no se mejora la velocidad, y una densidad óptima a la que igualmente corresponde la velocidad máxima, de la llamada ONDA CRITICA: esta velocidad es la que puede calcularse por medios teóricos y la que se logra con una iniciación adecuada (siempre que el diámetro del cartucho sea igual o superior al crítico), pero cuando el atraque o la iniciación no son perfectos se logran detonaciones con velocidades inferiores en las que la naturaleza química de los productos es diferente, siendo frecuente que en estas detonaciones de segundo orden aparezcan óxidos de nitrógeno, en vez de quedar el nitrógeno libre o formando metano e incluso que las detonaciones sean parciales, quedándose una parte del explosivo sin detonar.

Las diferencias en las velocidades de detonación medidas son bastante notables, y mientras la nitroglicerina, detonada correctamente, alcanza velocidades próximas a los 8 000 metros, en detonaciones de segundo orden se han medido velocidades ligeramente superiores a los 1000 metros; es decir, siete veces más bajas. Este hecho, muy importante para el manejo adecuado de los explosivos es de los más imperfectamente conocidos, ya que sólo se sabe que es independiente de su balance de oxígeno, pues no sólo se da en la nitrogli-

cerina, con balance positivo, sino en la dinamita-goma, con balance cero, y en los nitrocuerpos aromáticos, con balances negativos muy grandes, como la trilita, y dependiente sólo de la energía de iniciación y perfección del atraque. El diámetro del petardo influye por igual en las detonaciones rápidas o lentas, como puede verse en la figura 9, que representa las variaciones, con el diámetro del cartucho de la velocidad de detonación (en uno y otro régimen) en la dinamita-goma, ambas líneas son dos rectas paralelas, muy próximas a los 2500 metros en la detonación lenta y a los 7500 metros en la rápida.

$$\frac{PV}{n RT} = 1 + \frac{b_0}{V} + 0,625 \frac{b_0^2}{V^2} + 0,2869 \frac{b_0^3}{V^3} + \dots$$

en la que  $b_0$  sería el covolumen de la ecuación de Van der Waals.

Cuando, además de la interacción debida a la proximidad de las moléculas, hay presiones elevadísimas y la gasificación consiste en que los productos iniciales se han transformado en los componentes del gas de agua, pero conservando la densidad del producto inicial, hablar de gas, en el concepto de ente sutil que tiene no ya el hombre de la calle, sino el mismo físico general, no pasa de ser un eufemismo, puesto que propiamente y hasta que comience (con gran retraso sobre el fenómeno explosivo en sí) el período de expansión,

estamos ante materia descohesionada, pero con densidades comprendidas, salvo excepciones, entre 1 y 2 y más que gases, en el concepto físico general son líquidos superdensos, con lo que la ecuación de estado que conviene a la detonación es:

$$\frac{P \cdot V}{n \cdot R \cdot T} = \frac{1}{1 + K \sqrt{D_0}}$$

El coeficiente K depende de la forma de empacado de los productos gaseosos de la explosión, y como los componentes del gas tienen microestructuras cúbicas, según Brown, el valor de K para casi todos los explosivos industriales es 0,6962, aunque, en determinados casos, pueden convenir otros más altos tales como 0,7163 y 0,7816.

En las aplicaciones civiles de los explosivos puede seguirse utilizando, sin inconvenientes, la ecuación de Sarrau, sin más que utilizar para  $K$  el valor  $b_0$ , como seguidamente explico.

## CAPITULO V

LA ECUACION DE ESTADO Y EL COVOLUMEN

1. Generalidades .- A las altas presiones de la detonación la tecnología de los explosivos se encuentra ante problemas en los cuales la ley de los gases ideales no es aplicable, y el cálculo de estas presiones requiere el previo establecimiento de una apropiada ecuación de estado y que en los cálculos de la reacción química explosiva (de las especies o mezclas con balance de oxígeno negativo) se corrija el equilibrio termodinámico ideal de la reacción, por no ser ideales los gases producidos; corrección que, a su vez, depende de la ecuación de estado.

En primera aproximación puede seguirse utilizando como ecuación de estado la de Sarrau, con tal de que para valor del covolumen no se tome, como en el caso de la deflagración, la milésima del volumen específico, sino que, habida cuenta de que  $v = f(P)$  se calcule el covolumen en función de la presión, mediante el método analítico, que se explicará en el punto tercero.

2. Ecuación de estado .- La ecuación de estado para gases a presiones bajas puede escribirse así:

$$\frac{P \cdot V}{n RT} = 1 + \frac{B' (T)}{V} + \frac{C' (T)}{V^2} + \frac{D' (T)}{V^3} + \dots$$

expresión en la que los numeradores de los términos del se -

gundo miembro, llamados coeficientes del virial, son funciones de la temperatura, independientes del valor de la presión.

Para moléculas con una interacción energética, correspondiente a la atracción debida a distancias medias pequeñas, la ecuación de estado quedaría de la forma:

3. Covolumen .- Si exceptuamos las sales de los metales pesados, tales como el nitruro de plomo o el fulminato de mercurio, utilizados en la fabricación de cebos, casi todos los explosivos técnicos tienen pesos específicos comprendidos entre 1 y 1,8 y en su detonación se logran presiones del orden de las CIENTO MIL ATMOSFERAS POR CENTIMETRO CUADRADO y temperaturas de varios miles de grados. Ello, no obstante la ecuación de Sarrau  $P(V-\lambda) = R.T.$ , puede aún seguir adoptándose con aproximación suficiente para las aplicaciones corrientes de los explosivos, como ecuación de estado de los gases de la detonación, con tal de que para  $\lambda$  tomemos el volumen real de la materia en estas condiciones extremas.

Por consideraciones de Termodinámica es posible calcular valores del covolumen de un explosivo correspondientes a los distintos valores de P, y si se hace este cálculo para un kilogramo de los distintos explosivos y se llevan los valores hallados a un gráfico en el que, en un sistema cartesiano rectangular, las ordenadas representan los covolumenes y las abscisas las presiones; las curvas obtenidas, correspon-

dientes a los diversos explosivos se confunden, a las altas presiones de la detonación, en una sola, porque, mientras que los explosivos difieren grandemente entre sí en el orden químico, los productos de la explosión son prácticamente iguales cualitativamente (son los componentes del llamado gas rico o gas de agua) y difieren muy poco en el cuantitativo, por lo que los covolúmenes, que ya difieren muy poco a las bajas presiones de la deflagración (trilita, 0,885 l. ; nitramita, 0,889 l. ; explosivo Favier, 0,912; balistita, 0,812; amonal, 0,905, etc.) que hacen iguales hasta los centilitros cuando las presiones son cien veces mayores.

La curva figurativa de la función  $\delta = f(P)$  la representamos en la figura 10. Una vez trazada la curva es posible deducir su ecuación (1); viéndose que, en el campo de las detonaciones, es una parábola de segundo grado, cuya ecuación es  $0,9 - \delta = \sqrt{2KP}$  (A);  $\delta$  es el covolumen, en litros, y P la presión, en kilogramos por centímetro cuadrado, y el parámetro vale  $K = 0,0000004166$ .

La fórmula de la presión en las detonaciones de explosivos condensados (sólidos o líquidos), que establecemos más adelante.

$$P = \frac{2 f \delta}{1 - \delta}$$

$$P - P \delta = 2 f \delta$$

Puede ponerse bajo la forma  $P - P (0,9 - \sqrt{2 KP}) \delta$  y poniendo en la misma,  $\delta$  en función de  $P$ , de acuerdo con la ecuación (A)

$$P - P (0,9 - \sqrt{2 KP}) \delta = 2 f \delta$$

$$P - 0,9 P \delta + \sqrt{2 KP} P \delta = 2 f \delta$$

$$P \sqrt{2 KP} \delta = 2 f \delta - P (1 - 0,9 \delta)$$

y elevando al cuadrado para racionalizar:

$$2 K \delta^2 P^3 = [2 f \delta - P (1 - 0,9 \delta)]^2 = 4 f^2 \delta^2 - 4 f \delta (1 - 0,9 \delta) P + P^2 (1 - 0,9 \delta)^2$$

Dividiendo por  $2K \delta^2$  y ordenando:

$$P^3 - \frac{(1-0,9\delta)^2}{2 K \delta^2} P^2 + \frac{2f (1-0,9\delta)}{K \delta} P - \frac{2f^2}{K} = 0$$

Haciendo el cambio de variable:

$$P = X + \frac{(1-0,9\delta)^2}{6 K \delta^2} \quad (A)$$

$$\left[ X + \frac{(1-0,9\delta)^2}{6 K \delta^2} \right]^3 - \frac{(1-0,9\delta)^2}{2 K \delta^2} \left[ X + \frac{(1-0,9\delta)^2}{6 K \delta^2} \right]^2 +$$

$$+ \frac{2f (1-0,9\delta)}{K \delta} \left[ X + \frac{(1-0,9\delta)^2}{6 K \delta^2} \right] - \frac{2f^2}{K} = 0$$

Desarrollando:

$$\begin{aligned}
 & x^3 + x^2 \frac{(1-0.9\delta)^2}{2K\delta^2} + \frac{(1-0.9\delta)^4}{12K^2\delta^4} + \frac{(1-0.9\delta)^6}{216K^3\delta^6} \\
 & - \frac{(1-0.9\delta)^2}{2K\delta^2} \left[ x^2 + x \frac{(1-0.9\delta)^2}{3K\delta^2} + \frac{(1-0.9\delta)^4}{36K^2\delta^4} \right] \\
 & + \frac{2F(1-0.9\delta)}{2K\delta^2} \left[ x + \frac{(1-0.9\delta)^2}{6K\delta^2} \right] - \frac{2F^2}{K} = 0
 \end{aligned}$$

Quitando paréntesis:

$$\begin{aligned}
 & x^3 + x^2 \frac{(1-0.9\delta)^2}{2K\delta^2} + x \frac{(1-0.9\delta)^4}{12K^2\delta^4} + \frac{(1-0.9\delta)^6}{216K^3\delta^6} - x^2 \frac{(1-0.9\delta)^2}{2K\delta^2} \\
 & - x \frac{(1-0.9\delta)^4}{6K^2\delta^4} - \frac{(1-0.9\delta)^6}{72K^3\delta^6} + x \frac{2F(1-0.9\delta)}{K\delta} + \frac{2F(1-0.9\delta)^3}{6K^2\delta^3} - \frac{2F^2}{K} = 0
 \end{aligned}$$

Reduciendo términos semejantes y ordenando:

$$\begin{aligned}
 & 3x^3 + x \frac{(1-0.9\delta)^4}{6K^2\delta^4} \left( \frac{1}{2} - 1 \right) + x \frac{2F(1-0.9\delta)}{K\delta} + \frac{(1-0.9\delta)^6}{72K^3\delta^6} \left( \frac{1}{3} - 1 \right) \\
 & + \frac{2F(1-0.9\delta)^3}{6K^2\delta^3 \cdot 3} - \frac{2F^2}{K} = 0
 \end{aligned}$$

Operando y condensando más aún, se tiene sucesivamente:

$$x^3 - x \frac{(1-0,9\delta)^4}{12K^2\delta^4} + x \frac{2f(1-0,9\delta)}{k\delta} - \frac{(1-0,9\delta)^6}{108k^3\delta^6} + \frac{f(1-0,9\delta)^3}{3k^2\delta^3} - \frac{2f^2}{K} = 0$$

$$x^3 + x \frac{2f(1-0,9\delta)}{K\delta} - \frac{(1-0,9\delta)^4}{12k^2\delta^4} + \frac{36k\delta^3 f(1-0,9\delta)^3 - (1-0,9\delta)^6 - 216k^2\delta^6 f^2}{108k^3\delta^6} = 0$$

$$x^3 + x \frac{24Kf\delta^3(1-0,9\delta) - (1-0,9\delta)^4}{12K^2\delta^4} + \frac{36K\delta^3 f(1-0,9\delta)^3 - (1-0,9\delta)^6 - 216k^2\delta^6 f^2}{108k^3\delta^6} = 0 \quad (B)$$

Ecuación cúbica de la forma canónica  $x^3 + Ax + B = 0$ , en la que

$$A = \frac{24Kf\delta^3(1-0,9\delta) - (1-0,9\delta)^4}{12k^2\delta^4}$$

$$B = \frac{36K\delta^3 f(1-0,9\delta)^3 - (1-0,9\delta)^6 - 216k^2\delta^6 f^2}{108k^3\delta^6}$$

La raíz real de la ecuación B servirá para calcular la presión de la detonación mediante la ecuación A', y entrando con este valor en el ábaco de la figura 10, o bien resolviendo, con este valor de P, la ecuación A, vendremos en conocimiento del covolumen.

Se resuelve, pues, en una sola serie de operaciones el doble problema de averiguar la presión que en la detonación se produce y el covolumen correspondiente, sin más datos que el conocimiento de la fuerza específica, que se calculará mediante la fórmula (f). Se comprende una vez más la importancia del peso específico  $\delta$  y la necesidad de exigir al fabricante una constancia en esta característica, con tolerancias muy estrechas.

El cálculo es prelije, pero una vez que se haya decidido la elección de explosivo a utilizar y el valor de  $\delta$ ; es decir, se conozcan las características de partida f y  $\delta$ , no hay que efectuarlo más que una sola vez.

Un ejemplo aclarará lo que acabo de exponer:

Cálculo de la presión de detonación y del covolumen de la dinamita-goma.

Como sabemos en esta,  $\delta = 1,6$  y  $f = 9\ 840$ , en cuanto al parámetro ya hemos admitido que en todos los explosivos técnicos vale

$$k = 0,0000004,166 = 4,166 \cdot 10^{-7}$$

$$F = 0,003785 \quad V_0 \text{ KT}$$

Cálculo de A

$$24 K f \cdot d^3 (1-0,9d) = 24(4,116)(10)^{-7}(9\ 840)(1,6)^3(-0,44) =$$

$$(1-0,9d)^4 = (-0,44)^4 = -0,037481 \quad = 0,177312$$

$$12 K^2 d^4 = 12 \cdot (4,166 \cdot 10^{-7})^2 \cdot (1,6)^4 = 1,36489 (10)^{-11}$$

$$A = \frac{-0,177312 - 0,037481}{1,36489 (10)^{-11}}$$

$$= - \frac{0,214793}{1,36489(10)^{11}} = - 15\ 737\ 019\ 173$$

Cálculo de B

$$36Kd^3 f(1-0,9d)^3 = 36(4,166)(10)^{-7}(1,6)^3(9\ 840) = (-0,44)^3 =$$

$$= -0,0514914$$

$$(-0,44)^6 = 0,0072563$$

$$216k^2 d^6 f^2 = 216(4,166 \cdot 10^{-7})^2 \cdot (1,6)^6 \cdot (9\ 840)^2 = 0,0608979$$

$$B = \frac{-0,0514914 - 0,0072563 - 0,0608979}{1,31 \cdot (10)^{-16}}$$

$$= - \frac{0,1196453}{1,31 \cdot (10)^{-16}} = - 913\ 322\ 900\ 763\ 358$$

La ecuación cúbica de la fórmula B queda para este explosivo en la forma:

$$x^2 - 15\ 737\ 019\ 173 x - 913\ 322\ 900\ 763\ 358 = 0$$

en la que, como se sabe por Algebra,  $x = y + z$ .

$$x^3 = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} + \frac{A^3}{27}} \quad z = -\frac{A}{3y}$$

$$\frac{B^2}{4} = \frac{(-913 \cdot 10^{12})^2}{4} = \frac{835\,569(10)^{24}}{4} = 208\,892(10)^{24} = 209(10)^{27}$$

$$\frac{A^3}{27} = \frac{(15 \cdot 10^9)^3}{27} = \frac{3\,375(10)^{27}}{27} = 125(10)^{27}$$

$$\frac{B^2}{4} + \frac{A^3}{27} = (209 + 125)(10)^{27} = 334(10)^{27}$$

$$\sqrt{\frac{B^2}{4} + \frac{A^3}{27}} = \sqrt{334(10)^{27}} = 578(10)^{12}$$

$$-\frac{B}{2} = \frac{913(10)^{12}}{2} = 456(10)^{12}$$

$$y^3 = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} + \frac{A^3}{27}} = (456 + 578)(10)^{12} = 1\,034(10)^{12}$$

$$y = \sqrt[3]{1\,034 \cdot 10^{12}} = 10,1120(10)^4 = 101\,120$$

$$z = -\frac{-15\,737\,019\,173}{318\,087} = 49\,473$$

$$x = y + z = 101\,120 + 49\,473 = 150\,593$$

$$\frac{(1-0,9d)^2 - (-0,44)^2}{6k d^2 - 6 \cdot 0,0000004166 (1,6)^2} = 30\ 250$$

$$P = x + \frac{(1-0,9d)^2}{6k d^2} = 150\ 593 + 30\ 250 = \underline{\underline{180\ 843\ \text{kgrs.}}}$$

$$d = 0,9 - \sqrt{2k \cdot P} = 0,9 - 0,388 = \underline{\underline{0,512\ \text{litros}}}$$

## CAPITULO VI

LA DETONACION DE GASES

1. Mecanismo de la propagación .- La primera interpretación teórica de los resultados experimentales obtenidos en las medidas de las velocidades de detonación fue asimilar la onda explosiva a una perturbación análoga a la producida por la onda acústica en el mismo medio. Pero la velocidad de propagación de una perturbación muy pequeña en un medio elástico no puede pasar de la velocidad del sonido en dicho medio y la experiencia ha demostrado que la onda explosiva tiene velocidades muy superiores a la del sonido en las mezclas gaseosas explosivas.

Se ha puesto en evidencia, mediante una serie de notables experiencias, que las velocidades de las ondas explosivas pueden explicarse por la existencia de discontinuidades en el medio en que progresa la onda.

2. Caracteres de la onda explosiva .- Dejando a parte las consideraciones de Vieille, de que se ha hecho somera mención en el inciso 1, permítasenos suponer una detonación de onda plana que ha sido conseguida en un medio explosivo gaseoso mediante una iniciación adecuada. El medio se supone sea paralelo e infinitamente extendido a lo largo del plano de la onda o, alternativamente, que está confinado en un tubo de rigidez perfecta, de modo que no pueda ocurrir ningún desplazamiento lateral, y el flujo tiene una sola dimen-

sión.

Hugoniot admite la cabeza de la onda como un frente de choque, que avanza con velocidad constante a lo largo del explosivo no consumido (velocidad de detonación) y es seguida o acompañada con un ligero defasaje, en un retraso, por una zona de reacción química.

Así definidas las discontinuidades, Hugoniot ha dado la siguiente demostración para establecer la fórmula que da la velocidad de detonación.

Representamos esquemáticamente en la figura 11 el medio en que se verifica la detonación. La sección O, como ya hemos dicho, se supone que permanece constante y se refiere a las ondas que se propagan por secciones paralelas en un medio cilíndrico; la sección AB es alcanzada en el tiempo  $t$  por una perturbación cuyas características son:

$P_1$  presión.

$z_1$  dilatación (variación positiva o negativa del volumen unidad, debida a la perturbación que ha llegado a la sección).

$V_1$  velocidad con que se mueve, hacia la derecha en nuestra hipótesis, dicha perturbación.

$d_x$  espacio recorrido por la perturbación en el tiempo  $dt$ . por tanto,  $\frac{dx}{dt}$  será la velocidad de avance de la perturbación.

El espacio  $dx$  es tal que en volumen  $\omega dx$  hay la

unidad de masa del gas, en el estado inicial, cuyas características son:  $P, z, v$ .

Al cabo del tiempo  $dt$ , todo el gas contenido en el espacio  $ABA'B'$ , que en el tiempo  $t$  estaba en las condiciones  $P, v, z$ , ahora, en el instante  $t + dt$ , se encuentra en las condiciones  $P_1; v_1; z_1$ .

Aplicando el teorema de las cantidades de movimiento, que dice: La derivada con relación al tiempo de la suma de las proyecciones de las cantidades de movimiento de los puntos de un sistema sobre un eje fijo cualquiera, es igual a la suma de las proyecciones, sobre el mismo eje, de las fuerzas exteriores, referidas al eje del tubo obtendremos :

$$d_0(V_1 - V) \cdot dx = (P_1 - P) \cdot dt \quad [a]$$

Por otra parte, la variación de extensión de la sección considerada es:

$$(z_1 - z) \cdot dx = (V_1 - V) \cdot dt$$

de donde

$$V_1 - V = - (z_1 - z) \cdot \frac{dx}{dt} \quad a$$

que llevado a [a] la convierte en

$$- d_0(z_1 - z) \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = P_1 - P$$

de la que podemos despejar el valor de la velocidad

$$v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{1}{d_0} \cdot \frac{P_1 - P}{z_1 - z}} \quad [b]$$

Si las perturbaciones siguen una ley continua la ecuación b, toma la forma.

$$v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{1}{d_0} \cdot \frac{dp}{dz}} \quad [c]$$

y si, además, se propagan en un medio en reposo; es decir, si suponemos que a la derecha de AB hay un gas perfecto de densidad  $d_0$ , presión  $P_0$  y condensación nula ( $z = 0$ ), o sea considerando la perturbación que en su avance/creando el frente de onda, el medio sufrirá una transformación adiabática, regida por la ley estática  $P \cdot V^r = P_0 \cdot V_0^r$  o sea

$$P (1 + z)^r = P_0$$

que diferenciando nos da:

$$d P (1 + z)^r + P \cdot r (1 + z)^{r-1} \cdot dz = 0$$

de donde

$$\frac{dP}{dz} = - \frac{P \cdot r}{1 + z}$$

que sustituyendo en (c), y como  $z_0 = 0$ , nos da:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{r \cdot P_0}{d_0} \quad [d]$$

que es la expresión clásica de la velocidad del sonido y que nos dice, puesto que para los gases que siguen la ley isoter

ma de Mariotte (p.  $V = \text{constante}$ ), a una misma temperatura  $P_0$  es constante, que la naturaleza y magnitud de las perturbaciones que siguen a la más avanzada no influyen sobre la velocidad de propagación y sólo actúan sobre la deformación de la onda; por eso ésta va deformándose, como indica la figura 12, y en vez de ser simétricas las ondulaciones hay un acortamiento en las condensaciones y un alargamiento en las dilataciones.

La fórmula [c] nos permite evaluar la velocidad de penetración de las perturbaciones elementales sucesivas en las que le preceden. Si el medio a la derecha de AB está ya perturbado por una transformación que le lleva al estado (p. v. z.) no será  $dx$  la longitud real, con relación a referencias fijas, que la perturbación recorre; siendo  $z$  la condensación del medio en el instante de la invasión, en vez de  $dx$  será  $dx(1+z)$ , y la velocidad real con relación a las referencias fijas.

$$v = \frac{dx}{dt} (1+z) = \sqrt{-\frac{1}{d_0} \cdot \frac{dP}{dz} (1+z)^2}$$

y llamando

$$d = \frac{d_0}{1+z}, \quad v = \sqrt{\frac{r \cdot P}{d}} \quad [e]$$

expresión de la velocidad de propagación de una condensación elemental, que vemos es variable en esta compresión adiabática, en vez de constante, como lo era en el caso [d] de la compresión isoterma.

Hugoniot ha demostrado, mediante consideraciones que no son de este lugar, que en una transformación discontinua (caso real de las detonaciones) la ley adiabática estática no es aplicable, pues el medio pone en juego una nueva elasticidad especial, adiabática-dinámica, muy superior a la estática, que hace que condensaciones moderadas puedan crecer más allá de todo límite.

Para deducir la relación adiabática-dinámica establezcamos la variación de energía de cada una de las capas, que sabemos es igual al trabajo de las fuerzas exteriores, puesto que la energía interna de un estado es igual al trabajo que puede realizar el gas cuando se dilata desde dicho estado hasta el infinito, y como  $\frac{1}{2} mv^2 + \int_{V_0}^{\infty} P. dV$  (suma de la fuerza viva y energía interna) si llamamos  $\Omega$  a la sección considerada y  $d_0$  a la densidad,  $m = d_0 \Omega dx$  en el caso de una transformación adiabática caracterizada por

$$P. V^r = P_0 V_0^r \quad \text{en la que} \quad P = \frac{P_0 \cdot (V_0)^r}{V^r}$$

$$\int_{V_0}^{\infty} P. dV = \int_{V_0}^{\infty} P_0 \cdot (V_0)^r \frac{dV}{V^r} = P_0 \cdot V_0^r \cdot \int_0^{\infty} v^{-r} \cdot dv$$

$$\int_{V_0}^{\infty} v^{-r} \cdot dv = \frac{1}{1-r} \int_{V_0}^{\infty} (1-r) \cdot v^{-r} \cdot dv = \frac{1}{1-r} \int_{V_0}^{\infty} (dv)^{1-r} =$$

$$= \frac{1}{1-r} \int_{V_0}^{\infty} d \frac{1}{v^{r-1}} = \frac{1}{1-r} \left[ 0 - \frac{1}{V_0^{r-1}} \right] = \frac{1}{1-r} \cdot$$

$$\cdot (-V_0^{-r+1}) = \frac{V_0^{-r+1}}{r-1}$$

de donde

$$\int_{V_0}^{\infty} P \cdot dv = P_0 V_0^r \cdot \frac{V_0^{-r+1}}{r-1} = \frac{P_0 V_0}{r-1}$$

y llevando este valor de  $\int_{V_0}^{\infty} P \cdot dV$  a la expresión de la energía  $1/2 m_V^2 + \int P \cdot dV$ . ésta se convierte, puesto que  $V = \frac{r}{1+z} dx$ .  $(1+z)$  en:

$$\frac{d_0 \cdot \rho \cdot dx}{2} \cdot v^2 + \frac{P_0 \cdot \rho \cdot dx \cdot (1+z)}{r-1}$$

y en el instante siguiente, cuando haya transcurrido el tiempo infinitesimal  $dt$  :

$$\frac{d_1 \cdot \rho \cdot dx}{2} \cdot v_1^2 + \frac{P_1 \cdot \rho \cdot dx \cdot (1+z_1)}{r-1}$$

la variación de energía en este tiempo  $dt$  será, pues:

$$\rho \cdot \left[ \frac{d_1}{2} (v_1^2 - v^2) + \frac{P_1(1+z_1) - P(1+z)}{r-1} \right] dx$$

El trabajo de las fuerzas exteriores, puesto que la capa está sometida en sus bases a las presiones  $P_1$  y  $P$  es  $-\rho \cdot (P_1 \cdot V_1 - P \cdot V) \cdot dt$ , e igualando ambas expresiones

$$\frac{dx}{dt} \left[ \frac{\rho_0}{2} (V_1^2 - V^2) + \frac{P_1(1+z_1) - P(1+z)}{\gamma-1} \right] = P_1 \cdot V_1 - P \cdot V \quad [f]$$

de las ecuaciones [a'] y [f] se deducen

$$P_1 V_1 - P V = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\rho_0}{2} \cdot (V_1 - V) (V_1 + V) + \frac{dx}{dt} \frac{P_1 - P}{\gamma-1} + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{P_1 z_1 - P z}{\gamma-1}$$

$$P_1 V_1 - P V = \frac{V_1 + V}{2} \cdot (P_1 - P) - \frac{P_1 - P}{\gamma-1} \cdot \frac{V_1 - V}{z_1 - z} - \frac{P_1 z_1 - P z}{\gamma-1} \cdot \frac{V_1 - V}{z_1 - z}$$

y observando que :

$$P_1 V_1 - P V = \frac{V_1 + V}{2} \cdot (P_1 - P) = \frac{2 P_1 V_1 - 2 P V - P_1 V_1 + P V_1 - P_1 V_1 + P V}{2}$$

$$= \frac{P_1 (V_1 - V) + P (V_1 - V)}{2} = \frac{P_1 + P}{2} (V_1 - V)$$

igualando y suprimiendo el factor común  $V_1 - V$

$$\frac{P_1 + P}{2} = \frac{-P_1 + P - P_1 z_1 + P z}{(\gamma-1)(z_1 - z)}; \quad P_1 (\gamma-1)(z_1 - z) + P (\gamma-1)(z_1 - z) =$$

$$= -2 P_1 + 2 P - 2 P_1 z_1 + P z$$

$$P_1 (\gamma-1)(z_1 - z) + 2 P_1 z_1 = 2 P + 2 P z - P (\gamma-1)(z_1 - z)$$

$$P_1 = \left[ 2(1+z_1) + (\gamma-1)(z_1 - z) \right] = P \left[ 2(1+z) - (\gamma-1)(z_1 - z) \right]$$

de donde

$$P_1 = P \frac{2(1+z_1) - (\gamma-1)(z_1-z)}{2(1+z) + (\gamma-1)(z_1-z)} \quad [g]$$

y llevando este valor a la expresión de la velocidad de propagación [b] nos dará:

$$V = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{P}{\delta} \frac{2z}{2 + (\gamma+1)z_1}} \quad [h]$$

en la que P y  $\delta$  representan la presión y la densidad del medio antes de la perturbación y  $z_1$ , la condensación, finita, que la invade por la propagación de la discontinuidad. Disponemos pues, de cuatro ecuaciones a, b, d, y g, suficientes para darnos a conocer las cuatro incógnitas V,  $P_1$ ,  $z_1$  y  $V_1$  en función de P, Z, V y el calor Q actualizado en la explosión.

3. Otra expresión de la velocidad.— En el caso de que la condensación inicial sea nula, es decir, el medio se le suponga en reposo, antes de la detonación o perturbación,  $z = 0$  y llevando a este valor a la fórmula g

$$P_1 = P \frac{2 - (\gamma-1)z_1}{2(1+z_1) + (\gamma-1)z_1} ; 2P_1(1+z_1) + \gamma(\gamma-1)z_1 = 2P + P(\gamma-1)z_1$$

$$z_1 [2P_1 + P_1(\gamma-1) + P(\gamma-1)] = 2(P - P_1)$$

$$z_1 = \frac{2(P - P_1)}{2P_1 + P_1(\gamma-1) + P(\gamma-1)} = \frac{2(P - P_1)}{P_1\gamma + P_1 + P_1 - P_1\gamma}$$

$$= \frac{2(P_1 - P)}{2P_1 + (P_1 - P)(\gamma + 1)} = \frac{2(P_1 - P)}{2P_1 + (P_1 - P)(\gamma + 1)}$$

Si en la fórmula [b]

$$V = \frac{dx}{dt} \sqrt{-\frac{1}{\delta_0} \cdot \frac{P_1 - P}{z_1}}$$

sustituimos  $z_1$  por el valor que acabamos de calcular

$$V = \sqrt{\frac{1}{\delta_0} \cdot \frac{(P_1 - P) [2P_1 + (P_1 - P)(\gamma + 1)]}{2(P_1 - P)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\delta_0} \cdot \frac{2P_1 + (P_1 - P)(\gamma + 1)}{2}} = \sqrt{\frac{1}{\delta_0} \cdot \frac{P}{2} \left[ 2\gamma + \frac{P_1 - P}{P} (\gamma + 1) \right]} \quad [i]$$

El rigor de las fórmulas queda siempre justificado en las mediciones experimentales, tanto si se trata de verdaderas detonaciones, como de simples perturbaciones provocadas en un medio inerte. Así, por ejemplo, provocando una onda de choque, mediante la detonación de un fulminante número 8 en un tubo de cinco pulgadas lleno de aire, a la presión atmosférica, la onda originó una sobrepresión máxima de 38 kilogramos y se desplazó con una velocidad de 620 metros por segundo.

Llevando el valor de la sobrepresión a la fórmula i tendremos:

$$V = \sqrt{\frac{1}{1206} \cdot \frac{10330}{2} \left[ (2) \cdot 1,4 + \frac{380000 - 10330}{10330} (1,4 + 1) \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{5165}{1206} [2,8 + 2,4(35,75)]} = \sqrt{(4282)(38,242)} = \sqrt{163800}$$

$$= 615 \text{ m.}$$

4. Valor de r .- En el caso de que el medio explosión, r no tiene el valor 1,4, porque las explosiones no son procesos adiabáticos sino politrópicos, siendo una variable función del proceso químico que tenga lugar y se le acostumbra a representar por  $r_1$ ; su valor medio en la deflagración de la antigua pólvora negra es 1; en las modernas pólvoras coloidales es 1,2 y en la detonación de los explosivos corrientes 1,1.

## CAPITULO VII

### LA DETONACION DE SOLIDOS Y LIQUIDOS

1.- Generalidades.- El método de cálculo que nos ha permitido evaluar la presión alcanzada y la velocidad de detonación de las mezclas gaseosas explosivas comporta cierta incertidumbre dimanante del hecho de que los calores específicos ( y su relación  $r$ ) nos son imperfectamente conocidos a las altas temperaturas que se alcanzan en las explosiones, no obstante lo cual, y a pesar de la falta de precisión anotada la teoría concuerda, con las mediciones experimentales.

La incertidumbre es aún mayor cuando se trata de explosivos sólidos o líquidos, pues en este caso el desconocimiento de los calores específicos se suma el de los equilibrios químicos, porque al no conocer con exactitud la ecuación de estado y por lo tanto  $T$ , no podemos trazar la curva figurativa  $(P,z)$ . Cada detonación está estrechamente ligada a una condensación extremadamente fuerte de los productos resultantes de la reacción explosiva (del orden de las centenas de millares de atmósferas); los gases fuertemente calentados, a estas presiones tan elevadas tiene la misma densidad (de 1 a 2 en general) del explosivo sólido, del que no se diferencian, más que por su composición química más sencilla (componentes del gas de agua) y por haber perdido

la cohesión, que caracteriza a los sólidos.

1° - Por lo que concierne a los calores específicos (base de todos los cálculos de la temperatura de la detonación) ha de admitirse que su valor es el mismo que si se encontraran los gases a la presión atmosférica, siendo intuitivo que, para las grandes densidades que presupone la gasificación en el propio volumen que ocupa el explosivo sólido, han de alcanzar valores mayores, por lo que, en estas condiciones, el cálculo de las temperaturas de detonación es bastante aleatorio, e indudablemente, los valores reales de estas temperaturas deben estar por debajo de los que arroja el cálculo, sin que puedan servir de guía las determinaciones calorimétricas en vasos cerrados, pues en éstos, por razón de su integridad y seguridad del operador, no suelen emplearse más que densidades de carga muy moderadas, en las que las presiones no rebasan las 4000 atmósferas, mientras que en las detonaciones en su propio volumen se alcanzan y aún rebasan las 100,000 atmósferas.

2° - En cuanto al equilibrio, que se establece en curso de la reacción química, estamos en la mayor ignorancia, dada la imposibilidad de practicar análisis cuantitativos con los productos de la detonación, mantenidos a la presión y temperatura de la misma.

2 Sistema de ecuaciones definidoras de la detonación en medios condensados (sólidos o líquidos).- Con las

salvedades que se han hecho notar en el epígrafe precedente, Dautriche ha planteado el siguiente sistema de ecuaciones, similar al de las mezclas gaseosas, tomando como ecuación de estado la de Sarrau y admitiendo, como la experiencia confirma, que en caso de explosivos sólidos cilíndricos, de suficiente diámetro (1), el proceso ondulatorio avanza por capas paralelas:

$$P (V - \infty) = R.T \quad (\text{estado})$$

$$V \cdot \Delta \quad \frac{V - W_1}{v_1} \quad (\text{continuidad})$$

$$P_1 - P_0 = \frac{V \cdot \Delta}{g} W_1 \quad (\text{dinámica})$$

$$P_1 \cdot W_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V \cdot \Delta}{g} \cdot W_1^2 + E \cdot V \cdot (a t_1 + b t_1^2 - Q_{mv}) \quad (\text{equivalencia})$$

Sistema de cuatro ecuaciones que no es suficiente para definir la onda explosiva, pues las incógnitas son cinco ( $P_1$ ,  $W_1$ ,  $V_1$ ,  $T$  y  $v_1$ ) y en el que se emplea la notación habitual de la termodinámica y, por lo tanto,  $E$  es el equivalente mecánico del calor;  $g$ , la aceleración de la gravedad;  $W_1$ , la velocidad de las capas;  $v_1$ , la velocidad de la onda o velocidad de detonación, y  $a$  y  $b$  los calores específicos de los gases.

Para salvar la indeterminación, como entre las in

finitas ondas que pueden originarse la estable es la crítica, que corresponde a una velocidad máxima, su derivada será nula y la expresión de esta derivada es la quinta ecuación, para hacer determinado el sistema de Dautriche.

Poniendo la ecuación de estado en función de la fuerza específica y haciendo

$$1 + \frac{P_0 V_0}{273.E (a + 2bt)} = r_1$$

(que varía entre 1 y 1, 2) y prescindiendo de  $P_0$ , por su pequeño valor en relación con  $P_1$ , las cinco ecuaciones de Dautriche se transforman en:

$$a.t + bt^2 - Q - \frac{f}{2Er_1} = 0 \quad (j)$$

$$P_1 = \frac{r_1 + 1}{r_1} \frac{f}{1 - \Delta} \quad (k)$$

$$V_1 = \frac{r_1 + \Delta}{(r_1 + 1)\Delta} \quad (l)$$

$$v = \frac{r_1 + 1}{V r_1} \frac{V f}{1 - \Delta} \quad (m)$$

$$W_1 + \frac{V g}{V r_1} \frac{V f}{1 - \Delta} \quad (n)$$

El valor medio de  $r_1$  en los explosivos técnicos usuales es, como ya hemos dicho, 1, 1 con lo que la fórmula (k) de la presión se convierte en:

$$P_1 = \frac{1, 1 + 1}{1.1} \frac{f \Delta - 2 f \Delta}{1 - \Delta \quad 1 - \Delta} \quad (o)$$

o sea, el doble de lo que indica la ecuación de Noble para el caso de las deflagraciones, y si se tiene en cuenta que el covolumen suele tomar valores muy pequeños ( véase la fig. 10), se justifica que ningún material conocido sea capaz de soportar las presiones de centenares de miles de atmósferas que se producen en la detonación y que ésta siempre produzca la rotura del mismo, no pudiéndose <sup>aspirar</sup> más que a evitar la proyección de los fragmentos cuando la carga se ha colocado suficientemente profunda en el medio resistente en el que se le hace detonar.

La expresión de la velocidad de detonación queda bajo la forma.

$$v = \sqrt{2 g (r + 1)} \frac{\sqrt{f}}{1 - \Delta} = 6,4 \frac{\sqrt{f}}{1 - \Delta} \quad (p)$$

La concordancia de esta fórmula con los valores experimentales es bastante grande, a pesar de los errores sistemáticos y de las hipótesis a que el cálculo se ha subordinado. Así, por ejemplo: en el fulminato de mercurio el va-

lor teórico de la velocidad de detonación calculado por la fórmula  $p$  es de 4120 metros por segundo y el experimental, medido por el método Dautriche, 3970 metros; en la nitroglicerina, 7230 metros el teórico, y 7500 el experimental; vemos pues, una coincidencia bastante aceptable, sobre todo teniendo en cuenta que las discrepancias en unos explosivos son aditivas y en otros sustractivas y que los valores teóricos se acercan tanto más a los experimentales cuanto mejor se ha hecho el cálculo del covolemen, es decir, cuanto más próximo al verdadero es el valor teórico de  $p$  con que se trabaja.

Sería interesante haber podido establecer comparaciones entre valores teóricos y experimentales de las presiones, pero en las detonaciones resulta imposible, en el estado actual de la técnica, medir presiones en razón de su desarrollo rapidísimo y su magnitud realmente fantástica.

## CAPITULO VIII

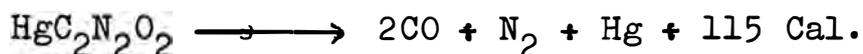
### EXPLOSIVOS INICIADORES,

1. Generalidades.- En 1799 Howard, haciendo reaccionar mercurio, ácido nítrico y alcohol etílico obtuvo, involuntariamente, fulminato mercúrico. El descubrimiento tuvo una enorme trascendencia científica y práctica porque la pólvora negra no es capaz de transmitir la explosión a los modernos explosivos que iban a irse descubriendo a lo largo de un cuarto de siglo después de este hallazgo, el iniciarse la era de la síntesis orgánica, y no conoceríamos como tales a muchos de los explosivos que hoy manejamos y a los que debe la humanidad su actual progreso material, ya que la pólvora negra no tiene energía suficiente para arrancar y romper las rocas duras y, por lo tanto, con su solo concurso, no se habrían podido ejecutar las grandiosas obras de la ingeniería moderna, ni arrancar la mayor parte de los minerales útiles. El carbón es de los pocos minerales blandos, que por esta razón podría extraerse con pólvora negra, pero el polvo y el metano que desprende forman el terrible grisú y la explotación con pólvora negra es tan terriblemente peligrosa que está prohibida en todos los países.

El fulminato de mercurio y las otras especies químicas y mixturas, de que voy a tratar constituyen una excepción en orden a la sensibilidad, y la llama, la percusión o la fricción les hace detonar y además tienen la propiedad de

transmitir la explosión a los otros explosivos con los que estén en contacto, este hecho, tan trascendente como el conocimiento del fulminato fue descubierto por el hombre al que, indudablemente, debe más la técnica de los explosivos: Alfredo Nobel.

2. Conveniencia del metal pesado.- El metal pesado contribuye a la inestabilidad molecular, a modo de sobrecarga, pero no es éste el principal papel que desempeña en los iniciadores. La segunda condición que éstos han de cumplir es la de transmitir la explosión a los restantes explosivos, es decir, originar en los mismos una percusión, discontinuidad, u onda de choque, que coloque a la capa que la recibe a temperatura superior a la llamada punto de explosión, pues bien, el metal pesado contribuye grandemente a ello porque absorbe la casi totalidad de la energía térmica actualizada en la detonación; en el fulminato.



las 115 kilocalorías actualizadas se reparten proporcionalmente a las masas de los productos de la explosión y como de los 284 gramos de la masa molecular 200 corresponden al mercurio, éste se lleva 80, con lo que la energía cinética  $1 \text{ mv}^2$  de estas moléculas monoatómicas es enorme, y se convierten en verdaderos proyectiles que percuten sobre el explosivo, que se quiere iniciar y lo calientan, en las zonas per-

cutidas, por encima del punto de explosión.

En las pruebas de los explosivos iniciadores sobre la placa de plomo los átomos del metal pesado, corriendo en filas radiales laceran la placa marcando surcos que han dado lugar a que los explosivos iniciadores sean conocidos también con el nombre de lacerantes.

3. Principales iniciadores.- 1. Fulminato de mercurio.- Se presenta en forma de agujas, suaves al tacto, blanco-amarillentas, venenosas (como todas las sales mercuríacas). Su densidad es  $\rho = 4,42$  Insoluble en agua fría y algo soluble en agua hirviente.

Seco, su punto de explosión es  $180^{\circ}$  y detona por el contacto de un cuerpo incandescente, la percusión o la fricción, SIENDO LOS CRISTALES GRUESOS MUCHO MÁS SENSIBLES QUE LOS DIMINUTOS (es ésta una propiedad general de todos los explosivos iniciadores).

Con la adición de agua disminuye mucho los peligros de su manejo; con el 30% es ya insensible al frotamiento y choque y con cantidades inferiores suele detonar sólo la parte percutida sin que la reacción se encadene.

Cuando está húmedo se descompone lentamente al contacto de los metales oxidables, especialmente con el cobre de las vainas de los fulminantes o cápsulas, sustituyendo éste al mercurio y formando el fulminato cúprico, mucho más insensible al choque, lo que explica el fallo de los fulminantes húmedos y antiguos.

Fuertemente comprimido se insensibiliza, como ocurre a todos los explosivos; por encima de 400 kilogramos por centímetro cuadrado cuesta hacerle detonar por choque y encendido; con una mecha no detona, sino que deflagra como las pólvoras.

El comienzo de la descomposición del fulminato se caracteriza por la separación del mercurio en gotículas fácilmente observables al microscopio. En estas condiciones es peligroso y debe ser destruido, sumergiendo los artificios que lo contengan en una lejía de soda, concentrada o en sulfato ferroso.

2. Nitruro de plomo.- Llamado también ácido o nitrido, es un cuerpo blanco, cristalino, insoluble en agua fría, que se disuelve medio gramo por litro de agua hirviendo y su densidad = 4,3.

Su sensibilidad es muy variable con el tamaño de los cristales, siendo tal vez el explosivo en que más ostensible es esta propiedad general, de que reiteradamente venimos hablando; dejando enfriar, lentamente, una solución saturada de nitruro se obtienen cristales gruesos, extraordinariamente sensibles, pero enfriando bruscamente se forman cristales microscópicos muy poco sensibles.

El nitruro es absolutamente insensible a la influencia de la humedad, no es higroscópico y detona aún con cincuenta por ciento de agua, y húmedo, es mucho más indiferente a los metales que el fulminato. Ello no obstante en

atmósferas muy ricas en anhídrido carbónico, el gas carbónico húmedo desplaza el ácido nitrihídrico, formando carbonato básico de plomo:



El ácido nitrihídrico, a medida que se va formando ataca al cobre de las vainas de los fulminantes.

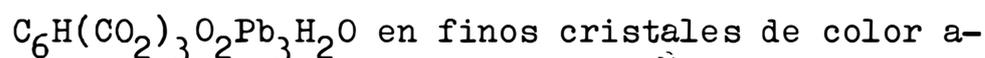


y el nitruro de cobre es un cuerpo de sensibilidad exagerada y peligroso manejo, por lo que es aconsejable cargar el nitruro en fulminantes cuyas vainas o casquillos sean de aluminio, aunque esto sea también un inconveniente en las minas de carbón de atmósfera grisutosa.

Por la acción de la luz sufre una reducción, depositándose sobre sus cristales plomo, haciendo cambiar su color de blanco a gris, más o menos oscuro según sea el tiempo de exposición de intensidad de la luz, y si es muy prolongada la insolación o recibiera luz ultravioleta, de una lámpara de cuarzo, puede hacer explosión.

Cuando haya que destruirlo puede lograrse sumergiendo los artificios que lo contengan en una solución concentrada de acetato sódico o amónico, en gran exceso.

3. Trinitrorresorcinato de plomo.— También llamado stifnato de plomo, cristaliza con una molécula de agua de cristalización.



naranjado oscuro y 2,75 de densidad (es el menos denso de los iniciadores industriales). Es insoluble en agua y en los disolventes usuales (alcohol, cloroformo, benzol, ácido acético, etc.), por lo que no se le puede purificar por recristalización, no admitiendo más purificación que el reiterado lavado con agua y alcohol.

Como explosivo acusa una energía en la prueba de la placa de plomo intermedia entre las del fulminato y nitruro y su velocidad de detonación es inferior a la del fulminato.

Se le utiliza, con nitruro en los fulminantes que deban detonarse con la llama de una mecha Bickford, pues tiene más sensibilidad a la incandescencia que el nitruro puro.

4. Mixturas iniciadoras.- Con la casi exclusiva excepción de la trilita, que ninguna razón técnica obliga a utilizarla en mezclas, y que si se le adiciona nitrato amónico u otros ingredientes es sólo por razones económicas, los restantes explosivos no se emplean solos, sino en mezclas con determinados corrigentes dedicados a atenuar o exaltar algunas de sus propiedades. De esta norma general no podían, naturalmente, librarse los iniciadores que no se les emplea casi nunca solos sino en mixturas.

El nitruro de plomo y el trinitrorresorcinato se les suele emplear juntos, mezclando en proporción 2/3, para aumentar la longitud y duración de la llama.

En cuanto al fulminato se le emplea en una mezcla

compleja, con clorato potásico, sulfuro de antimonio y vidrio molido, todo ello aglutinado con goma laca. Esta mezcla se prepara, por simples razones de seguridad durante su confección, en dos fases.

En la primera se mezclan:

125	partes en peso de clorato potásico,
250	" " " " sulfato de antimonio y
5	" " " " goma laca.

y en la segunda

190	partes en peso de la primera mezcla
63	" " " " fulminante de mercurio y
2,5	" " " " vidrio molido.

Esta mezcla posee la adecuada sensibilidad al choque, a la fricción, a la llama y a cualquier otro procedimiento de encendido. El papel, que desempeña en la misma el fulminato es el de suministrar la llama inicial; el del clorato es el de actuar de comburente, dando el oxígeno necesario para la combustión y el del sulfuro de antimonio el de actuar de combustible para mantener la llama. El vidrio molido se agrega para aumentar la sensibilidad, debido a la acción de yunque que ejerce al interponerse sus partículas entre la masa explosiva, con lo que se trasmite de unos a otros la persecución inicial. La goma laca, tiene por objeto aglutinar la mixtura, dotándola de compacidad en el interior de las cápsulas, impidiendo la desorganización de la mezcla. La densidad de esta mezcla es 3,5.

## CAPITULO IX

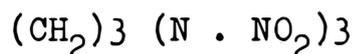
### ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES ESPECIES EXPLOSIVAS INDUSTRIALES

#### 1.- EXPLOSIVOS SINTETICOS Y ELEMENTALES.

Se les denomina sintéticos, impropriamente, porque su materia prima se obtiene mediante proceso químico (síntesis).

##### HEXOGENO:

Corresponde a este explosivo la fórmula molecular:

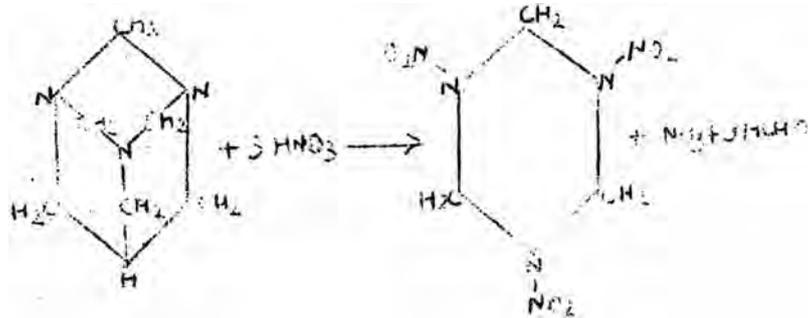


La la, fase de su fabricación, es posible gracias a una diferencia característica del formaldehído con relación al resto de los aldehidos. Difiere de ellos al tratarle con amoníaco, pues en lugar de dar el correspondiente aldehído amónico, da la hexametilentetramina.



La hexametilentetramina es un sólido cristalino al que se le supone una estructura policíclica compleja; siendo también llamada "urotropina" o aminomorfo, pero debe reservarse estas otras denominaciones cuando se utiliza para los tratamientos medicinales de la gota y del reumatismo.

Su nitración se verifica según diferentes técnicas, pero todas siguiendo la siguiente reacción general:



El mecanismo de su nitración no es muy bien conocido todavía, obteniéndose rendimientos muy bajos (30%).

PROPIEDADES.- El hexógeno es un polvo blanco inodoro e insípido, que corresponde al anticuerpo cíclico, insoluble en agua, denominado "ciclo-trimetilentrinitramina".

Tiene una velocidad de detonación prácticamente igual a la de la pentrita, y con ella, tiene un elevado poder rompedor. Por ser un nitro cuerpo, presenta mayor estabilidad que la pentrita, aunque para su utilización deben ser flegmatizadas las dos. En cambio su fabricación resulta más peligrosa que la de la pentrita.

Tanto la pentrita como el hexógeno, se denominan explosivos nobles por dar una velocidad de detonación superior a la del ácido pícrico (7.000 m./seg.).

Es muy importante recalcar, que el poder rompedor práctico tanto de la pentrita como del hexógeno, es bastante menor que el teórico, por tenerse que utilizar flegmatizados, con lo que sus características pirostáticas pierden

eficacia, el exógeno está utilizándose en volcaduras de rocas, en Europa.

### AIRE EXPLOSIVO (EXPLOSIVOS DE AIRE LIQUIDO)

Los explosivos de aire, son prácticamente mezclas de un combustible sólido y suelto, con oxígeno líquido, pues el aire líquido se obtiene de forma que tenga por lo menos un 90% de oxígeno. Por ello también es llamado OXILÍQUITA.

El combustible a impregnar suele ser: polvo de corcho, negro de humo de varios tipos, polvo de naftalina, polvo de aluminio, etc. Existen dos diferencias notables entre los explosivos sólidos y el aire explosivo:

1a. Los cartuchos se preparan inmediatamente antes de su uso.

2a. El oxígeno necesario para la reacción explosiva está libre, no combinado.

LICUACION. TRANSPORTE.- Para poder licuar un gas, sabemos que hay que enfriarlo por debajo de su temperatura crítica; tanto el nitrógeno como el oxígeno, tienen unas temperaturas críticas muy bajas:  $-147.1^{\circ}\text{C}$  y  $-118.8^{\circ}\text{C}$  respectivamente, luego para poder licuar el aire hay que enfriarlo a una temperatura menor de  $-147.1^{\circ}\text{C}$ , mediante absorción de energía, aplicando el efecto Joule-Thompson y previa eliminación del polvo,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

El aire líquido recién fabricado es una mezcla de, aproximadamente: 54%  $\text{O}_2$ , 43%  $\text{N}_2$  y 3%  $\text{A}$ ; pero como el nitrógeno

es más volátil, se evapora antes que el oxígeno, con lo que el aire líquido se enriquece en éste, y por tanto, va elevando su punto de ebullición hasta que se estaciona a  $-183^{\circ}\text{C}$ , a esta temperatura el aire líquido contiene aproximadamente 95% de oxígeno.

Por estos bajos puntos de ebullición, se comprende que un explosivo de aire líquido no puede ser almacenado, debiendo ser fabricado en el mismo lugar de su consumo, y éste ser continuo.

El aire líquido se transporta en envases metálicos de doble pared, entre las que se hace el vacío para evitar el intercambio de calor por convección o conducción, principalmente. Si tienen además la superficie interior plateada, se reducirán al mínimo las pérdidas de calor por radiación.

FABRICACION. UTILIZACION.- La impregnación de los cartuchos debe realizarse metiéndolos en un envase, y después, vertiendo en él aire líquido hasta que cubra los cartuchos; de esta forma se evitan elevadas pérdidas por evaporación del oxígeno. Los cartuchos deben estar impregnándose durante unos 15 minutos aproximadamente, y deben ser utilizados, a ser posible, antes de los 12 minutos siguientes. Después, la sucesiva evaporación del oxígeno les hace ir perdiendo potencia, la cual dependerá además del combustible empleado, diámetro del cartucho y tipo de ataque.

El retacado no debe ser compacto, pues como la

presión de los gases se eleva rápidamente en el taladro, el taco sería arrojado antes de que esa presión realizase todo el trabajo en las restantes direcciones. Por ello el atraque ha de ser poroso, o dejar en el taco un orificio de escape de gases.

Si se emplease la pega eléctrica (su montaje debe prepararse antes que los cartuchos), se utilizará una tensión menor de la normal, pues el enfriamiento que produce el aire líquido, hace disminuir la resistencia eléctrica del cebo. Además no puede emplearse el fulminato de mercurio, pues el aire líquido le hace perder sus características iniciadoras.

Los explosivos de aire líquido presentan 3 desventajas muy notables:

1a. No ofrecen la menor seguridad contra el grisú.

2a. No son adecuados para espacios estrechos, donde el manejo de los envases de impregnación y transporte del aire líquido ofrezca dificultades.

3a. Si la energía eléctrica es cara, y el consumo de estos explosivos no es elevado ni continuo, resultan anti-económicos por los altos costos de instalación y mano de obra especializada.

Estos explosivos tuvieron mucha aceptación inicial, especialmente en las minas potásicas, pero hoy están

en desuso. En el momento actual existen explotaciones a base de oxiliquita en la cuenca hullera de la Alta Silesia, en Japón y en Chile.

## 2.- EXPLOSIVOS COMPUESTOS

La especie química explosiva, tiene unas características <sup>pirostáticas</sup> que, o son peligrosas para su manejo, o no son adecuadas para realizar el trabajo que se precisa.

Por ello, a excepción de la trilita que técnicamente puede utilizarse sola (la adición de ingredientes es por razón económica), el resto de las especies químicas explosivas se utilizan en mezcla con otras o con ingredientes no explosivos.

Algunas veces no pueden mezclarse, como el cloruro de nitrógeno, que detona al ponerse en contacto con materias oxidables, o como el yoduro de nitrógeno que detona al más ligero roce (ultrafulminante).

La nitroglicerina es la única especie química explosiva corriente, cuyo balance de oxígeno es positivo; todas las demás tienen balance de oxígeno negativo (el del nitroglicol es nulo). Por tanto, para conseguir una combustión completa, es necesario adicionar el OXIDANTE adecuado en forma de oxisal, ya sea nitrato, clorato o perclorato. El número de dadores de oxígeno es relativamente pequeño, en cambio el de cuerpos carbonados es enorme.

A veces no basta con que la combustión sea comple

ta, por:

1º Necesitar corregir una característica.

2º Lograr la máxima estabilidad hasta su utilización.

3º Atenuar su sensibilidad al choque o fricción.

Entonces, es necesario adicionar un **CORRIGENTE** con el que se consiguen esos propósitos.

El número de explosivos, ya autorizados o no autorizados, crece ante las exigencias de la aplicación y los progresos de la ciencia y de la técnica.

#### DINAMITA ORDINARIA

Al estudiar la nitroglicerina, se vio que una característica típica de ella es su exagerada sensibilidad. Alfredo Nobel en 1866 descubrió, un poco accidentalmente, que la nitroglicerina absorbida por el kieselguhr, estaba exenta de los riesgos de explosión prematura tan propensos en estado líquido.

El kieselguhr, es una tierra "silícea" formada por caparazones de diatomeas y otros animales microscópicos en estado fósil. Para aumentar mejor su capacidad de absorción, se le calcina y lava, con lo que se consigue la purificación de la sílice, llegando a absorber hasta el 80% de su peso.

El Kieselguhr calcinado se le tritura y tamiza, y se le pasa a un recipiente de plomo, sobre el que se vier

te la nitroglicerina a 15°C ó 20°C. La pasta se amasa hasta que sus granos sean finos y, ni secos ni graciosos. Posteriormente se encartuchan.

PROPIEDADES.- A esta dinamita de tierra de infusorios, se la denomina de BASE INERTE, por no intervenir la sílice en la reacción explosiva, quedando como residuo.

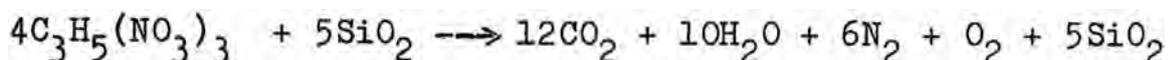
La dinamita ordinaria es una masa moldeable que puede ser incolora, pero que tiende a ser rojiza según la proporción de hierro en la base absorbente. Como puede fabricarse en diferentes proporciones, su peso específico es variable/<sup>aumentando</sup> con la cantidad de nitroglicerina; pudiéndose considerar un peso específico medio de 1.5.

Al tacto es grasienta.

Es la única dinamita que conserva constante sus características pirostáticas. Por esta gran cualidad será siempre utilizada, preferentemente, en países cálidos tropicales.

#### INCONVENIENTES:

1° La sílice hace disminuir la potencia de la nitroglicerina, pues sólo sirve de soporte como se comprueba observando su fórmula de descomposición:



2° El punto de congelación de esta dinamita es de + 8°C, excesivamente elevado, con el gran inconveniente que representa la gran sensibilidad al choque o fricción de la

dinamita congelada. Los explosivos, en general, se deben utilizar sin miedo pero siempre con respeto. LA DESCONCILIACIÓN es una operación muy peligrosa que sólo debe efectuarla una mano de obra especializada.

3° En contacto con el agua elimina fácilmente a la nitroglicerina.

4° Si una dinamita exuda, se observan en la envoltura manchas oleosas, o que éstas se forman sobre un papel de filtro que se impregna de aceite al presionarlo con la mano sobre el cartucho (una impresión sobre el papel de filtro podría también ser debida a  $\text{NO}_3\text{NH}_4$  húmedo). La aparición de estas manchas, o la acidificación de la carga, puesta en evidencia con el papel de tornasol, indican sumo peligro, y esta dinamita debe ser destruída inmediatamente quemando al aire libre sus cartuchos ;sin envoltura!, la cual se quemará aparte; o también introduciendo los cartuchos "abiertos" en soda cáustica concentrada, hasta saponificación completa de la nitroglicerina que es la causante de la exudación. Respecto a esta saponificación, aunque algunos autores indican que dura varios días, y su final vendrá indicado por una neta reacción alcalina, puede durar varios años, por lo que no es un procedimiento recomendable. El resto de las dinamitas a estudiar pueden destruirse exactamente.

Para evitar el inconveniente del residuo en estas dinamitas de base inerte, el mismo Nobel, para la absorción de la nitroglicerina, empleó absorbentes orgánicos, co

mo el almidón, serrín, harina, carbón vegetal, etcétera. Estos absorbentes orgánicos, no dejan residuo, pues se queman a la misma velocidad de la detonación, con lo que la potencia del explosivo queda mejorada en relación con las dinamitas de base inerte.

Estas dinamitas de BASE ACTIVA presentan el gran inconveniente de su fácil exudabilidad. El absorbente orgánico obliga a adicionar nitrato sódico o amónico.

#### GOMAS

Ya hemos visto que la nitrocelulosa tiene la propiedad de gelatinizar a la nitroglicerina, dando una masa muy coherente, de densidad igual a 1,5 (traslúcido amarillenta) y con una gran elasticidad que la permite ser curvada y cortada.

Este producto engomado de gran utilización, es la goma. La fabricación de las gomas es muy simple, pues consiste en la mezcla en cubas adecuadas, de nitroglicerina con nitrocelulosa deshidratada (seca), triturada (ya que generalmente lo normal es que venga ya desmenuzada) y tamizada convenientemente. Las mezcladoras llevan unas paletas verticales (más modernas que las horizontales), y están rodeadas por una camisa por la que puede circular agua o vapor, aunque este no suele ser necesario si se adiciona nitroglicol que activa extraordinariamente la gelatinización.

Con estas gomas conseguimos mayores efectos, pues

todo explosivo conviene que sea relativamente denso y posea plasticidad suficiente para su fácil adaptación al taladro.

A diferencia de la dinamita ordinaria, la nitroglicerina no es eliminada ni por el agua ni por compresión, pero aquella conservaba sus características pirostáticas constantes, en especial la velocidad de detonación; en cambio, las dinamitas gomas presentan una progresiva disminución de ella a partir de su fabricación, pues el complejo aditivo nitroglicerina + nitrocelulosa, una vez formado "aparentemente, continúa en reacción lenta hasta madurarse, y, con el tiempo, la fase dispersa del sistema coloidal se separa del medio de dispersión, "se ha producido la floculación", y la onda explosiva, cuya velocidad ya va siendo regresiva según progresa la maduración, llega a dejar sin detonar la carga del fondo del taladro.

Este hecho importantísimo debe ser conocido por el usuario. Por ejemplo, si ha recibido una Goma recién fabricada puede dar "casi" los 8.000 m./seg., a los 4 días no llega a los 7.000 m./seg.; si la recibe a la semana siguiente de ser fabricada, ha comprado un explosivo con una velocidad de detonación de  $\approx$  4.500 m./seg., pero si en lugar de utilizarlo en seguida tarda más de un mes, el usuario no debe exigir una velocidad mayor de 2.600 m./seg. Protestar al fabricante no tiene razón técnica.

Conviene resaltar que, aun perdiendo potencia,

conservan el mismo potencial, y que, a pesar de estas pérdidas, las gomas son los explosivos industriales de más elevada potencia. Su uso no es recomendable actualmente en minería.

### NITROGELATINAS

Se dice que es una goma diluída, o, también, que es una dinamita de base activa (esta base es la nitrocelulosa), pues su fabricación consiste en una gelatinización pequeña, con lo que pueden adicionarse oxisales que elevarán el balance positivo de oxígeno, el cual permite adicionar además cierta cantidad de combustible, de tal forma que la nitroglicerina esté estrechamente (fijamente) unida, y la masa sea plástica.

Se obtiene de esta manera un explosivo un poco más barato que las gomas y también de elevada, aunque menor, potencia. Estas dos cualidades son las que hacen diferenciar una goma de una nitrogelatina, también llamada gelatina-dinamita o gelatina.

Con relación a su velocidad de detonación, puede decirse también lo mismo que de las gomas.

Las oxisales más corrientes que se adicionan son: el nitrato sódico, o el nitrato potásico o perclorato potásico si quiere evitarse la higroscopicidad de las sales sódicas. A veces también se adicionan a estos explosivos, un

poco de polvo de creta (carbonato cálcico), que actúa de estabilizador contra los posibles indicios ácidos de una descomposición de la nitroglicerina.

Tanto las gomas como las nitrogelatinas, se congelan, aunque a temperaturas más bajas que la de la dinamita ordinaria. Para evitar la grave y peligrosa congelación, se fabrican dinamitas incongelables por la adición dinitrato de glicol, con la desventaja de disminuir un poco la potencia y de aumentar el peligro de exudación.

Lo que internacionalmente se conoce como BLASTING GELATINE (Gelatina explosiva).

Por ser tan peligrosa la exudación, se tiende a sustituir el nitroglicol por el dinitrotolueno, como por ejemplo en la Goma Especial, cuya composición es:

Nitroglicerina . . . . .	26 %
Nitrocelulosa . . . . .	1,6 %
Celulosa . . . . .	0,4 %
Nitrato amónico . . . . .	60 %
D. N. T. . . . .	12 %

Este explosivo tiene un punto de solidificación de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Esta Goma, es utilizada para labores en roca, estando autorizada en minas grisuosas, no en capas, siempre que la ventilación esté asegurada.

Las dinamitas de uso más corriente fabricadas en el Perú son de 65% y 75%.

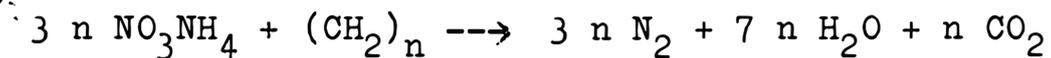
### ACEITES EXPLOSIVOS

El nitrato amónico, por su tendencia oxidante, unido íntimamente a un aceite mineral, origina mezclas explosivas que se fabrican, normalmente, en el mismo lugar de su utilización; estas mezclas íntimas se denominan ACEITES EXPLOSIVOS, ACEITES PLASTICOS O ACEITES PESADOS.

Esta propiedad del nitrato amónico, fue descubierta en 1867 por los ingenieros suecos Norbin y Olson, pero el inventor de estas mezclas explosivas fue Sprengel (1871), por lo que también se las conoce por este nombre. En América se las denomina Rack-a-Ronck, en general, y a la mezcla de nitrato amónico granulado con aceite Diesel, se la denomina Anfo.

Los aceites minerales que intervienen en estas mezclas, son los obtenidos en la destilación de la hulla o del petróleo, estando preferentemente constituidos por hidrocarburos saturados de 10 a 25 átomos de carbono.

Cuando la mezcla es íntima, la reacción teórica de combustión total, sin tener en cuenta la envolvente, será:



Según un artículo publicado en el Annual Review del The Mining Journal, los gases a que da lugar la explosión de estas mezclas explosivas, bien preparadas, son menos perjudiciales que los producidos por la dinamita; sin embar-

go, si se emplean en labores subterráneas, la ventilación tiene que ser necesariamente muy enérgica.

La mezcla puede efectuarse junto al mismo taladro, pero para ello es imprescindible que la atmósfera no sea húmeda; en este caso, debe efectuarse la mezcla en fábrica, y a ser posible en mezcladoras que midan automáticamente las cantidades que se vayan añadiendo, para que al detonar, la combustión sea completa y se produzca la menor cantidad posible de monóxido de carbono y vapores nitrosos, que son fuertemente tóxicos. Las mezcladoras proporcionan además mayor rapidez y mejor amasado. Una vez efectuada la mezcla, debe transportarse al lugar húmedo en sacos, que como los de polietileno, sirvan de protección contra la humedad.

#### VENTAJAS:

- 1a. Gran seguridad en su manipulación.
- 2a. Eficacia rompedora, dando lugar a una buena fragmentación.
- 3a. Extraordinaria economía.

La Monsanto Chemical Co. calcula un 57 % de ahorro en explosivos.

#### INCONVENIENTES:

1º Higroscopiacidad del nitrato amónico. Si se aglomera por la humedad:

- a) Fallos en las pegas.
- b) Al detonar la combustión no será completa.

- c) Aunque no se produce el fallo, disminuirá la potencia.
  - d) El almacenamiento del nitrato amónico es muy delicado.
  - e) Si es necesario impermeabilizar el aceite explosivo, la envolvente obliga a una mayor adición de nitrato amónico para conseguir la combustión completa, por tanto disminuirá la potencia del explosivo.
- 2º La pureza del nitrato amónico debe ser del 97%
- 3º Necesitan de un fuerte iniciador o mejor un multiplicador (goma pura y cordón detonante).
- 4º Si la mezcla no es muy íntima, se pueden producir los efectos a), b) y c) del primer inconveniente señalado.
- 5º Al cabo de un cierto tiempo que depende de la fabricación y de las materias primas, se produce la separación de los dos componentes.

### 3.- EXPLOSIVOS ANTIGRISU

GENERALIDADES.- El metano es un gas incoloro, inodoro y no venenoso, que se produce en la descomposición de las materias orgánicas. Es el compuesto principal de los yacimientos de gas natural. Pero su interés, para este estudio, se centra en que también se desprende en las minas de carbón, ya por soplos, por desprendimientos instantáneos,

por afluir de minados antiguos o de una manera regular a veces perceptible por el oído, como un crepitéo característico debido al conjunto de los diminutos crujidos que produce al arrancar pequeñas partículas.

Por tener un peso específico de 0,559 con relación al aire, se acumula en las campañas, realces y labores ascendentes, pero se va difundiendo con gran facilidad en el aire, y ya mezclado con él, no se separa de nuevo, dando lugar al GRISU.

Conviene aclarar que al definir el Grisú como metano + aire, este aire es una dispersión coloidal cuyo medio de dispersión es el gas aire, propiamente dicho, más o menos viviado, y la fase dispersa es el polvo de carbón.

En suma, el grisú es una dispersión coloidal.

El gran poder calorífico del metano (elevada proporción de hidrógeno) le da un gran valor como combustible, por ello hay instalaciones de captación del grisú, cuando éste impregna los hastiales. En estas instalaciones se convierte en materia prima industrial, como por ejemplo en Genk (Bélgica), donde se capta por drenaje de las capas y posteriormente se mezcla con gas de hulla.

Pero en el interior de la mina su peligrosidad es tanta, que hubo un tiempo en que no pudieron utilizarse los explosivos en la minería del carbón. hasta que aparecieron los antigrisú.

Conviene acotar los carbones, pues los lignitos no tiene grisú debido, probablemente a los terrenos en que se encuentran.

CARACTERISTICAS.- El grisú es una MEZCLA DETONANTE cuando la proporción metano/aire está DENTRO DEL INTERVALO:

5                      14 %

Para % menores al 5, el grisú arde en el aire con una llama pálida de color azul.

Se intenta justificar ese intervalo indicando, que si las moléculas del combustible están muy separadas por las moléculas de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, la velocidad de combustión será muy lenta y difícil de formar, por tanto no dará lugar a la onda explosiva. En cambio si las moléculas del combustible están muy juntas ( $\gg$  14%), tendremos ahora un déficit de moléculas de oxígeno.

En las galerías de prueba, se ha comprobado que el 9% es aproximadamente la proporción más peligrosa.

El grisú se inflama a partir de una TEMPERATURA MINIMA de 650°C, pero una vez a esta temperatura, la detonación tarda unos 10 seg. en producirse (retardo de explosión). En cambio, la DETONACION ES INSTANTANEA A PARTIR DE UNA TEMPERATURA de 2650°C.

EL RETARDO DE LA EXPLOSION tiene la siguiente justificación:

El grisú es una mezcla gaseosa cuya combustión se verifica según la reacción que determina su equilibrio químico. El equilibrio químico se consigue a una cierta temperatura, que si es menor de  $650^{\circ}\text{C}$ , la combustión es normal.

Si pasa de esta temperatura (punto de explosión), se inicia la onda de choque o de presión que calienta por compresión la mezcla gaseosa, inflamándola; verificándose este calentamiento en un cierto tiempo de aproximadamente 10 seg., que es el determinante del retardo de la explosión.

En la definición de detonación, debido a la acción mutua y concatenada del "calor" y de la "onda de choque", se hizo constar la necesidad de que exista el calor para que la onda del choque no se desvanezca, por tanto si el retardo de explosión es grande, la onda de choque avanza por delante de la llama, dejando entre ambas una zona de expansión que hace que la mezcla gaseosa se enrarezca y se vaya enfriando, pudiendo dar lugar a que la temperatura ya no sea mayor de  $650^{\circ}\text{C}$ , con lo cual la reacción explosiva no se ceba, y la posible explosión se extingue en régimen de deflagración. Luego es muy conveniente que los gases se expansionen rápidamente.

Además, cuando la expansión es lenta y la temperatura es mayor de  $550^{\circ}\text{C}$ , como los gases producidos en la explosión son siempre algo combustibles, pueden inflamarse, dando una llama cuya duración aún siendo muy corta, es decisiva

para la inflamación del grisú. Si el retardo de explosión es mayor que la duración de la llama, la detonación no se producirá. Pero no solamente interesa esta condición, que por ejemplo cumplen los nitrocuerpos aromáticos, sino que al tiempo, como éstos tienen balance de oxígeno negativo, darán gases combustibles, y por tanto la onda de choque puede por compresión elevar la temperatura, de tal manera que se produzca la inflamación de esos gases combustibles. La duración de esta inflamación ya no es tan corta.

Por tanto, cuando el grisú tiene un contenido en metano fuera del intervalo 5                    14 %, la velocidad de la onda de choque disminuye hasta su desvanecimiento, aparte de que unido al aumento del retardo de explosión, la temperatura de la reacción toma valores menores que su punto de explosión.

Estas explicaciones no son privativas del grisú; son comunes a muchas mezclas gaseosas industriales que pueden hacer explosiónar una caldera, si su temperatura se iguala a su punto de explosión y la refrigeración no cumple su cometido. También corresponden a motores cuyo combustible no está bien dosificado, y se paran por ahogarse en combustible o por exceso de aire ( en este caso interesa estar entre un máximo y un mínimo, no fuera de un intervalo como en el grisú).

Es condición también muy importante, que el tala

dro esté bien RETACADO, para que la onda explosiva y la presión de los gases se reduzcan lo más posible por el trabajo de arranque.

También es importantísimo que la TRANSMISION DE LA DETONACION SEA TOTAL. Si queda parte del explosivo sin detonar, al quedar libre, puede fácilmente arder en la atmósfera grisosa. El peligro es evidente.

Si en el carbón se inicia una combustión espontánea, se comprende el peligro que ello supone. Es necesario cortar este foco, ya sea por riego, cierre del cuartel peligroso, retirada rápida del carbón del foco, etc., pues esta combustión espontánea puede dar lugar a un incendio o a una explosión. Tetsuko Kitagawa (profesor of Safety engineering, Yokohama National University) ha indicado, que aunque la combustión espontánea puede detectarse por medida del calor que desprende la masa del carbón, por los humos, incandescentes, etc., en el 53 % de los casos se produce un olor particular debido a los hidrocarburos ligeros que se producen, y que si a veces este olor no es detectable por el olfato, sí lo podría ser por aparatos de medida muy sensibles y especiales, los cuales serían muy interesantes. Pero hoy día, lo más moderno para detectar una combustión espontánea es descubrir un hidrocarburo olefínico, los cuales se forman únicamente en la carbonización (combustión) del carbón, habiéndose tomado como detector principal el etileno por ser el de mayor pro

porción.

REGLAMENTACION .- Aunque el grisú manifiesta su peligrosidad a partir del 5% de metano, una labor se cierra cuando la proporción es del 2,5%, pues un pequeño soplo podría repentinamente elevar ese tanto por ciento dentro del intervalo peligroso.

Como es natural, con más del 14% nunca se trabaja, pues aunque en sí no es peligroso, la ventilación puede bajar esa proporción en cualquier instante; además, del 14% al 0% (aire sin metano) existirá, como es natural, una zona peligrosa.

RECONOCIMIENTO DEL GRISU .- Existe una gran cantidad de sistemas para analizar atmósferas grisuosas, todos ellos basados en propiedades físicas o químicas del metano, como por ejemplo el aparato Torres Quevedo: consiste en un tubo que es atravesado por un hilo de platino el cual una vez puesto incandescente, su resistencia varía en función del tanto por ciento de metano existente en la atmósfera. Una vez graduado convenientemente el amperímetro, obtenemos por lectura directa el tanto por ciento de metano.

Sin embargo, ningún método ha logrado desplazar a las antiguas LAMPARAS DE SEGURIDAD, basadas en la relación existente entre el tanto por ciento de metano y la forma de una aureola azul pálida sobre la llama. Los gases producidos en esta combustión son enfriados al pasar por la tela metáli

ca.

Estas lámparas son sensibles a partir del 1%.

Hoy en general el minero ya no usa lámpara de seguridad, ésta la lleva el vigilante. Conviene tener en cuenta que las lámparas de seguridad no son absolutamente seguras, pues ellas mismas pueden ser causa de accidente: si la llama atravesase la tela metálica debido a una corriente fuerte de aire, o si esta tela se pusiese al rojo debido a una gran cantidad de grisú (intervalo de peligro); en este caso, la lámpara hay que moverla sumamente despacio.

El grisú es de tanta importancia, que no hemos dado por terminado su estudio. En este capítulo hemos visto sus Generalidades, Reglamentación, Reconocimiento y también sus Características; basándonos en éstas, vamos a estudiar en el capítulo siguiente, cómo deben de ser los explosivos de seguridad, uniendo al grisú el peligroso polvo de carbón.

#### 4. EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD .- (Acción del nitrato amónico).

En la minería del carbón existen dos tipos de atmósferas peligrosas, las cuales hay que tener muy en cuenta en los métodos de arranque con explosivos. Las dos atmósferas inflamables están formadas por:

1o. POLVO DE CARBON.

2o. GRISU.

Al estudiar los explosivos antigrisú ya vimos unos límites de explosión. El polvo de carbón en suspensión en el

aire, denota a partir de 10 gramos por m<sup>3</sup>. de aire. Si se produce una explosión de grisú, ésta se apagará al llegar a un contenido en metano menor del 5%, pero si en un punto de una galería hay polvo de carbón "peligroso", puede aquélla cebar la explosión de este polvo, y ésta propagarse por toda la galería. Esta concatenación de factores, afortunadamente es poco frecuente, pero puede ocurrir, y así sucedió en el accidente de la Couvrier (N. de Francia) en 1906. Se produje ron 1,100 muertos. Desde entonces, al polvo de carbón se le ha dado la importancia debida.

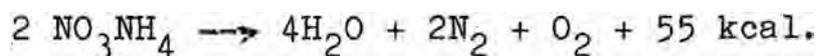
Si en estas atmósferas se trabajase con un explosivo normal, el encendido de una mezcla grisosa o la detonación del polvo de carbón sería un peligro continuo.

Dentro de los explosivos de seguridad que se adoptan para trabajar en estas atmósferas, conviene en seguida advertir, que si con ellos el trabajo es imprescindible, y puede considerarse sin aparentes riesgos, su seguridad no es absoluta. Esto será evidente hasta no conseguir un límite de terminado en la definición práctica de explosivo de "seguridad". Hoy no existe y no será fácil de conseguir. La razón de esto se irá comprendiendo a lo largo de este capítulo.

Teniendo presente todo el fundamento explicado en el capítulo anterior, se comprende que un explosivo antigrisú, ha de tener una GRAN VELOCIDAD DE DETONACION que le permita realizar su función en un tiempo menor que el retardo

de explosión; de manera que aunque no se pueda evitar que el explosivo tenga una temperatura de la explosión mayor de 650° C (siempre procurando sea la menor posible), hay que intentar que los gases producidos se hayan enfriado por debajo de los 650°C antes de terminarse el plazo que permite el retardo.

Para rebajar LA TEMPERATURA DE LA EXPLOSION, se adciona a los explosivos de seguridad un mínimo de 70% de nitrato amónico (T. de la explosión = 1.163°c). Esta es la acción principal de esta sal, junto a su balance de oxígeno positivo, según la reacción:



Pero esta reacción se verifica con CEBOS ENERGIÇOS, condición que debe tener todo explosivo de seguridad, ya que si la detonación no es enérgica, el nitrato amónico se descompone de diferentes maneras, ninguna de las cuales da oxígeno, y sí óxidos de nitrógeno que pueden activar la explosión del grisú.

Por la poca sensibilidad al choque o rozamiento de los explosivos a base de nitrato amónico, necesitan una iniciación fuerte, por ello presentan GRAN SEGURIDAD EN SU MANEJO.

Aún con cebo enérgico, puede haber otras causas accidentales por las que el explosivo no detone a gran velocidad, y ésta pudiera bajar tanto que fuese en régimen de de-

flagración. Para evitar ésto, puede adicionarse nitroglicerina, por su sensibilidad y elevada velocidad de detonación.

En EE.UU. emplean actualmente un explosivo a base de nitrato amónico y petróleo.

En repetidas ocasiones se ha hecho mención de la importancia del atraque perfecto para conseguir la máxima potencia. Pero aquí resulta doblemente necesario, pues si existen fisuras, grietas sin tapar o taladro mal retacado, la energía calorífica de la explosión no se invierte totalmente en el trabajo de arranque y fragmentación, proporcionando a los gases producidos una temperatura que, aún con el retardo de explosión, no impedirá la detonación del grisú. Es necesario que la carga del tiro se invierta totalmente en el trabajo del arranque y fragmentación, por ello también es condición necesaria en un explosivo de seguridad, que su CARGA NO SEA EXCESIVA PARA EL VOLUMEN A ARRANCAR, debiendo emplear "cargas reducidas".

Si al realizar varios tiros éstos no son instantáneos, la detonación de un tiro puede resquebrajar el recubrimiento del adyacente, formándose fisuras con las consecuencias señaladas en los párrafos anteriores. Como realizando las pegas con mecha la instantaneidad de los tiros es muy difícil de conseguir, el uso de la pega eléctrica en minas griuosas es casi obligada.

Un grave peligro se presenta cuando profundizando

un transversal se llega a una capa de carbón. Los primeros tiros dejarán la capa al descubierto. Los que explosionan después lo harán prácticamente en la capa de carbón, y no realizan apenas trabajo mecánico. Ello se agrava por la producción de gran cantidad de polvo de carbón.

A veces es inevitable la instantánea aparición de una llama, procedente de la inflamación de los gases combustibles por la detonación de los nitrocuerpos aromáticos o nitrocelulosas que llevan los explosivos de seguridad. La propagación de esta llama hay que cortarla también instantáneamente. Esta es la misión de las sales alcalinas que se adicionan a los explosivos de seguridad.

La sal alcalina más utilizada por ser la que mejores resultados da, es el cloruro sódico. A la ventaja de estas sales alcalinas de ser antillamas, unen la gran desventaja de ser sales inertes dentro del concepto de explosivo, por ello su adición rebaja la capacidad de trabajo, la sensibilidad, y puede disminuir su estabilidad.

Antes de añadir una sal inerte, puede a veces convenir añadir un poco más de nitrato amónico, o retacar con polvo de sal inerte.

Algunos países fabrican explosivos de seguridad recubiertos de una envoltura de protección apagadora de llamas, de forma que los humos fríos del revestimiento, amortigüen el calor de los gases producidos en la detonación del explo-

sivo del núcleo. Esta idea es original de Lemaire. Al principio esta envuelta era pulverulenta y ligera, hoy se compone de anillos rígidos.

En Alemania se utiliza para revestir, una mezcla de bicarbonato sódico, sal gema y un 10% de nitroglicerina. En Inglaterra la mezcla es de bicarbonato sódico más de un 15 a un 18% de nitroglicerina. El Reglamento belga exige la envoltura del cartucho con sales inertes (principalmente anillos rígidos comprimidos de cloruro sódico). Las llamas desaparecerán pero la potencia del explosivo disminuye.

Cuando la vaina del fuminante es de aluminio, al explosionar desprende partículas incandescentes de ese metal, fácilmente iniciadoras de una explosión de grisú. Como esta incandescencia metálica no la pueden evitar totalmente las sales inertes, en la minería del carbón (en capa), está totalmente prohibida la utilización de fulminantes con vainas de aluminio.

FABRICACION. ALMACENAMIENTO .- La fabricación de los explosivos de seguridad es sumamente SENCILLA, y en líneas generales consiste en la mezcla de los componentes molidos y desecados a una temperatura  $\approx 100^{\circ}\text{C}$ . Enfriada la mezcla, se tamiza y se cargan los cartuchos sin comprimirles, para que puedan detonar aun con cebos normales, por ello su DENSIDAD DE CARGA es MENOR que la del resto de los explosivos, y recordando la fórmula de la potencia es natural su me

nor poder rompedor. Pero esta desventaja es inevitable si se quiere conservar la seguridad, junto con la ventaja de ser los explosivos más BARATOS.

Los cartuchos son parafinados contra la humedad, pues debido al elevado tanto por ciento de nitrato amónico, estos explosivos presentan una gran higroscopicidad que puede llegar a inutilizarlos. Mas si se consevan SECOS NO ENVEJECEN, conservando su primitiva velocidad de detonación.

El profesor Dr. Ing. W.B. Cybulski ha realizado un extenso estudio de la influencia de la duración del almacenamiento de los explosivos, sobre su aptitud para la detonación en los explosivos polacos. Al comparar la disminución del ensayo en bloque de plomo al umentar la humedad, ha hecho constar que si el explosivo era a base de nitrato amónico, esta influencia era notable a partir de 1 a 1,5 % de humedad, e independiente del tiempo de envejecimiento, siendo amortiguada por la presencia de cloruro sódico. Los explosivos a base de nitroglicerina, empiezan a disminuir el ensayo en bloque de plomo cuando la humedad es de 2 a 2,5%, y que las variaciones de su aptitud para la transmisión de la explosión, no dependen de la humedad; en cambio, en los explosivos a base de nitrato amónico, la humedad es un factor importantísimo para la disminución de la distancia de transmisión. En estos explosivos se ha observado que su velocidad de detonación no era apenas afectada por la humedad, cuando el tiempo de almacenamiento no era superior a un año (pero hay que tener en cuen

ta que la posibilidad de excepciones está siempre presente): pero si este explosivo a base de nitrato amónico se mejoraba en sus características rompedoras, se observaron fuertes variaciones de la velocidad de detonación, función de la humedad y del tiempo. La velocidad disminuye en un 24% a los 3 meses y en un 31% a los 11 meses.

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD DE USO NORMAL .- Los explosivos de seguridad para minas de carbón utilizados en el momento actual, son de varios tipos, pero se utilizan, casi exclusivamente, los siguientes semi-gelatinosos:

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD N° 2 .- Se emplea para roca, con carga máxima de 500 gramos. Su composición es la siguiente:

Nitroglicerina . . . . .	. . . . .	29,10 %
Nitrocelulosa . . . . .	. . . . .	0,90 %
Nitrato amónico . . . . .	. . . . .	70,00 %
Temperatura de la explosión =		1,929°C
Velocidad de detonación =		3,581 m./seg.
Oxígeno sobrante sin la envoltura=		+ 610,2 litros.

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD Nos. 7 y 7 BIS .-

(Nitroglicerina . . . . .	. . . . .	11,76 %
N° 7(Nitrocelulosa . . . . .	. . . . .	0,24 %
(Nitrato amónico . . . . .	. . . . .	88,00 %
Temperatura de la explosión =		1,614°C

Velocidad de detonación = 2,976 m./seg.

Oxígeno sobrante sin la envoltura= + 103,5 litros.

El N° 7 bis tiene una ligera proporción de cloruro potásico ( $\approx 6\%$ ) y de serrín ( 2 % ):

Temperatura de la explosión = 1,429°C

Velocidad de detonación = 2,568m./seg.

Oxígeno sobrante sin la envoltura = + 134,6 lits.

Estos dos explosivos se utilizan (especialmente el 7) en capa, con carga máxima de 500 gramos, o de 1,000 gramos sin papel parafinado.

Están autorizados como explosivos ordinarios para roca, con carga máxima de 1,000 gramos, bajo determinadas condiciones de empleo, las Cajas Especiales Nos. 1 y 2. Estos explosivos de seguridad se presentan también en calidad incongelable.

## CAPITULO X

### FULMINANTES Y MECHAS

#### Composición y Tamaño del Fulminante .-

Al estudiar los explosivos iniciadores, se vio su necesidad para provocar la detonación del resto de los explosivos.

La mezcla iniciadora rellena el interior de una "capsula", la cual se encuentra dentro de un "cartucho", que si es metálico se denomina "vaina".

A todo artificio capaz de transmitir la detonación a los explosivos rompedores, se denomina fulminante.

A la cápsula detonadora se le comunica el fuego mediante una mecha o por electricidad. El artificio capaz de transmitir la explosión al fulminante, o de producir la deflagración de la pólvora negra, se denomina MECHA.

DETONADOR es el conjunto de fulminante y mecha. Hay que tener en cuenta que, a veces, se denomina detonador al fulminante y así se dice que un detonador no lleva mecha y que el usuario le adapta la necesaria según la longitud del taldro.

En la punta inicial de la mecha puede adicionarse un "encendedor" o "estopín", que es el encargado de iniciar cargas deflagrantes.

Hoy día no es corriente la fabricación de fulminan

tes simples, fig. 11, a base nada más que de fulminato de mercurio.

Son más normales los fulminantes compuestos, fig. 12. Constan de una pequeña cápsula iniciadora, y relleno la parte interior del cartucho o vaina, hay una carga de trilita o tetralita, preferentemente.

Las vainas más usuales son las de latón, cobre o aluminio. Este último metal da lugar a esquirlas incandescentes, por lo que sus vainas están prohibidas en las minas de carbón, en ellas las vainas siempre son de cobre. Cuando la vaina es de aluminio, la carga del cebo es de nitruro y trinitroresorcinato de plomo.

La velocidad de detonación de un explosivo es función muy importante de la iniciación que se le comunique; según vaya siendo más enérgica la iniciación, el explosivo detonará a mayor velocidad, y por tanto con una potencia más elevada, hasta llegar a la máxima que pueda dar.

Por regla general, al comprar un explosivo, la misma fábrica aconseja el fulminante adecuado, sino, hay que empezar por verificar la prueba de fulminantes, que es una medida relativa de la potencia de él, según la cual, producirá un mayor o menor volumen perforado en una plancha cuadrada de plomo.

Una vez obtenido el fulminante que dé la máxima velocidad de detonación, en evitación de una posible disminu -

ción de la fuerza de él, no se debe emplear éste, sino el siguiente de mayor fuerza u otro superior, si junto a conseguir el mejor rendimiento, se quiere obtener también una mayor seguridad.

Existen en el mercado mundial los siguientes tipos de fulminantes:

Sencillo. . .	Nº 1 :	Fuerza de 0,30 grs de fulminato de mercurio
Doble . . . .	Nº 2 :	" " 0,40 " " " " "
Triple . . .	Nº 3 :	" " 0,54 " " " " "
Cuádruple . .	Nº 4 :	" " 0,65 " " " " "
Quíntuple . .	Nº 5 :	" " 0,80 " " " " "
Séxtuple. . .	Nº 6 :	" " 1.00 " " " " "
Séptuple. . .	Nº 7 :	" " 1,50 " " " " "
Octuple . . .	Nº 8 :	" " 2,00 " " " " "
Nónuple . . .	Nº 9 :	" " 2,50 " " " " "
Décuple . . .	Nº 10 :	" " 3,00 " " " " "

Los fulminantes cuya utilización es más corrientes, en el Perú, son los números 6 y 8.

#### DETONADORES ELECTRICOS .-

##### DESCRIPCION

Se llama detonador eléctrico al conjunto formado por la cápsula detonadora y el inflamador eléctrico con sus hilos de empalme, representados en la fig. 13.

V. es la vaina metálica en la cual se han introducido a presión el explosivo base EB y el explosivo iniciador. EI, limitado este último hacia arriba por el opérculo metálico O; P es la píldora encendedora (C), que al inflamarse origina la detonación del explosivo iniciador, y con ello de toda la cápsula. Su detonación es tan intensa que permite el encendido de todos los explosivos reglamentarios.

El inflamador contiene una combinación química especial, formada alrededor de un filamento metálico cuyos extremos van soldados a los dos hilos de empalme H. Cuando este circuito es atravesado por una corriente eléctrica adecuada, el filamento se calienta y prende al inflamador en el momento de alcanzar una temperatura de unos 250°C.

El espacio que rodea al inflamador y comprendido entre el tapón, explosivo iniciador y vaina, puede, a veces, rellenarse con pólvora eléctrica, pero no es necesaria.

La unión del filamento con los hilos de empalme se hace por medio del porta-cebo aislante PC, soldándoles a sus dos caras metálicas. Como el filamento forma puente entre estas dos caras, el inflamador es del tipo llamado "inflamador de puente". En el momento actual, en España no se utilizan industrialmente los cebos eléctricos de chispa.

El cierre de la cápsula se hace por medio del tapón T de material plástico, el cual tiene dos perforaciones para el paso de los hilos de empalme. Para asegurar su posi-

ción y al mismo tiempo el cierre hermético, se magulla el extremo de la vaina en una máquina especial, arrugándolo de tal manera que el cobre se enganche íntimamente con el plástico y forme una unión inseparable.

En los detonadores de retardo la construcción es idéntica a la anteriormente descrita, con la única excepción de interponer entre el inflamador y el opérculo un elemento de retardo R. El retardo originado por este elemento es directamente proporcional a su longitud, de modo que los detonadores de tiempos diferentes se distinguen únicamente por la longitud de su elemento de retardo.

#### CARACTERISTICAS .-

1a. La cápsula detonadora es del tipo N° 8 según la ordenación internacional, es decir, que tiene un diámetro exterior de 6,8 mm., y una potencia detonadora equivalente a una carga homogénea de 2,0 grs. de fulminato de mercurio, como explosivo base, y de 0.70 grs. de fulminato de mercurio como explosivo iniciador. Esta potencia es suficiente para hacer explotar prácticamente todos los explosivos que están en uso en el mercado. La vaina es de cobre, con lo cual puede ser utilizado también en minas grisuosas.

2a. El cierre de la cápsula y el aislamiento de los hilos de empalme, se fabrican de un plástico de alto poder aislante, resistente a la humedad e ininflamable, que permi

te el empleo de estos detonadores en minas grisuosas. El ajuste hermético del cierre es tan perfecto que se puede sumergir los detonadores enteramente en agua durante varias horas, sin que por ello sufra su poder iniciador.

3a. La resistencia eléctrica de cada detonador, se comprueba tres veces en el curso de la fabricación, para poder garantizar con toda seguridad que su valor efectivo corresponde a la clase iniciada. Como la pega simultánea de gran cantidad de detonadores conectados en serie, exige que sus resistencias individuales sean lo más iguales posibles entre sí, se clasifican todos los detonadores en siete clases (tabla I), y se recomienda que nunca se empleen en una sola pega detonadores que pertenezcan a clases diferentes.

TABLA I  
CLASIFICACION DE LOS DETONADORES SEGUN  
SU RESISTENCIA ELECTRICA

<u>Clase</u>	<u>Resistencia eléctrica del detonador sin hilos</u>
1	1,0 - 1,2 ( $\pm 0.025$ )
2	1,2 - 1,4 "
3	1,4 - 1,6 "
4	1,6 - 1,8 "
5	1,8 - 2,0 "
6	2,0 - 2,2 "
7	2,2 - 2,4 "

4a. Los dos hilos de empalme generalmente son de cobre estañado de 0,5 mm. de diámetro con un largo de 1,5 m. cada uno. Su aislamiento es de cloruro polivinílico, materia ininflamable y reconocida por su resistencia contra el rozamiento y la humedad. El estañado del cobre lo protege contra oxidaciones en sus extremos libres, facilitando así su empalme eléctrico.

5a. Los detonadores de retardo, se distinguen de los instantáneos por dos características: la primera, es la introducción del elemento de retardo (mezcla combustible especial) entre el cebo inflamador y el opérculo, cuya longitud varía con el tiempo de retardo deseado; la segunda, es la composición del inflamador que hace que se quemé sin desarrollar cantidades notables de gases.

Los tiempos de retardo normales así como las longitudes correspondientes de las cápsulas, están reunidas en la tabla II. La combustión sin desarrollo de gas, es necesaria en atención al cierre hermético de la cápsula, para evitar que una sobrepresión eventual originada por la combustión del cebo, influya desfavorablemente sobre el tiempo de combustión del elemento de retardo.

TABLA II

## DIMENSIONES DE LOS DETONADORES DE RETARDO

<u>Tiempo de retardo</u>	<u>Longitud del detonador</u>
1 segundos	64 mm.
2 "	64 "
3 "	66,5 "
4 "	69 "
5 "	71,5 "
6 "	74 "

En esta serie hay que contar también con el retardo cero (instantáneo) cuya longitud es de 64 mm.

## GENERADORES DE CORRIENTE .-

Para producir la corriente necesaria, existen tres clases de fuentes de energía: una batería o pila, la red de alumbrado, y máquinas especiales dinamo-eléctricas. La primera solución, por el peso y los costes de adquisición y conservación de las baterías, tiene una aplicación muy limitada y solamente entra en consideración para la pega simultánea de muy pocos detonadores, o sea, cuando basta una tensión de encendido reducida. La utilización de la red de alumbrado, a veces representa el sistema más cómodo, pero exige precauciones especiales para evitar un encendido fortuito, sea por mala conexión o por descuido; en atención a lo cual, algunos

países incluso han llegado a prohibir su uso, salvo para casos excepcionales.

Lo más adecuado para Empresas que emplean los detonadores eléctricos con cierta regularidad, es sin duda el uso de las máquinas dinamo-eléctricas. Como solamente pueden producir corriente en el momento de ser accionadas, y como además la manivela de accionamiento es desmontable y se encuentra siempre en poder del jefe del servicio, un encendido fortuito es prácticamente imposible. Estas máquinas son fáciles de transportar y de construcción muy robusta, por lo cual pueden ser utilizadas en cualquier trabajo de voladura, incluso en minas grisuosas.

#### CONEXION DE LOS DETONADORES .

Para la pega simultánea de varios detonadores, existen las cuatro conexiones fundamentales, representadas en los esquemas IV, V, VI, o sea, la conexión en serie, en paralelo y en serie-paralelo o paralelo-serie. Sobre las ventajas o inconvenientes de cada uno de estos sistemas conviene destacar lo siguiente:

La conexión en serie (esquema IV) es la más favorable para la gran mayoría de los casos, por los siguientes motivos:

a) Es fácil de realizar, generalmente por interconexión directa de los hilos de empalme de los mismo detonado

res, y prácticamente sin error posible.

b) Una vez terminado el conexionado, es fácil controlarlo desde lejos, con sólo medir la resistencia entre los bornes AB; como cualquier interrupción o cortocircuito se reflejará en ella, no es posible que uno o varios detonadores queden sin corriente, en el momento de la voladura. Tiene esta conexión el inconveniente de necesitar una tensión de encendido elevada, cuando se quiere disparar un gran número de detonadores a la vez. Prácticamente, sin embargo, esta limitación es de poca importancia, ya que las máquinas dinamo-eléctricas modernas permiten la conexión en serie hasta de 100 detonadores.

La conexión en paralelo (esquema V) tiene la ventaja de permitir el empleo de una fuente de energía de poco voltaje y, por ello, en ciertos casos, podría ser preferible a la conexión en serie.

Por otro lado, tiene el gran inconveniente de no permitir con tanta sencillez, comprobación eléctrica del circuito terminado, es decir, el buen contacto de cada uno de los detonadores con la línea general de encendido. Como además, la realización práctica de esta conexión es más difícil que la anterior, fácilmente puede ocurrir que por contactos mal dispuestos, uno o varios detonadores del circuito no llegaran a detonar. Por este motivo, la conexión en paralelo se emplea únicamente en casos excepcionales.

Las conexiones mixtas (esquemas VI y VII) son com-

binaciones de las dos anteriores y reúnen, por tanto, parte de sus ventajas e inconvenientes. Como ninguna de ellas ofrece la misma sencillez y facilidad de control eléctrico desde lejos como la conexión en serie, se emplearán únicamente en casos, en los que el número de detonadores es tan grande, que la fuente de corriente no tenga potencia suficiente para encender todos en la conexión serie.

En cuanto a su rendimiento eléctrico, ambos sistemas son equivalentes, supuesto, naturalmente, que cada circuito se compone de grupos iguales entre sí.

#### VENTAJAS .-

1a. Permiten la ignición simultánea de los tiros en las voladuras. Ventaja muy importante en las minas grisosas, con lo que la seguridad se acrecienta. En las pegas con mecha es prácticamente imposible la simultaneidad de los tiros. Con esta ventaja, se conseguirá una mayor intensidad en el trabajo por la suma instantánea de fuerzas.

2a. Permiten el uso de cápsulas de alta concentración de carga, tanto en taladros superficiales como en profundos.

3a. Permiten los tiros espaciados con retrasos escalonados. Esta ventaja supone el ahorro de tiempo necesario entre pega y pega, si se efectuasen con mecha. Los cebos con retardo de milisegundos permiten un gran fraccionamiento.

4a. En caso de un fallo, pueden volverse al tajo a los diez minutos aproximadamente (3 veces antes, por lo menos, que en pegas con mecha). Mucho antes de esos diez minutos, la carga habrá detonado, después de pasar por el régimen de deflagración, si su iniciación sólo dio lugar a una combustión lenta. Si el fallo ha sido debido a la interrupción del circuito no puede ocasionar accidentes. Los fallos son muy poco frecuentes.

5a. Su utilización está exenta de la producción de humo, no así las mechas lentas.

6a. Permiten que la ignición se efectúe desde un punto alejado del taladro, evitando las precipitaciones en busca del refugio, propias de las pegas con mecha.

7a. Considerando su rendimiento total, representa una ventaja económica cuando se efectúa un gran número de tiros, su costo más elevado y el tiempo que se invierte en la colocación y enrollamiento de los conductores (si se van a realizar muchas pegas, deben instalarse conductores principales fijos), quedan compensados con creces ante la exactitud y seguridad de la pega eléctrica.

#### DESVENTAJAS .-

En realidad todas derivan del peligro de un encendido prematuro de los detonadores, el cual puede ser debido a:

1a. Corrientes parásitas debidas a otros generadores, y que pueden cerrar el circuito de la pega eléctrica, especialmente cuando se emplea la tracción por locomotora con cable de contacto, o cuando los hilos del cebo y los conductores tienen contacto con conductores portadores de corriente (carriles, tuberías, canales de ventilación, etc.).

Para tender a evitarlas, se debe hacer un conexasiónado con aislamiento perfecto, y si el número de tiros en cada pega es elevado, se efectuarán las conexiones una vez que todos los detonadores estén en sus taladros, y mientras tanto, en cada detonador, se unen los extremos de sus hilos de emplame, creando un cortocircuito de protección total contra las corrientes parásitas.

2a. Conexión prematura. Para evitarla es conveniente dejar los extremos del circuito de disparo en cortocircuito. Existen medidas adicionales de seguridad, que consisten en interruptores especiales de disparo.

3a. Corrientes durante la comprobación eléctrica. Antes de efectuar la pega, siempre debe comprobarse el circuito eléctrico. Para evitar accidentes por estas corrientes, aun utilizando los comprobadores técnicos adecuados, debe el personal tomar idénticas precauciones que en el momento de la pega.

4a. Descargas eléctricas atmosféricas. Se han dado casos de pegas adelantadas, especialmente en el avance de so

cavones; en ellos, es conveniente tomar las dispositivos eléctricas de seguridad que son indicadas para la protección contra el rayo.

#### MECHAS .-

Son unos artificios, cuya "alma", en forma de filamento, está formada por una sustancia explosiva debidamente recubierta.

Pueden distinguirse 2 tipos principales:

Mechas LENTAS

Mechas RAPIDAS o DETONANTES

La pólvora negra más normal que consigue la velocidad en mechas lentas es la de composición:

$\text{NO}_3\text{K}$  - 62 %; S - 25 %; Carbón - 13 %

Las mechas rápidas tienen una gran velocidad de detonación, pues en lugar de pólvora negra, llevan una carga explosiva de trilita, tetralita o pentrita. La iniciación de la explosión de esta "alma explosiva" se efectúa mediante un cebo, el cual detona por el fuego de una mecha lenta.

Teniendo en cuenta la velocidad de combustión de las mechas lentas, la longitud mínima que debe dárseles es aproximadamente de 1 m. En realidad es algo excesivo esta longitud mínima, pero existen diferentes causas, por las que una mecha puede, accidentalmente, fallar y tener una velocidad de combustión propia a la deflagración, produciendo la detona -

ción del fulminante y por consiguiente la de la carga explosiva sin tiempo para que el periferista pueda retirarse.

El fallo de la mecha también, puede ser debido a una disminución en su velocidad de combustión, con lo que se origina un retardo, que también puede ser debido a fallo del fulminante; mucho más peligroso que los taladros fallados, son los que contienen un resto de explosivo, pues serán tomados como libres.

Los tipos de mecha que puedan encontrarse en el mercado son los siguientes:

Mecha sencilla .- Lleva un hilo central de pólvora, tres envolturas de yute y una capa de alquitrán. Debe emplearse solamente en lugares y países secos.

Mecha doble.- Tiene un hilo central con pólvora, tres envolturas de yute y una capa de alquitrán. Conviene en sitios secos de regiones húmedas.

Mecha cinta.- Es una mecha sencilla con una envoltura además de tela y capa de alquitrán. Se puede emplear en trabajos ligeramente húmedos.

Mecha gutta.- En principio es como una mecha sencilla, sobre la que se coloca una capa de gutapercha, y, sobre ella una capa de papel y otra de algodón, embreándose finalmente. Apta para trabajos muy húmedos o con agua.

Mecha triple.- Está formada por un hilo central de pólvora, cuatro envolturas de yute y tres capas de pintura y

alquitrán. Por ser ignífuga y, además impermeable, está indicada para minas de carbón grisuosas y para trabajos en agua.

Mecha submarina.- Es una mezcla gutta con las capas impermeables reforzadas, y en las que las envolturas de papel y algodón, son sustituidas por otras de tela y yute, pintándose después con alquitrán. Esta mecha es recomendada para trabajos a grandes profundidades, en que haya necesidad de resistir fuertes presiones de la masa líquida.

## CAPITULO XI

### GENERALIDADES SOBRE EL USO DE LOS EXPLOSIVOS EN CANTERAS Y MINAS

#### CANTERAS O ARRANQUE DE MATERIALES PETREOS A CIELO ABIERTO

1.-Explosivos.- La elección del explosivo a utilizar es la cuestión previa más importante a resolver, y la que más debe preocupar al director de la explotación, ya que de ella va a depender el futuro económico de la misma.

En esta elección intervendrán como variables o factores a considerar las características mecánicas de la roca, que es preciso conocer perfectamente, y el destino ulterior del material arrancado. En las canteras de calizas con destino a la fabricación de cementos portland, así como en las rocas duras para grava, convendrán explosivos de gran poder rompedor y uno más caro, pero que fragmente mejor puede en definitiva resultar más barato que otro que rompa menos, porque los gastos de cantera, posteriores a la pega, sean más bajos, así como los de la instalación de molienda en la fábrica.

2.- Preparación de la cantera.- Los trabajos preliminares de apertura del frente de ataque o frente de cantera pueden y deben aprovecharse para el exacto conocimiento de las características de la roca, y para dilucidar con ensayos prácticos las dudas que sobre la elección de ex

plosivo puedan presentarse; sólo se tratará de comparar el comportamiento (rendimiento o poder de arranque, fragmentación o poder rompedor y lanzamiento) de dos, o a lo sumo tres, explosivos preseleccionados en el estudio teórico.

Un estudio geológico y topográfico debe preceder a la elección del punto en que se va a comenzar la explotación, pues hemos de recordar que si el terreno tiene planos de estratificación, el buzamiento de los mismos debe ser el que fije la dirección de ataque, ya que los taladros deben, en lo posible, horadarse perpendicularmente a los planos de estratificación, por ser esta la forma en que se logra el máximo arranque.

3.- Explotación.- El ideal de una explotación es llevar, si las condiciones geológicas no son totalmente o - puestas a ello, un amplio frente de cantera de paramento sensiblemente plano y vertical (fig.14); para comenzarla, es por tanto, preciso arrancar el prisma. A, de roca superficial de mala calidad, labor preparatoria en la que pueden comprobarse las características mecánicas de la roca y la conveniencia para decidirse por uno u otro explosivo.

4.- Orden de las pegas.- En beneficio de la economía conviene efectuar voladuras grandes de varios miles de metros cúbicos de piedra, para lo que, generalmente, no basta con una sola fila de taladros y la pega tiene que comprender tres y aun cuatro o más filas. Todos los barrenos

de una misma fila se volarán, salvo lo que se explica en el subtítulo "Taqueo", simultáneamente, pero las filas deben volarse con retardos; primeramente se volará la fila primera o más próxima al frente de cantera; después la fila segunda, a continuación la tercera, y así sucesivamente.

5.- Taqueo.- Se denomina así la operación auxiliar mediante la cual, y con el auxilio de explosivos, se rompen los grandes bloques de piedra que la voladura ha producido, a fin de permitir su carga y transporte. En la forma en que, habitualmente, se conducen las explotaciones el consumo de explosivos en el taqueo viene a ser el veinte por ciento del empleado en el arranque.

La supresión total de taqueo es practicamente im posible, pues siempre en las voladuras se suelen producir fallos; totales o parciales de algún taladro, bien porque algún fulminante deja de tomar fuego o lo haga con retardo anormal o porque algunas cargas detonen con velocidades menores de las previstas y estos fallos dan lugar a grandes bloques; pero los taqueos deben de quedar reducidos a este mínimo; si se ha sabido elegir un explosivo de adecuado poder rompedor y la pega ha sido preparada y ejecutada científicamente.

### TUNELES O GALERIAS

1.- Explosivos.- Para su elección hay que distinguir dos casos bien dispares: que la galería sea el medio

de arrancar un determinado mineral o que ésta (el túnel) constituye el fin. En el primer caso el problema es de mínimo costo. Generalmente, en el segundo caso el problema es de mínimo tiempo, y dentro de límites razonables el costo del arranque de un metro cúbico de material debe quedar subrogado al tiempo empleado en el mismo; el rendimiento (peso en kilogramos del explosivo necesario para arrancar un metro cúbico) viene expresado por la fórmula:  $C = K' \cdot K''$ .

$C$  = Carga en Kilogramos que arranca un metro cúbico de material.

$K'$  = Coeficiente del explosivo

$K''$  = Coeficiente del medio.

Por lo tanto, para un material, cuyo  $K''$  tiene un valor determinado, el rendimiento queda subordinado al valor del coeficiente  $K'$  del explosivo, siendo tanto mayor cuando más pequeño es este coeficiente. Puede verse que los explosivos cuyo  $K'$  es más pequeño, son precisamente los más caros, o mejor dicho, aquellos en que el kilogramo cuesta más, y si este mayor precio no se compensa con el mayor arranque puede resultar más caro el metro cúbico arrancado, pero puede convenir aceptar este mayor costo en beneficio de un menor tiempo de ejecución de la obra, ya que por estar el tajo limitado al área o sección del túnel el equipo de perforadoras a emplear es forzosamente limitado, por razón de espacio, y por lo tanto, el avance lento, no cabiendo más com

pensación a esta falta de espacio (aparte de la primordial del poder de arranque del explosivo) que acometer por ambas bocas a la vez e incluso, cuando el túnel va dotado de pozos, o chimeneas de ventilación, adelantar la perforación de éstos para que, llegados a la cota de la galería, se abran otros dos nuevos frentes de ataque.

Es frecuente que en las galerías que se excavan para el arranque de minerales, en el frente de avance se presente, además del mineral útil, rocas que también es preciso arrancar, pero que tienen características mecánicas y, por lo tanto, valores del coeficiente  $K''$ , muy diferentes de aquél. En este caso, que se presenta sobre todo en las minas de carbón, donde, además de éste, hay que arrancar rocas mucho más duras, es muy conveniente llevar la explotación con dos explosivos diferentes, uno más potente para las rocas inertes y otro más flojo para la capa, veta o filón de mineral.

Finalmente, en la minería del carbón la elección de explosivo ha de ser objeto de estudio mucho más cuidadoso. Desde luego si la mina está oficialmente clasificada como grisutos, el campo de elección queda legalmente constreñido al de los explosivos de seguridad; pero, no hay que olvidar, que el polvo de carbón prácticamente imposible de eliminar, es también altamente peligroso.

Así como en las explotaciones a cielo abierto

no tiene que preocupar nada, la toxicidad de los gases de la explosión, aquí ha de ser problema de atención primordial. En primer lugar han de quedar proscritos todos los explosivos con balance de exígeno negativo, pero aun aquellos <sup>que</sup> tienen una gran exuberancia de oxígeno son peligrosos, pues el terrible e incidioso óxido de carbono se forma siempre, aun en los explosivos más oxigenados, en el período de expansión.

Es, por tanto, indispensable contar con medios de ventilación adecuados y ponerlos en acción inmediatamente después de la pega; pero no basta con esto para que el Ingeniero de la mina pueda estar tranquilo de que tiene a su personal a cubierto del riesgo de grave intoxicación, pues cuando ya hay, de nuevo, suficiente aire en la galería, el oxígeno de carbono, por su densidad y velocidad de difusión puede quedar, en este aire fresco, recién llegado a la galería, en dosis peligrosa y es aconsejable disponer de medios de detección adecuados que avisen y prevengan del riesgo.

Como detector químico puede utilizarse el cloruro de paladio; impregnando en una solución de esta sal tiras de papel de filtro de color blanco nítido y colocando a su lado, como testigo, otra tira, humedecida y sin reactivo, la que tiene paladio se oscurece si en la atmósfera hay óxido de carbono.

El método ofrece poca garantía, pues la reacción

es poco sensible y lenta y no hay que olvidar que basta respirar, durante media hora, aire que contenga 1,2 litros de óxido de carbono por metro cúbico para que el organismo fije una dosis mortal y el individuo que no nota por lo general ninguna molestia durante la captación o a lo sumo dolor de cabeza, que se acentúa más tarde, sucumba a las pocas horas.

Cuando deba penetrarse en una galería con óxido de carbono, para salvamento o reparaciones del sistema de ventilación, etc., jamás debe penetrar un individuo aislado, sino una cuadrilla o equipo que posea la debida instrucción y esté dotado de los adecuados medios de protección.

Existen unos filtros especiales que, adaptados a las máscaras filtrantes corrientes, eliminan el óxido de carbono, porque un catalizador adecuado (la hopcalita) lo oxida y transformã en anhídrido carbónico; pero estos filtros, además de caros, son muy inseguros, porque el menor vestigio de humedad inutiliza el catalizador y filtros, que no se habían llegado a estrenar y que, por tanto, debían estar útiles, se encuentran fuera de servicio por esta acción nociva de la humedad. Por esta razón, estos filtros están prohibidos en Alemania para las cuadrillas de salvamento.

Los más eficaces son los llamados equipos autónomos o aislantes (fig. 15), en las que el usuario aspira aire de la bolsa a, en la que a su vez se vierte oxígeno procedendo

te de la botella a presión b, el aire espirado, antes de volver a la bolsa, pasa por el cartucho o filtro c, en el que el anhídrido carbónico, que el organismo elimina, es fijado en potasa cáustica. La duración eficaz de estos equipos autónomos suele ser superior a una hora y depende de la capacidad y presión de la botella de oxígeno de reserva; teniendo en cuenta que un individuo normal, efectuando trabajos que no sean de extrema violencia, consume 1,5 litros de oxígeno por minuto.

En las Cías Nacionales del Centro del Perú se utiliza generalmente el AIR-PACK.

2.- Cargas.- En los túneles y galerías, los taladros no rebasarán casi nunca los cuatro metros de profundidad, y en estas condiciones es mucho más práctico recurrir a la carga continua en vez de a las cargas múltiples, como ocurre en las canteras, en que se llegan a perforaciones o profundidad de barrenos de 30 metros.

3.- Descripción del método seguido en la perforación de algunos túneles famosos

a) Tunel de Königshütte (Prusia)

El material perforado era arenisca dura. La sección, rectangular, medía 2,10 metros de altura y tres metros de ancho. Se perforaban nueve taladros, como indica la figura 16, de 90 centímetros de profundidad, con líneas de mini

ma resistencia, entre 0,85 y 0,90 metros.

Los taladros, numerados del 1 al 6, se cargaban con 150 gramos de dinamita-goma, y los tres del techo, sólo con 140 gramos. Las pegas se daban con mecha Bickford y cebos de fulminato cuádruples.

Se volaban primero los barrenos 1-2-3, que producían un arranque de 0,75 metros de profundidad y 0,60 metros de altura; después, los 4-5-6, con lo que se ensanchaba la oquedad a 0,90 x 1,40. En fin, la pega de los taladros 7-8-9 acababa por desgajar la roca hasta el techo de la gale-

El consumo teórico del explosivo era de 1,380 kilogramos, y el práctico o real, 1,5 kilogramos, con los que se arrancaban unos cinco metros cúbicos.

Si se hubiera empleado dinamita número 1, se habrían precisado 280 gramos por taladro, o sea, 2,520 kilogramos por cada serie. La economía, en peso, del explosivo estuvo pues en la relación  $3/5$ , y en costo, del 10 por 100, ya que los precios de ambas calidades en Alemania, en la época de la perforación, era de  $\$4,50$  y 3 marcos.

#### b) Túnel de Pfaffensprung

El túnel de Pfaffensprung, en la vertiente norte de la línea de San Gotardo, cerca de Wasen, fue ejecutado en granito muy duro, con 2,20 metros de alturas y 2,50 de ancho.

El ataque se hizo con seis taladros (fig 17), vo-

ladas sucesivamente en el orden creciente de los números.

Los taladros medían 73 milímetros de diámetro y 1,50 metros de profundidad y <sup>se</sup> taladraban paralelamente al eje de la galería; es decir, normales al frente de ataque.

Las cargas se componían de petardos de dinamita-goma de 70 milímetros de diámetro y 100 milímetros de longitud, que, encartuchados, pesaban medio kilogramo cada uno.

c) Túnel de Lugau.

Horadado en arenisca muy dura, medía 1,70 metros de anchura y 2,15 de alto (fig. 18).

De taladros convergentes, 1-2, eran volados simultáneamente con cebos eléctricos, con una línea de mínima resistencia de 1,80 metros.

La carga estaba formada por 926 gramos de dinamita-goma, que producía una excavación de 1,75 metros de profundidad, aproximadamente.

El vaciado se completaba con los 10 taladros periféricos, 2 a 12, perforados paralelamente al eje de la galería, de 1,75 metros de profundidad, que se volaban simultáneamente.

d) Obras más modernas.

Los dos pequeños túneles de Estocolmo, construidos en 1939, en los que se labraron 59 taladros en cada sección recta de avance, con profundidad de 1,6 a 3,4 metros, y un túnel bajo el agua, construido posteriormente también

en Suecia, marcan un óptimo en el rendimiento de los explosivos, ya que se consumió un kilogramo por metro cúbico en Estocolmo y 0,9 kilogramos en el de Suecia central, en el que se perforaron 132 taladros por sección recta, con una longitud total de 622 metros de perforación.

La máxima velocidad de avance se logró en 1950, en los Estados Unidos, en donde ciento treinta y cuatro días se perforó un túnel de sección circular para el embalse de Dawnsville, arrancándose más de 90,000 metros cúbicos de roca, pues la sección tiene 13,5 metros de diámetro y la longitud del túnel es de 633 metros. El promedio de avance diario fue de 4,5 metros, y el tiempo habría bajado a la mitad si el ataque se hubiera podido emprender simultáneamente por ambos extremos; pero se sacrificó, en cambio, el consumo de explosivo. En cada sección de avance se perforaron 170 taladros de 5,4 metros de profundidad, que se cargaban con seis kilogramos de dinamita, en carga extendida, y se les daba fuego con cebos eléctricos, lo que supone un consumo medio de 2,4 kilogramos de dinamita por metro cúbico de roca arrancada.

GENERALIDADES SOBRE EXPLOSIVOS EN MINERIA DE OPEN PIT .-

No pretendo dar datos muy detallados sobre explosivos en la minería de Open Pit, ya que sería materia de una tesis de grado.

El explosivo que más se usa en la minería de Open Pit es el  $\text{NO}_3\text{NH}_4$  (Nitrato de Amonio), que mezclado con el aceite diesel N° 2 recibe el nombre de AN-FO.

Factores que influyen en la voladura .-

- a) Tipo de carga
- b) Densidad del explosivo
- c) La atacadura o taco
- d) Tiempo de iniciación
- e) Cantidad de explosivo, que depende de la carga y la profundidad del taladro.

Para calcular la cantidad de explosivo a emplearse en un disparo de un banco se emplea la siguiente fórmula:

$$B = \frac{I D T}{27}$$

B = Tonelaje (yardas cúbicas)

También se aplican las siguientes fórmulas:

$$B = \frac{I D}{27} \cdot \frac{T + C}{2}$$

$$B = \frac{I}{27} \cdot \frac{(H + D)}{2} \cdot \frac{T + C}{2}$$

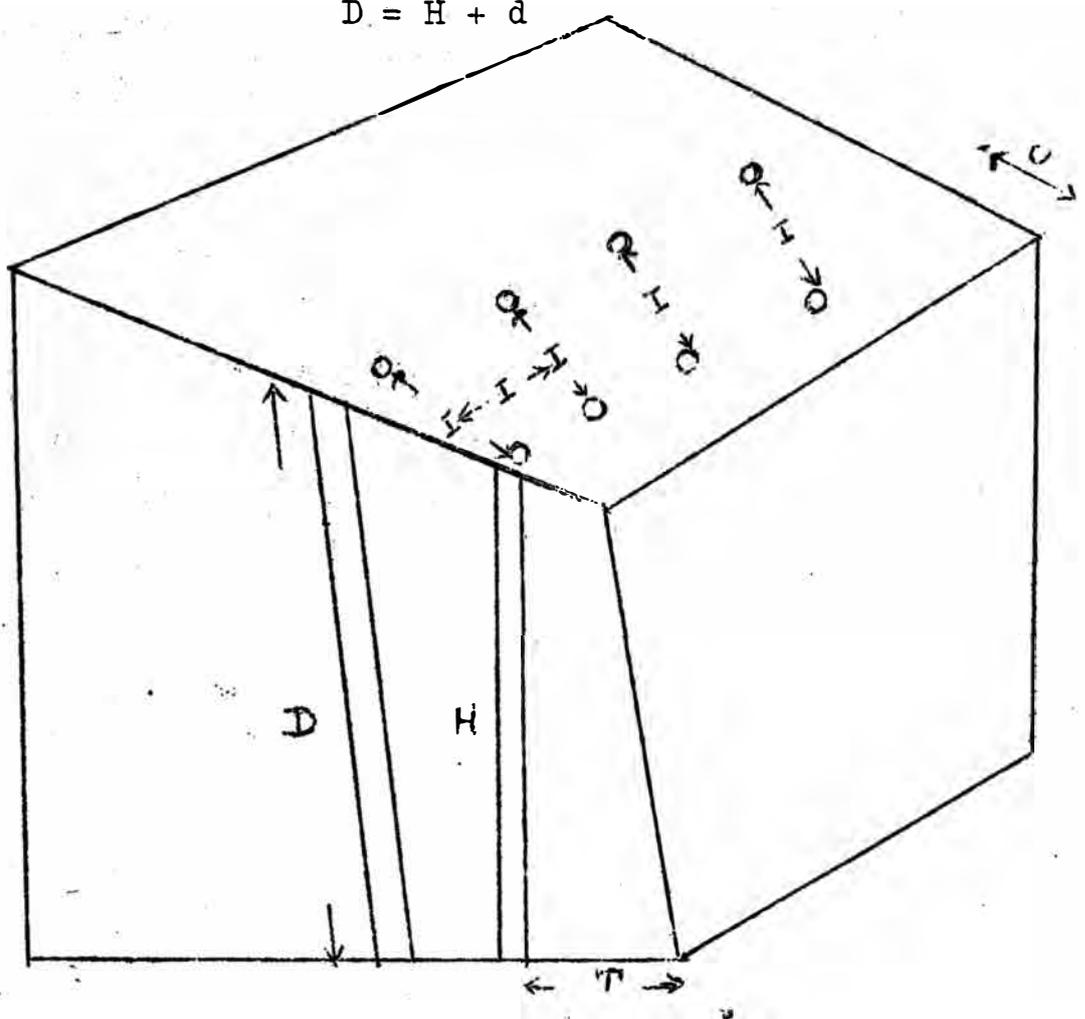
$$B = c + t$$

t = Distancia horizontal de la cresta a base (pié)

$$f = 0.3 \times c \qquad 0.3 \times \frac{(C + T)}{2}$$

$$d = f \times T$$

$$D = H + d$$



Datos de Voladura para varios tipos de Metálicos y no Metálicos en Open Pit .-

	Consumo de Explosivo libra por Tonelada
Asbestos	0.15
Mineral duro	1.07 duro
	0.40 semi-duro
	0.20 blando
Cobre	0.22
Magnesita	0.40
Barita	3.5
Ilmenita	0.34

Perforación en Mineral de Fierro .-

Tipo de Mineral : Medio duro, mineral de fierro no abrasivo.

Tipo de Desmonte: Duro, Tacanita abrasiva y otras rocas.

Diámetro del taladro : 6" de la barra y de 6" a 9" el churn-drill.

Consumo de Explosivos: Mineral 0.45 a 0.70 lb/ton.

Desmonte 0.75 a 1.50 lb/ton.

Perforación Capa de calizas dureza media .-

Diámetro del taladro : 6 3/4 pulg.

Diámetro del Explosivo: 5" x 16" dinamita

Carga del Taladro : abajo 1/4 explosivo  
arriba 3/4.

Detonar : Primacord con retardo de 0 a 7 milisegundos.

Perforación en Cobre Porfirítico .-

Diámetro del taladro                    9 pulgadas

Consumo de Explosivo                0.7 lb/ton.

Explosivos para Canteras .-

La voladura más eficiente para el tipo de material que se encuentra en las canteras de ladera requiere generalmente el uso de dos o más clases diferentes de explosivos en el mismo taladro. En el fondo se necesita una alta densidad y fuerza de rompimiento para cortar la roca en el piso de la cantera; en cambio, en la parte superior del taladro se requiere una densidad menor y una acción mayor de expansión. Cuando el pié del frente es demasiado pesado para poder romperse económicamente con los taladros grandes de la voladura principal, entonces se usan como complemento taladros de culebra perforados en el fondo y disparados simultáneamente con la voladura principal.

En las canteras tipo ladera se requiere generalmente gelatina Extra' 60% ó 75% en el fondo y Gelamex N° 1 ó dinamita Extra 40% ó 60% para el resto de la carga. Los taladros profundos normalmente contienen agua y aún cuando ésta se desaloja pueden humedecerse nuevamente antes de que se produzca el disparo. Debe tenerse en cuenta esta posibilidad al seleccionar los explosivos que se utilizarán.

## CAPITULO XII

### EXPLOSIVO ANFO

### HISTORIA DEL NITRATO DE AMONIO

El nitrato de amonio fue preparado por primera vez en el año 1659. Sin embargo, su empleo como ingrediente explosivo tuvo lugar en el año 1867, usándose originalmente en la fabricación de dinamita.

En 1935, en los EE.UU., se fabricó una sustancia que contenía nitrato de amonio como elemento primario, denominándosele "agente explosivo" debido a su baja sensibilidad. Se le registró con el nombre de "Nitron " al ser fabricado por la C-I-L. del Canadá. Esta sustancia, sin embargo, tenía que ser sellada en recipientes metálicos a prueba de agua, debido a su bajísima resistencia a la misma, ya que una pequeña cantidad de agua lo convertía en material relativamente inerte.

Las explosiones que ocurrieron en los barcos cargados con nitrato de amonio, en Texas City/ Texas (EE.UU.) y Brest (Francia) en el año 1947, alertaron al mundo en el sentido de que era una sustancia de elevado poder explosivo al contacto con una cantidad relativamente pequeña de material orgánico.

El año 1955 marcó el nacimiento de una nueva era para el minero de trabajos a cielo abierto. Fue en ese entonces, cuando Hugh Lee y Robert Akre de la Maumee Collieries de los EE.UU., se encontraban abocados en la investigación

de un nuevo explosivo para contrarrestar los siempre crecientes costos en la industria minera. Su intención era combinar el nitrato de amonio con una sustancia carbonosa, como por ejemplo, el carbón, el hollín o hulla triturada. A ésta sustancia la bautizaron con el nombre de "Akremite" y venía envasada en bolsas de polietileno impermeables. Su empleo era muy efectivo en taladros de diámetro superior a las 4" debido a la mejor densidad de carga, y a su bajo costo en comparación al de los explosivos de nitroglicerina, y rápidamente se transformó en venta de gran demanda para las operaciones de explotación en minas y canteras. Sin embargo, se llegó a la conclusión que la bolsa se perforaba o dañaba, aún al tratarla con cuidado extra, al arrojarla o bajarla por los taladros de disparo. Así mismo, se determinó que cuando el agua se mezclaba con la sustancia, aún absorbiéndola hasta un 8 a 10%, la detonación era posible con bastante cebo. Esto desechó hasta cierto punto la teoría de que el nitrato de amonio se desensibilizaba al contacto de una pequeña cantidad de agua. Desde entonces, sus aplicaciones en el terreno sufrieron un cambio ventajoso.

El nitrato de amonio usado en la dinamita tenía la forma granular o cristalina. En 1943, la Consolidated Mining & Smelting Company Ltd. del Canadá (Calgary-Alberta) fabricó un producto completamente nuevo: era el nitrato de amonio granulado, pequeño, esférico y poroso. La forma granulada demos

tró ser de flujo libre y resistente al aglutinamiento al ser de flujo libre y resistente al aglutinamiento al ser revestido con diatomita.

Con posterioridad vino la introducción del aceite combustible o diesel como sensibilizador de las sustancias carbonosas. A causa de la porosidad del granulado, la absorción se tornó simple, eliminando en ésta forma el polvo producido por el antiguo proceso de la mezcla seca de los ingredientes. Fue entonces posible para el operador preparar la mezcla explosiva en un lugar inmediato al del disparo.

La mezcla por el aceite resultó en una compactación más firme en el taladro, ya que los gránulos se adherían unos con los otros. Estos resultados promovieron el concepto de su probable uso en las operaciones del subsuelo.

#### NITRATO DE AMONIO .-

La forma física del producto final no altera la composición química del nitrato de amonio. La mayoría de los tipos comerciales de nitrato de amonio contienen aproximadamente 33.5% de nitrógeno, mientras que el nitrato de amonio puro es de 35% de nitrógeno.

El nitrato de amonio es producido de soluciones de ácido nítrico que han sido neutralizadas con amoníaco anhidro las cuales a su vez, son modificadas por evaporación.

Su elaboración consiste de cuatro procesos básicos:

1. Prilling (Granulación)
2. Dense Flake (Laminación)
3. Krystal (Cristalización)
4. Graining (Graneamiento)

El proceso determina las propiedades físicas del producto final.

La granulación permitió el aumento de la capacidad del tonelaje de nitrato de amonio fabricado

Una solución del 95% de nitrato de amonio es rociada en el interior de una contra corriente de aire de la torre de granulación en donde las gotas se solidifican y caen al fondo, y de allí son recojidas y enviadas a los secadores giratorios produciendo así el gránulo poroso y de baja densidad.

El proceso de laminación consiste en precalentar, por separado, el amoniaco y el ácido nítrico antes de la neutralización. El calor generado por la neutralización más el calor previo producido en el precalentamiento son suficientes para evaporar la presencia de agua en el ácido nítrico. En la etapa de derretido, el nitrato de amonio es vaciado en una faja de metal flexible, para solidificarse en hojas, para después ser molido, al tamaño adecuado, revestido y envasado. El producto resultante es granuloso y denso.

La evaporación al vacío y reparación de los cristales por centrifugación es el "Krystal Process" se regula el

tamaño del cristal por el índice de evaporación e intervalo de centrifugación. Los granos son después secados, revestidos y envasados. Las características resultantes son: tamaño más pequeño de la partícula y densidad por volumen más elevada.

La evaporación involucra la evaporación lenta a presión atmosférica. La sustancia derretida se vacía a calderos de evaporación en donde es agitada para producir granos cristalinos a medida que se van enfriando. Este proceso produce un tamaño de grano más uniforme, pero ha sido eliminado completamente por otros métodos.

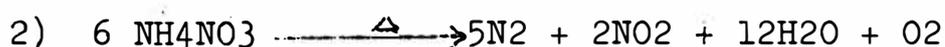
#### EXPLOSIVOS AN-FO .-

Hay varios factores que afectan la velocidad de detonación del explosivo AN-FO. Las principales son:

- 1) Diámetro del taladro
- 2) Densidad de la carga
- 3) Contenido del Aceite Combustible
- 4) Contenido del Agua

La figura 2 indica que al disminuir el diámetro del taladro, se disminuye también la velocidad de detonación. Cuando la densidad de la carga disminuye, también la velocidad de detonación. (Figura 3). Puede mejorarse la densidad de la carga por medio de la carga hidráulica o "atacado vigoroso". Sin embargo, <sup>la</sup> sensibilidad disminuye si la densidad es superior a 0.95 gms/cc.

En la figura 4, podemos ver el efecto de detonación del aceite combustible. La velocidad máxima se desarrolla con 5.67% de aceite combustible, o lo que es igual, al nivel correcto de equilibrio del oxígeno. Cuando el porcentaje del aceite combustible disminuye por debajo de éste nivel, el exceso de oxígeno reduce la reacción del calor, lo cual, a su vez disminuye la velocidad de detonación. Un contenido elevado de aceite combustible produce deficiencia de oxígeno, pero, aunque la velocidad de detonación resultante no se clasifica como una reacción causada por exceso de oxígeno. La siguiente ecuación química (1) demuestra la descomposición ideal de un sistema equilibrado de oxígeno:



La segunda ecuación muestra como se descompone el nitrato de amonio solo.

La Figura 5 demuestra el efecto del contenido de agua sobre la velocidad de detonación. El agua que llena los espacios vacíos entre los gránulos, se vaporizan al efectuar la detonación absorbiendo una elevada cantidad de calor, disminuyendo de ésta manera la reacción por pérdida de energía. Los taladros que contengan más del 9% de agua, deben ser cargados con AN-FO envasado en recipientes a prueba de agua.

Después de la detonación, el nitrato de amonio pro-

duce un volumen más elevado de gas que cualquier otro explosivo corriente.

El empleo de demasiado aceite combustible genera cantidades excesivas de monóxido de carbono. En cambio, una cantidad reducida de aceite combustible produce exceso de humos de óxido nitroso. Se deja ejercer un control estricto de seguridad como medida preventiva en las operaciones del subsuelo contra las elevadas concentraciones de gases nitrosos que son generados en grandes volúmenes al efectuarse la detonación.

El  $\text{NO}_3 \text{NH}_4$  empleado para fabricar ANFO es el clasificado como fertilizante, sin revestimiento orgánico y con 33.5% de nitrógeno. El aceite combustible es el Diesel N° 2, cuyo peso promedio es de 7 libras por galón. Se debe mencionar aquí que el Buró de Minas de los EE.UU. recomienda que no debe usarse como sensibilizador ningún hidrocarburo líquido de elevada volatibilidad que no sea el aceite Diesel N° 2. Exceptuando lo mencionado anteriormente, se emplea el Diesel N° 1 en lugares de bajas temperaturas.

El AN - FO es sensibilizado agregando a cada bolsa 5.67% de peso de aceite Diesel N° 2 ó 6 libras de aceite para 100 libras de nitrato de amonio). El material permanece así por lo menos 12 horas, tiempo que permite al aceite descender hasta el fondo de la bolsa. Luego, se voltean las bolsas dejándolas en ésta posición otras 12 horas más. Conclui

mos que 24 horas es el tiempo necesario para sensibilizar al material. Monsanto recomienda 1 galón de aceite por cada 100 libras de nitrato de amonio, cantidad que resulta ligeramente superior al porcentaje ideal de 5.6% pero ésa pequeña diferencia está calculada para la pérdida de aceite por absorción de la bolsa.

Así mismo, Monsanto pone de manifiesto que el método de mezcla de bolsa abierta produce una velocidad de detonación de aproximadamente 1000 pies/seg. menos que la llevada a cabo por dispositivos inyectores de combustible.

Luego, encaramos el problema de la electricidad estática, Dondequiera que haya un movimiento relativo de dos materiales heterogéneos o separación entre ellos siempre existe una generación de electricidad estática.

Es conocido el hecho de que los cargadores que conducen AN-FO en una corriente de aire comprimido actúan como generadores electrostáticos que producen cargas electrostáticas de aproximadamente 1 microamperio, tanto al operador como al equipo. A ésta velocidad de generación, un hombre aislado del terreno adquirirá un potencial en relación a las condiciones del terreno de unos 25,000 voltios en cuestión de minutos. Si prevalecen adecuadas condiciones, un fulminante

eléctrico o un convencional encapsulado a una guía común detonará con éste voltaje. Se ha determinado que el núcleo de la pólvora negra de una guía normal de seguridad conduce una

descarga de alto voltaje, aunque normalmente, es un pobre conductor de electricidad. La carga recorre la longitud de la guía a través del núcleo, transmitiéndola al fulminante metálico para producir al contacto una chispa, la cual es suficiente para hacer explotar al fulminante sensitivo.

Se puede reducir la formación de la electricidad estática por medio de una eficiente conexión a tierra de los cargadores neumáticos, suplementado por el uso de una manguera de carga conductiva (Ver foto del cargador de AN-FO Pen - berthy).

Deben tomarse determinadas precauciones al usarse cargadores del tipo de fluidificación. Las guías encapsuladas deben colocarse en todos los taladros antes de cargar. Si ésta operación resultará impráctica, entonces el operador debe ser conectado a tierra o hacerlo él mismo antes de tocar cualquier guía encapsulada. El cargador debe estar conectado a tierra.

#### SEGURIDAD .

Con el objeto de mantener condiciones seguras de trabajo, se tomaron diversas precauciones antes de iniciar la labor experimental. Los aspectos de ventilación ocuparon nuestra principal atención. Como cuando se usa el explosivo AN-FO, se genera grandes volúmenes de gases, fue necesario revisar los circuitos de aire de cada tajeo y nivel. Se construyeron puertas de ventilación con el fin de desviar los po

sibles gases tóxicos de las áreas en actividad a nuestras lumbreras de ventilación. Se hizo uso de los instrumentos portátiles de detección de la Mina Safety Appliances Co. (NO<sub>2</sub> y CO), después de cada disparo. Las lecturas registradas durante las primeras pruebas las mostramos en la tabla que aparece más abajo.

Tabla 1: Lecturas de NO<sub>2</sub> y CO después de 5 minutos

Prueba Nº	Tajeo 12176 #6		Tajeo 12177 #6		Tajeo 14183		Tajeo 14185 #6	
	NO <sub>2</sub> PPM	CO %						
1	35	0	3	0	35	0	5	0
2	25	0	7	0	25	0	00	0
3	35	0	8	0	35	.004	10	0
4	5	0	2	0	00	0	00	0

NOTA.- En general, después de 20 minutos las lecturas, dieron cero en toda el área.

Las lecturas anotadas en la tabla indican que se obtuvieron resultados satisfactorios durante las pruebas, ya que aquellas estaban dentro de los límites permisibles de contaminación de éstos gases.

La supervisión ocupó el segundo lugar de importancia en nuestra atención. Se seleccionó y entrenó a dos jefes

de guardia para supervisar la tarea especial de preparar, manipular y transportar las mezclas del AN-FO y a su vez instruir a los obreros en los aspectos de manipuleo y carga, además de la revisión de las herramientas de perforación. Se instaló una bodega especial para mezclar el AN-FO en el nivel 1000. Actualmente, se cuenta con instalaciones similares en los niveles 800 y 1400 respectivamente. Solamente se almacena en el subsuelo una provisión para dos días. Se almacena el aceite combustible en depósitos separados en todos los niveles (Figura 7).

El nitrato de amonio que se usa en la Mina Cerro de Pasco es el de la forma granulada que fabrica Monosanto. Al principio, se empleaban bolsas de 80 libras, pero actualmente, se usan bolsas de 100 libras.

El cargador debe estar siempre conectado a tierra.-

Cuando se emplean fulminantes eléctricos, no es práctico colocarlos en los taladros hasta que se haya completado la carga, a menos que en la operación se utilicen una buena conexión a tierra, manguera de carga conductiva y cables de desviación. En el caso de una situación particular en la cual se necesita de la detonación eléctrica, se deben tomar especiales precauciones para lograr un grado máximo de seguridad. Debemos darnos cuenta que, aún prevaleciendo condiciones adecuadas, la detonación prematura es posible.

### Pruebas en el Subsuelo .-

En cuanto se hubieron efectuado cuidadosos estudios en lo concerniente a los aspectos de seguridad, se dió comienzo a las pruebas en el subsuelo. Nuestra atención reca yó, en primer lugar, en los aspectos de la carga.

Pueden calcularse las cargas teóricas por medio de la Ecuación de Pearse, que fue modificada por la Monsanto Chemical Co., para aplicarla al AN-FO.

$$CR = \frac{K}{12} \cdot \sqrt{\frac{Pe}{S}}$$

En donde

Espaciamiento =  $2CR = 2 \times$  Radio Crítico (en pies por pulgada del diámetro del taladro).

k = Constante (0.8 Mayoría de las rocas)

Pe= Una presión constante de oxígeno equilibrado. AN-FO (268, 250 P.S.I.)

S= Resistencia a la tensión del tipo de roca (p.s.i.)

Las resistencias a la tensión de las rocas comunes están indicadas en la Tabla 2. El siguiente es un ejemplo típico:

$$CR = \frac{K}{12} \cdot \sqrt{\frac{Pe}{S}}$$

Tenemos:

Diámetro del taladro = 1.5 pulgadas

Roca: granito duro

$K = 0.8$

$Pe = 268,250 \text{ p.s.i.}$

$S = 1,298 \text{ p.s.i.}$

$$CR = \frac{0,8}{12} \cdot \sqrt{\frac{268,250 \text{ p.s.i.}}{1,298 \text{ p.s.i.}}}$$

$$CR = 0.96$$

$2CR = 1.92$  Piés por pulgada del diámetro del taladro.

Por lo tanto:

Espaciamiento =  $1.92 \times 1.5 = 2.88$  Pié = 34.5 Pulgadas

Asumiendo un modelo cuadrado para el disparo escalonado

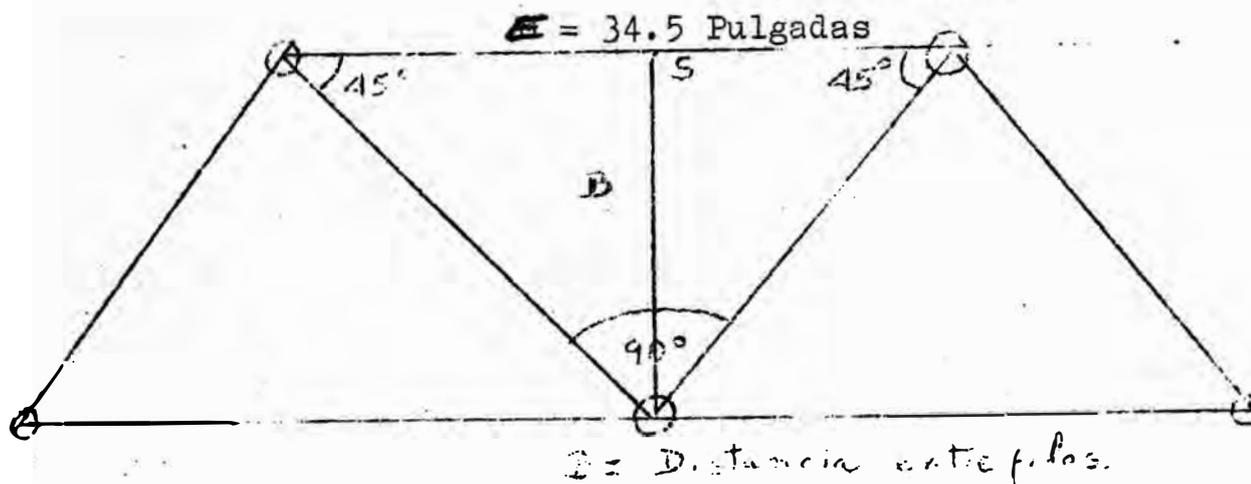


TABLA N° 2 RESISTENCIA A LA TENSION DE LAS ROCAS COMUNES

<u>Tipo de Roca</u>	<u>Resistencia a la Tensión (p.s.i.)</u>
Granito Duro	1298
Anhidrita Dura	1220
Caliza Dura	890
Granito Común (promedio)	888
Mármol	860
Anhidrita Débil	800
Grauwaca	700
Arenisca Dura	583
Caliza Común (promedio)	480
Marga (arcilla calcárea)	480
Granito Débil	422
Arenisca Común (promedio)	412
Sal (Sal gema potásica)	400
Roca Verde	380
Caliza Débil	280
Arenisca Débil	280

Por lo tanto:

$$B = \frac{S}{2} = \frac{34.5}{2} = 17.25 \text{ Pulgadas}$$

Espaciamiento = 34.5 Pulgadas - Centros

carga = 17.25 Pulgadas entre filas

En la práctica, los valores pueden redondearse en

un modelo de 36 x 18 pulgadas. Sin embargo, se debe tener presente que ésta fórmula y los datos de la Tabla 2 suministran teóricamente un punto de partida para trabajar, pero en la práctica se requiere de un acercamiento empírico a causa de los numerosos problemas que tenga que encarar, individualmente, cada operador.

Los actuales modelos de perforación en los trabajos de tajeo en arco son aproximadamente de 30" x 24".

Los trabajos en galerías y chimeneas dependen de las condiciones del terreno como de los explosivos convencionales.

#### CEBADO .-

En la mina de Cerro de Pasco se probaron varios métodos de cebado. Entre ellos, podemos mencionar el cebado invertido y derecho y el de cuello. Los cebos estuvieron compuestos de un cartucho de dinamita 45%, guía y fulminantes N° 6 acoplados al encendedor con cuerda de conexión. Posteriormente, sólo se usó la mitad de un cartucho. En las chimeneas se continúa usando un cartucho para evitar que la guía se separe del cebo, dando lugar a un taladro soplado.

Hemos también empleado fulminantes N° 8 sin cebos de dinamita con buen éxito, llegando a la conclusión que el fulminante N° 8 por si sólo se basta para detonar al AN-FO. En la Figura N° 8 mostramos los métodos de cebado utilizados.

CARGA .-

Usamos el cargador "Penberthy Anoloder" (Figura 9) para cargar todos los taladros. La operación consiste en introducir el AN-FO con aire comprimido. Este cargador está provisto de una válvula de rápida acción como dispositivo de control. Antes de hacer funcionar el aparato, se le instala siempre una línea tierra.

Para eliminar los fragmentos que pudieran quedarse en los taladros, se les somete primero a una limpieza con un soplete cualquiera. Se insertan los cebos en todos los taladros para que luego el "Anoloder" se encargue del resto de la operación. En las primeras pruebas, los taladros eran cargados hasta 12" del Cuello. Esta distancia fue gradualmente aumentada hasta 24" y luego hasta 30", distancia que actualmente se usa. No atacamos la carga. Después, el cargador es separado del frente y todos los taladros son conectados con el cordón de encendido para completar la carga. Aproximadamente 1 minuto es el tiempo que se requiere para cargar un taladro de 8'.

La estructura del "Anoloder" es de aluminio y tiene una capacidad de 25 libras. Una bolsa de 100 libras de AN-FO sirve para cargar aproximadamente 50 taladros. La manguera que utilizamos para cargar es de 15' x 5/8" de diámetro interior y de material conductivo.

Creo necesario hacer hincapié de nuevo en el hecho de que las máquinas deben estar siempre conectadas a tierra

y que tanto los cargadores como la manguera deben estar fabricados en tal forma que ofrezcan la máxima seguridad contra la electricidad estática.

#### USOS ACTUALES DEL AN-FO .-

En la actualidad, estamos empleando el AN-FO en los tajeos de arco, galerías y chimeneas. No hemos tenido ningún problema en la carga de taladros verticales en las chimeneas. En esta operación no se usó el "atacado". La fragmentación fue buena.

En los tajeos con cuadros se probó con éxito el AN-FO, pero a causa del reducido número de lugares en donde sería posible hacer disparos (20%) en roca dura, pensamos que desde el punto de vista económico, su empleo no sería conveniente. En los tajeos con cuadros se usa una pequeña cantidad de cartuchos de dinamita, lo cual significa la adición de unos cuantos cartuchos en comparación a la cantidad del cebo utilizado para detonar el AN-FO.

#### ANALISIS DE COSTOS .-

En el mes de Marzo de 1963, se llevó a cabo un estudio de análisis de costos en el tajeo en arco 12176 #6 lo que resultó ventajoso, ya que en éste lugar se podían eliminar dos cortes completos.

El primer corte se hizo con dinamita Semexa de 45% y rompió 20,300 piés cúbicos de roca. El costo total fue de \$/ 2,176.24, o sea \$/ 0.13 por pié cúbico. Esta cifra no su

frió alteraciones notorias durante el promedio de cinco meses que fue \$/ 0.14 por pié cúbico.

En Marzo 18 de 1963, se empezó el segundo corte utilizando ésta vez el AN-FO como explosivo. Este corte produjo 31,804 piés cúbicos de roca. Se obtuvieron los siguientes resultados:

COSTO DE VOLADURA CON AN-FO EN EL TAJEO 12176 N°6 MARZO 1963

<u>MATERIAL</u>	<u>CANTIDAD</u>	<u>x</u>	<u>PRECIO</u>	<u>UNITARIO</u>	<u>COSTO TOTAL</u>
Dinamita 7"x7/8"Exsa 45%	582	x	\$/ 1.05		661.50
Fulminantes N° 6	285	x	" 0.29		82.65
Guía	2889 Pies	x	" 0.19		548.91
Encendedores	11	x	" 0.75		8.25
Cordón de Encendido	440 Pies	x	" 0.32		140.80
Cordones de Conexión	199	x	" 0.30		59.70
Nitrato de Amonio	775 Lbs.	x	" 1.25		968.75
Aceite Diesel N° 2	6.2 Glns.	x	" 3.45		21.39
<hr/>					
Gran Total					2,491.95
<hr/>					

Volumen Roto = 31,804 Piés

Costo/Pié Cúbico de roca roto con AN-FO =  $\frac{\$/ 2,491.95}{31,804} =$

\$/ 0.078 por pié cúbico.

Ahorro obtenido = 0.13 (Exsa) - \$/ 0.08 (AN-FO) = \$/ 0.05 por pié cúbico.

$$\text{Porcentaje de Ahorro} = \frac{0.05}{0.13} \times 100 = 48.46 \%$$

Factor de tonelaje de Ingeniería =  $10.64 \text{ p}^3$  por tonelada de mineral.

$$\text{Tonelada de minerales extraído} = \frac{31,804 \text{ p}^3}{10.64 \text{ p}^3/\text{Ton.}} = 2989 \text{ Tons.}$$

$$\text{Costo por Tonelada} = \frac{\$ 2,491.95}{2989} = \$ 0.85 \text{ por Tonelada}$$

$$= \text{US } \$ 0.03 \text{ Por Tonelada.}$$

Como puede verse en los cálculos de líneas más arriba, en éste tajeo se logró una economía del 48.46% durante el mes de Marzo. Pero, después de efectuar otros estudios sobre costos, se obtuvo la cifra más realista de 35.40 %.

#### LA FUERZA EXPANSIVA DEL AN-FO .-

Se compara aproximadamente a la dinamita de 60% siempre que: a) se usa un material compuesto de bolitas absorbentes.

b) que el compuesto esté concienzudamente mezclado con la proporción correcta de petróleo.

c) Esté debidamente cargado en la perforación. La expansión como onda de impacto, es algo menor que algunas clases de dinamita, pero su expansión en forma de gases de alta presión es apreciablemente mayor. La menor energía como onda de impacto es la razón por la cual algunas formaciones no se rompen muy bien con el AN-FO, sobre todo las formacio-

nes duras, como las canteras de granito.

Sin embargo, la mayoría de los cuerpos mineralizados en pizarras; piedra, caliza y aún dolomitas pesadas se rompen bien con AN-FO, particularmente si existen algunos planos naturales con resquebrajaduras que permiten trabajar a los gases de alta presión.

#### VELOCIDAD DE DETONACION .-

En las perforaciones de tamaño normal de las minas subterráneas la velocidad de detonación de una buena mezcla de AN-FO producirá alrededor de 10,500 piés por seg; teniendo un máximo de 12,000 pies por seg.

#### PESO ESPECIFICO .-

El peso específico de las cargas que se inyectan con la máquina cargadora y del operador oscila entre 0.80 y 0.90 dependiendo este límite de variación de:

- a) Eficiencia de la máquina cargadora y del cargador.
- b) Presión del aire usado.
- c) Tamaño de las partículas
- d) Distribución del nitrato de Amonio.

#### INFLUENCIA DEL METODO DE MEZCLA SOBRE LA VELOCIDAD DE DETONACION .-

Aceite vertido por la parte superior de la bolsa y dejado 30 minutos.	Mezcladora de concreto, de jando 5 minutos.	Mezclando durante 5 minutos y dejado 24 horas.
---	---	--

94/6 de  
gránulos  
de nitrato  
de Amonio  
sin revesti-  
miento.

Deus = 0,83	10,900	11,700	11,700
-------------	--------	--------	--------

94/6 de  
AN-FO con  
4% de re-  
vestimiento

Deus = 0,83	10,500	11,300	11,650
-------------	--------	--------	--------

94/6 de  
AN-FO con  
3% de re-  
vestimiento.

Deus = 0,83	11,350	11,600	11,850
-------------	--------	--------	--------

3/4 de galón de diesel N°2 por bolsa de 80 libras

1/2 de galón de diesel N°2 por bolsa de 50 libras

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AN-FO .- Enumeradas en la página 101.

REGLAS GENERALES DE SEGURIDAD .-

Las reglas de seguridad por lo general, son similares a las aplicables a los explosivos, con la excepción de que el agua es el peor enemigo del explosivo AN - FO. Las cualidades explosivas del AN-FO se reducen o pierden completamen-

te al inyectar agua a los tiros sopladados.

Para obtener información sobre las recomendaciones de seguridad concernientes al nitrato de amonio, escribase al:

The U.S. Bureau of Mines  
Marling J. Ankey, Director  
Washington, D.C. U.S.A.

para solicitar el boletín "Tentative Safety Recommendations for Field - Mixed Ammonium Nitrate Blasting Agents" - information Circular 7988 (Recomendaciones Tentativas de Seguridad para mezclar los Agentes explosivos del nitrato de Amonio).

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .-

Es necesario recordar algunos puntos de suma importancia:

1. Revisar el sistema de ventilación de la mina antes de implantar la explotación de la misma con éste explosivo.
2. Estudiar los posibles peligros derivados de la electricidad estática.
3. Entrenar al personal de supervisión sobre los peligros inherentes del explosivo AN-FO antes de comenzar a usarlo.
4. Emplear el equipo adecuado para la operación de carga y no los escogidos al azar, con el fin de reducir al mínimo los peligros derivados de la electricidad estática.
5. Instalar bodegas de almacenamiento a prueba de fuego en igual forma como haría con los explosivos de alta potencia.

## CAPITULO XIII

### EXPLOSIVOS SLURRY

Es uno de los explosivos más modernos usados en la minería. Actualmente es fabricado en el Perú con el nombre de HIDROMEX por la fábrica EXSA, en bolsas con diámetros 3/1/2" y mayores con una densidad promedio de 1.50.

En gran cantidad de países se conoce el SLURRY con el nombre de HIDROMEX.

En taladros de banqueo húmedos, con diámetros que excedan de 50 mm. puede usarse, según demostró COOK (Científico Sueco, estudioso de los explosivos modernos), una mezcla de Nitrato de Amonio, TNT y Agua que puedan mezclarse in situ, como, por ejemplo, en la mina Babbet, Mensabi Rauge, Estados Unidos, donde se cargaron en el taladro conjuntamente tres sacos de 50 libras de NA, uno de otras 50 libras de TNT y agua. Se colocaron unos tubos de aire comprimido, hasta el fondo de los taladros. El paso de las burbujas a través de la papilla de Hidromex dio lugar a una buena mezcla.

Sin embargo, actualmente se usan estas papillas prefabricadas envasadas en bolsas de plástico que pueden dejarse caer en los taladros llevando la primera bolsa el cebo.

## COSTO DE LOS EXPLOSIVOS EN \$ /Kg (SLURRY)

COSTO	Dinamita	Gelatina	Ammonit	Anfo	Slurry
Precio		0.50	0.30	0.18	0.25
Carga, Almac.		0.07	0.03	0.02	0.02
Trans. mezcla		0.57	0.33	0.20	0.27

TOTAL /Kg

Analizando la Tabla N°1 se nota que los costos de los explosivos AN-FO e HIDROMEX son los más bajos.

Los valores utilizados en los cálculos se indican en la tabla N° 1.

Aparte del costo, es importante conocer las propiedades de los explosivos, especialmente su poder rompedor y su densidad. En la tabla 2 se dan los valores de la energía calorífica y el volumen de gases de estos explosivos, así como su coeficiente de potencia.

El poder rompedor calculado por volumen de taladro, es el producto de la potencia relativa (s) por el grado de retacado (P). Con respecto a este valor, existe una marcada discrepancia entre los diferentes tipos de explosivos en cuestión, e incluso se registran variaciones para un mismo tipo de explosivo según la forma de efectuar la carga. Para una gelatina el grado de retacado conatacador está entre 1,0 y 1,25 kg/dm<sup>3</sup>, mientras que con una cargadora neumática de car

tuchos los valores oscilan entre 1,65 y 1,70 kg/dm<sup>3</sup>. En la práctica se han alcanzado densidades de 1,18 kg/dm<sup>3</sup> para el Ammonit y de 1,20 para el AN-FO insitu y para el prefabricado 1.10. Para el slurry se consideran densidades de hasta 1.55.

TABLA N° 2

CONTENIDO DE ENERGIA Y VOLUMEN DE GASES

	Gelatina	Ammonit	AN-FO	Slurry
Energía Kcal/kg	1160	-	900	757
Vol. de gases dm <sup>3</sup>	850	-	973	950
Potencia Calculada	1.00	0.87	0.84	0.74

TABLA N° 3

	Gelatina	Ammonit	AN-FO	Slurry
Potencia relativas,				
experimental	1.00	0.89	0.86	0.74
Densidad e	1.45	0.90	0.8-1.0	1.4
Grado de retocado P				
a) Sin cargador neumático	1.0-1.25	1.0	0.9	
b) Con cargador neumático	1.5	1.1	1.2	1.55
Poder Rompedor	1.0-1.5	1.02	1.08	1.21

Obsérvese la baja densidad de carga (grado de retacado) obtenida con una gelatina y atacador, comparada con la obtenida con explosivos de Nitrato de Amonio cargados con máquinas neumáticas. Por ello no es cierto, como muchas veces se supone o se asevera, que los explosivos de nitrato de amonio tengan la misma potencia que una gelatina.

Es conveniente usar el Slurry (Nitrato de Amonio, TNT y agua en la proporción 65.5 / 20 / 14.5 para taladros de 100 mm. de diámetro o mayores.

La máxima energía se obtiene con papillas de slurry en la proporción 71/18/11, pero entonces es necesario un mayor diámetro del taladro. Debe aumentarse el porcentaje de TNT hasta el 30-35 cuando las papillas de Slurry vayan a emplearse en taladros más pequeños, pudiendo obtenerse en tales casos, una buena detonación en diámetros inferiores a 1 1/2 pulgadas.

Esto también es aplicable si se sustituye parte del nitrato de Amonio por Nitrato sódico (NS), en las proporciones 30/30/30/10 de NA/NS/TNT/H<sub>2</sub>O. En este caso el costo del explosivo aumenta aproximadamente en un 35 % y la densidad puede llegar hasta 1.70.

#### DIFERENTES ALTERNATIVAS .-

No es suficiente, tratar únicamente aquellos casos en los que se emplea un sólo tipo de explosivos en el taladro bien sea AN-FO o una gelatina. Los factores más importantes

a favor de los explosivos de Nitrato de Amonio, son: su bajo costo por kg. y su facilidad de carga, en comparación con una gelatina que siendo más cara tiene, sin embargo, la ventaja de ser resistente al agua y poseer una mayor densidad. Para llegar a los resultados más favorables, deben tenerse en cuenta las posibilidades de combinar diferentes tipos de explosivos en las cargas de fondo y de columna.

En la figura 22 se vé las diversas alternativas en la carga de una voladura de banco.

La primera alternativa corresponde a voladuras con NA- aceite mineral, tanto en la carga de fondo como en la de columna. El volumen de roca arrancada por taladro es proporcional al valor 1.08 del producto P.S. dado en la tabla 3. Según dicha tabla, no se puede alcanzar una densidad igual con nitrato amonico granulado que con el cristalizado y cargador neumático.

El grado de retacado obtenido en la carga con el granulado es aproximadamente de  $P = 0.9$  y el valor correspondiente para el volumen de roca arrancada por taladro es de 0.81.

La alternativa B se refiere a voladuras en las que se emplea únicamente Ammonit, el cual es un explosivo prefabricado de NA con buenas características para la carga a granel. Las alternativas C.D y E corresponden a una carga de fondo realizada con una gelatina y cargador neumático de cartu-

chos.

La carga de columna para estos tres casos se representa en la figura por Am, que significa NA- aceite mineral o Ammonit.

Cuando se aumenta la longitud de la carga de fondo, se incrementa el volumen de roca arrancada por taladro; el valor relativo para la última de las mencionadas alternativas, E, es de 1,50.

La influencia del grado de retacado de la carga de fondo, en el volumen de roca arrancada por taladro; puede verse claramente comparando el caso H con el E, ambos con la misma altura de carga de fondo pero con distintos métodos de carga. Para H e I con menor grado de retacado, el volumen arrancado por taladro tiene un valor relativo de 1.00.

Debe tenerse en cuenta en los casos A y B que el volumen arrancado por taladro es ligeramente menor si se utiliza NA granulado que cuando éste es cristalizado.

## CAPITULO XIV

### NORMAS DE SEGURIDAD EN EL MANEJO DE LOS EXPLOSIVOS

Repetidamente y en el momento preciso, se ha ido insistiendo desde el primer capítulo en detalles, tanto prácticos como teóricos, para que el manejo de los explosivos no ofrezca riesgos. También hay normas para su destrucción, cuando en ellos se observan signos de descomposición o de congelación.

Resta, por tanto, indicar de una manera sistemática, cómo debe manejarse una carga explosiva desde que se prepara para el detonador, y las indicaciones ante un posible fallo.

Las instrucciones para el uso de la dinamita, son las siguientes:

#### la. Preparación del detonador y de la mecha .

a) Cortar la longitud necesaria de mecha de modo que el corte resulte limpio y derecho, sin sesgo.

Para esa operación debe emplearse una herramienta especial, que puede ser cualquiera de los tipos que se encuentran en el comercio.

Esta herramienta tiene tres útiles, uno que consiste en unas tijeras para cortar la mecha, otro que sirve de alicate para sujetar el detonador a la mecha, y un tercero que es una punta para abrir el alojamiento del detonador en el cartucho. Cuidese de que no se ensucien ni humedezcan los

extremos de la mecha cortada.

b) Sacudir el serrín que se halle en el interior del detonador.

c) Introducir suavemente la mecha en el interior del detonador, hasta ponerle en contacto con el fulminante o con el opérculo que lo cubre.

No oprimir la mecha contra el fulminante o el opérculo que lo cubre, ni hacerle girar dentro del detonador.

d) Sujetar el detonador a la mecha empleando la herramienta especial.

Efectuar con el alicate de la tenacilla una suave presión sobre el detonador en la parte opuesta a la carga, Y DE NINGUN MODO con los dientes. La muesca de sujeción debe hacerse lo más cerca posible del borde del detonador (Figura 19).

e) Cuando el barreno esté debajo del agua, es indispensable obturar el espacio entre la mecha y la boca del detonador con cebo, pez o arcilla, para que no se moje el fulminante.

#### 2a. Preparación del primer cartucho con detonador y mecha .-

a) Abrir el cartucho por uno de sus extremos; hacer en la masa del explosivo un agujero con la punta que para este uso tienen las herramientas, e introducir con suavidad en este agujero el detonador con su mecha, hasta que quede fue-

ra de la masa una tercera parte del mismo (figura 20).

b) Atar el papel del cartucho fuertemente sobre el detonador con un bramante fino, de modo que ambos queden unidos como se ve en la expresada figura 20. Esta operación no debe efectuarse empleando la misma mecha para hacer el atado, pues en esta última forma se corre el riesgo de que el cartucho pueda quemarse en parte y su detonación sea defectuosa.

También está expuesto a que si la mecha no ha quedado bien inmovilizada dentro del detonador, experimente, al hacer el nudo con ella misma, un movimiento pequeño, pero brusco, que puede ocasionar un roce muy peligroso sobre el fulminante.

### 3a. Carga del Taladro .-

a) Limpiar bien el agujero del taladro; introducir luego en él los cartuchos uno a uno, comprimiéndolos suavemente con un atacador redondo de madera. No comprimir demasiado ni machacar los cartuchos en el agujero.

b) Introducir después el cartucho cebo que lleva el detonador, empujándolo suavemente hasta ponerlo en contacto con el resto de la carga. No atacar este cartucho directamente.

c) Taponar el taladro con arena o arcilla echando primero sin atacar algunos centímetros y atacando encima el resto, hasta llenar el agujero (Fig. 21).

No usar nunca barras metálicas para estas operaciones de atacado.

#### 4a. Fallos :-

a) No acercarse a un taladro fallado hasta que haya pasado por lo menos media hora. No tocar un taladro fallado.

b) Perforar un segundo agujero a una distancia de unos 30 centímetros del fallado y en una dirección tal que el útil de trabajo no pueda encontrarle.

c) Cargar y dar fuego a este segundo taladro.

d) Examinar cuidadosamente lo arrancado para cerciorarse de que no ha quedado entre los escombros algún cartucho o detonador sin quemar.

#### 5a. Precauciones generales :-

a) No colocar las dinamitas cerca del fuego, estufas, tubos de vapor o calorímetros, ni a los rayos directos del sol.

b) No usar la dinamita endurecida por el frío. Para deshelarla, colocar los cartuchos dentro de un recipiente metálico sumergido en un baño de agua templada.

c) Manejar siempre con gran cuidado cartuchos y detonadores.

d) ES SUMAMENTE PELIGROSO NO OBSERVAR ESTAS INSTRUCCIONES O PRETENDER SEPARARSE DE ELLAS.

APENDICE

INFORME DE LA PRUEBA REALIZADA CON LA DINAMITA "DIPSA" DE  
1 1/8" x 7" - 65 % - EL DIA 17-4-68

Se perforó en un frente del Tajeo 9054 - Sub nivel A.

Dureza del frente = Semi dura

Area del frente = 3 Mtrs. x 1.65 Mtrs. = 4.95 Mtrs.<sup>2</sup>

Avance del disparo = 1.25 Mtrs.

Volumen del disparo = 6.1875 Mtrs.<sup>3</sup>

No. carros extraídos del disparo = 35 carros

Volumen de cada carro = 0.225 Mtrs.<sup>3</sup>

Toneladas de cada carro = 0.5625 Tns.

Toneladas extraídas del disparo = 19.6875 Tns.

Promedio de peso de cada cartucho = 115 Grms. de dinamita

Se cargó un total de 80 cartuchos de dinamita, de la siguiente manera:

Arranque	= 4	Taladros	x 5	Cartuchos	c/t = 20	Cartuchos
Ayudas	= 4	"	x 3	"	c/t = 12	"
Resto	= 24	"	x 2	"	c/t = 48	"
						<u>80</u> Cartuchos

Peso consumido de dinamita:

80 Cartuchos x 115 Grms. de dinamita c/c=9,200 Grms. de dinamita.

RENDIMIENTO.-

Grms. de dinamita por metro cúbico: 1,486 Grms. por m.<sup>3</sup>

Grms. de dinamita por tonelada de mineral arrancado :

467 Grms. por tonelada.

Minas Chapi, 19 de Abril de 1968.

## MINAS DE COBRE DE CHAPI S.A.

## MINAS CHAPI

## RENDIMIENTO DE DINAMITA POR AVANCES

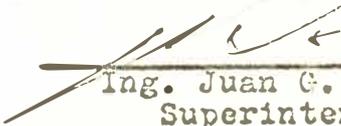
DICIEMBRE DE 1968.

Labor	Mts. 3	Mts. 3	Grms.	Grms.	Grms x Metro 3	Grms x Mt. 3
	Mes	Año	Dinamita Mes	Dinamita Año	Mes	Año
<u>MINA ATAHUALPA.</u>						
<u>Desarrollo.-</u>						
Gal. E-Niv.-2465	--	61	--	104,846	--	1,718
" E- " -2445	--	33	--	35,149	--	1,065
" E- " -2445-A	--	35	--	62,551	--	1,787
" W- " -2445-A	--	32	--	60,209	--	1,881
" W- " -2445	--	27	--	23,658	--	876
Chimenea -8925	--	61	--	220,740	--	3,618
Cort. N°2 Prolong.	--	25	--	42,042	--	1,681
Gal. W-Niv.-2475	70	142	121,893	270,101	1,741	1,902
<b>Total Desarrollo</b>	<b>70</b>	<b>416</b>	<b>121,893</b>	<b>819,296</b>	<b>1,741</b>	<b>1,969</b>
<u>Preparación.</u>						
Incl. N°4 -2465-E	--	32	--	34,620	--	1,081
" N°3 -2465-E	--	13	--	15,915	--	1,324
" N°3 -8950	--	20	--	32,496	--	1,624
" N°4 -8950	--	46	--	69,010	--	1,500
" N°1 -2445-A	--	18	--	39,722	--	2,206
" N°2 -8900	--	22	--	32,496	--	1,477
Sub.Nivel -8950	--	3	--	4,749	--	1,583
" " -2440-E	--	9	--	11,726	--	1,465
Incl. N°1 -2445	--	11	--	15,392	--	1,399
" N°1 -9080	--	67	--	13,320	--	198
Sub.Nivel -9080	--	36	--	142,496	--	4,152
" " -9054	--	57	--	96,764	--	1,697
Incl. -8940	--	67	--	106,488	--	1,589
Sub.Nivel -8940	--	20	--	27,378	--	1,368
" " -8965	--	20	--	32,640	--	1,632
Incl. N°6 -8940	--	22	--	33,082	--	1,503
<b>Total Preparación</b>	<b>--</b>	<b>462</b>	<b>--</b>	<b>715,294</b>	<b>--</b>	<b>1,548</b>
<b>Total General</b>	<b>70</b>	<b>878</b>	<b>121,893</b>	<b>1,534,590</b>	<b>1,741</b>	<b>1,748</b>

Minas Chapi, 31 de Diciembre de 1968

V° B°

  
 Ing. Guido Hurtado Smith  
 Jefe de Minas

  
 Ing. Juan G. Rosas A.  
 Superintendente

## MINAS DE COBRE DE CHAPI S.A.

## MINAS CHAPI

## CONSUMO Y RENDIMIENTO DE DINAMITA EXADIT 65 %

DICIEMBRE DE 1968.

Labor	Grms. Dinamita	Grms. Dinamita	Grms. x T.M.	Grms. x T.M.
	Mes	Año	de mineral Mes	de mineral Año
<u>MINA ATAHUALPA</u>				
<u>Explotación.-</u>				
Tajeo 9070	-.-	277,704	-.-	255
" 9000	12,960	232,131	432	337
" 8930	-.-	35,117	-.-	351
" 8950	-.-	294,293	-.-	321
" 8900	151,900	2'390,323	314	372
" 9090	-.-	204,344	-.-	268
" 8960	-.-	174,130	-.-	338
" 9080	288,959	3'230,253	369	372
" 9054	-.-	714,392	-.-	390
" 9110	-.-	43,576	-.-	396
" 8940	61,474	237,121	654	425
" 8965	-.-	74,230	-.-	345
<b>Total Explotación</b>	<b>515,293</b>	<b>7'907,619</b>	<b>365</b>	<b>360</b>
<u>Desarrollo.-</u>				
Gal. E-Niv-2465	-.-	-.-	-.-	-.-
" E- " -2445	-.-	-.-	-.-	-.-
" E- " -2445-A	-.-	-.-	-.-	-.-
" W- " -2445-A	-.-	-.-	-.-	-.-
" W- " -2445	-.-	20,992	-.-	525
Chimenea 8925	-.-	-.-	-.-	-.-
Cort. N°2 Prolong.	-.-	-.-	-.-	-.-
Gal. W-Niv-2475	121,893	270,101	-.-	-.-
<b>Total Desarrollo</b>	<b>121,893</b>	<b>291,093</b>	<b>-.-</b>	<b>525</b>
<u>Preparación.-</u>				
Incl. N°4 -2465-E	-.-	6,166	-.-	342
" N°3 -2465-E	-.-	15,915	-.-	408
" N°3 -8950	-.-	32,496	-.-	541
" N°4 -8950	-.-	-.-	-.-	-.-
" N°1 -2445-A	-.-	-.-	-.-	-.-
" N°2 -8900	-.-	32,496	-.-	492
Sub. Nivel-8950	-.-	-.-	-.-	-.-
" " -2440-E	-.-	-.-	-.-	-.-
Incl. N°1 -2445	-.-	-.-	-.-	-.-
" N°1 -9080	-.-	13,320	-.-	333
Sub. Nivel-9080	-.-	149,496	-.-	555
" " -9054	-.-	96,764	-.-	509
Inclin. -8940	-.-	106,488	-.-	537
Sub. Nivel-8940	-.-	27,378	-.-	434
" " -8965	-.-	32,640	-.-	544
Inclin. N6-8940	-.-	33,082	-.-	367
<b>Total Preparación</b>	<b>-.-</b>	<b>546,241</b>	<b>-.-</b>	<b>499</b>
<b>Total General</b>	<b>637,186</b>	<b>8'744,953</b>	<b>365</b>	<b>385</b>

Minas Chapi, 31 de Diciembre de 1968.

MINAS DE COBRE DE CHAPI S.A.

Minas Chapi

183

RENDIMIENTO DE DISPAROS EN AVANCE

DICIEMBRE DE 1968.

Labor	N° Disparos		Avance Mts.		Rendim. Rendim.	
	Mes	Año	x Disparo Mes	x Disparo Año	Dispa. Mes	Dispa. Año
<u>MINA AFAHUALPA</u>						
<u>Desarrollo.-</u>						
Gal. ENiv.-2465	.-	21	.-	1.00	.-	81.97%
" E " -2445	.-	6	.-	1.66	.-	71.08"
" E " -2445-A	.-	14	.-	0.68	.-	56.20"
" W " -2445-A	.-	11	.-	0.80	.-	66.67"
" W " -2445	.-	7	.-	1.24	.-	99.19
Chimenea -3925	.-	24	.-	1.25	.-	86.21
Cort. N°2 Prolong	.-	5	.-	1.52	.-	100.00
Gal. WNiv.-2475	18	38	1.34	1.32	88.16%	86.84
<b>Total Desarrollo</b>	<b>18</b>	<b>126</b>	<b>1.34</b>	<b>1.15</b>	<b>88.16%</b>	<b>75.66%</b>
<u>Preparación.-</u>						
Incl. N°4 -2465-E	.-	10	.-	1.00	.-	81.97%
" N°3 -2465-E	.-	3	.-	1.00	.-	84.75
" N°3 -8950	.-	6	.-	0.96	.-	78.69
" N°4 -8950	.-	16	.-	0.95	.-	77.86
" N°1 -2445-A	.-	5	.-	0.96	.-	85.71
" N°2 -3900	.-	6	.-	0.95	.-	77.86
Sub. Nivel-8950	.-	1	.-	1.00	.-	81.97
" " -2440-E	.-	3	.-	1.00	.-	81.97
Incl. N°1 -2445	.-	4	.-	0.87	.-	71.31
" N°1 -9080	.-	5	.-	1.00	.-	81.97
Sub. Nivel-9080	.-	21	.-	1.02	.-	82.93
" " -9054-E	.-	12	.-	1.00	.-	80.65
Incl. -8940	.-	16	.-	0.95	.-	74.40
Sub. Nivel-8940	.-	5	.-	1.00	.-	81.97
" " -8965	.-	4	.-	1.10	.-	75.86
Incl. N°6 -8940	.-	5	.-	1.44	.-	94.74
<b>Total Preparación.-</b>		<b>122</b>	<b>.-</b>	<b>1.00</b>	<b>.-</b>	<b>80.00</b>
<b>Total General</b>	<b>18</b>	<b>248</b>	<b>1.34</b>	<b>1.08</b>	<b>88.16%</b>	<b>71.05%</b>

Minas Chapi, 31 de Diciembre de 1968.

V° B°

Ing. Guido Hurtado Smith  
Jefe de Minas

Ing. Juan G. Rosas A.  
Superintendente

## CARACTERÍSTICAS DE EXPLOSIVOS INDUSTRIALES

## T E Ó R I C A S

DESIGNACIÓN OFICIAL	DESIGNACIÓN COMERCIAL	VOL. DE GASES A 0°C Y 760 MM. LITROS	ENERGÍA CALORÍFICA A VOL. CONSTANTE KCAL./KG.	DENSIDAD DE CARGA	FUERZA ESPECÍFICA	PRESIÓN DE LOS GASES EN LA EXPLOSIÓN KG./CM. <sup>2</sup>	TEMPERATURA ALCANZADA EN LA EXPLOSIÓN °C	PODER ROMPE-DOR (BRISANCE)	OXÍGENO SOBRANTE SIN LA EVOLUTURA. LITROS
Goma	Goma pura	761,6	1.546	0,94	12.013	33.913	4.202	295	+ 4,1
	Goma n.º 1 especial	819,3	1.400	0,87	11.309	29.485	3.643	281	+ 6
	Goma n.º 1	647,7	1.104	0,87	8.167	21.249	3.208	217	+ 73,2
	Goma n.º 2	613,6	1.335	1,01	8.314	25.191	3.571	415	+ 6,8
	Goma n.º 2 especial	690,8	1.357	0,93	5.702	25.503	3.485	174	+ 9,5
Gelamonita	Goma n.º 2 especial A								
	Goma n.º 2 especial B	929	1.130	0,77	10.226	23.608	2.489	178	— 14
	Goma n.º 1 incongelable.								
Dinamita	Ligamita n.º 1	950,8	947	0,75	8.455	19.043	2.249	182	+ 18,3
	Dinamita n.º 1	574,1	1.081	1,056	8.560	27.128	3.957	255	+ 19,8
	Dinamita especial roja	543,4	1.016	1,06	8.269	26.243	4.044	650	+ 17,4
	Dinamita especial negra	457,5	1.039	1,15	5.472	18.886	3.117	225	— 54,7
	Dinamita n.º 3	429,6	1.115	1,18	5.246	18.556	3.192	240	— 2,2
Nitramita	Dinamita n.º 3 incongelable	450,3	1.066	1,15	5.219	17.928	3.015	127	+ 32,8
	Goma n.º 3	640,7	749	0,94	5.484	15.466	2.155	186	+ 122,3
	Amonita n.º 1	991,2	850	0,722	8.751	18.957	2.231	159	+ 33,9
	Sabulita O	799,8	951	0,78	9.890		2.517	359	+ 21,9
	Sabulita OI	755	987	0,80	8.079	19.397	2.763		— 33
Amonal	Trinolita G. P. n.º 1	848,6	676	0,78	6.324	15.153	1.941	230	— 40,3
	Trinolita 2	792,7	551	0,81	5.247	12.717	1.605		+ 59,4
Cloratita	Trinolita 3	370	690	1,17	3.732	13.096	2.582	107	+ 72,6
Antigrisú	Ex. Seg. 2	905	680	0,741	6.880	15.304	1.929		+ 610,2
	Ex. Seg. 7	947,3	564	0,753	6.302	14.231	1.614		+ 103,5
	Ex. Seg. 7 bis.	1.016,9	505	0,704	6.102	13.085	1.429		+ 134,6

## CONCLUSIONES

PRIMERA .- Es importante para comprar un explosivo conocer su velocidad de detonación (m/seg) ya que cuanto más alta sea la velocidad de detonación tanto mayor será la acción destructora (poder rompedor), sobre todo lo que al explosivo rodea.

SEGUNDA .- Para una explotación minera no es conveniente comprar mucha dinamita para stock, ya que la dinamita almacenada mucho tiempo disminuye progresivamente su velocidad de detonación, especialmente en climas calurosos y húmedos, llegando a fallar y a resultar inutilizable.

TERCERA .- El peligro en las minas de carbón (explosiones de grisú y de polvo de carbón) está íntimamente relacionado con la temperatura y la duración de las llamas lanzadas por el explosivo.

Llamas de 0.1 mts. en la dinamita de seguridad de 65% mientras que los explosivos de seguridad contra el grisú sólo dan llama de pocos centímetros.

CUARTA .- Para rebajar la temperatura de la explosión se adiciona a los explosivos de seguridad un mínimo de 70% de nitrato amónico. Debe utilizarse además fulminantes enérgicos.

QUINTA .- En la minería del carbón (en capa), no debe usarse

fulminantes con vainas de aluminio, porque al explosionar el fulminante desprende partículas incandescentes de ese metal, fácilmente iniciadoras de una explosión de grisú.

SEXTA .- Al elegir un tipo de explosivo para una explotación minera, no solamente debemos ver cual es el más económico, sino buscar dentro de las diferentes marcas uno de gran poder rompedor, ya que si elegimos el más barato resulta a la larga el más caro.

SETIMA .- Los polverines subterráneos deben tener por lo menos una vía libre para el escape de los gases a la superficie. (Art. 112 Reglamentos del Código de Minería), lo cual no se cumple en muchas compañías mineras.

OCTAVA .- Debe tenerse cuidado en utilizar los explosivos más antiguos con preferencia a los ingresados en fecha reciente.

NOVENA .- Debo hacer notar que actualmente en nuestro país no se fabrican fulminantes, es necesario hacer un estudio sobre las posibilidades de instalar alguna fábrica ya que aminoraría los costos de explotación.

DECIMA .- El AN-FO no ha podido desplazar a la dinamita totalmente, por las siguientes razones, entre otras:

a) Tiene la misma fuerza aproximadamente igual a la dinamita de 60% por lo que no rompe a las rocas duras, especialmente al granito.

- b) No se puede usar en taladros de los cuales emerge agua.
- c) Necesita usarse en zonas donde la ventilación sea buena.
- d) Teóricamente rebaja los costos aproximadamente en 30% los gastos de operación de voladura, pero en la práctica algunas compañías mineras se encuentran con el problema que sus Sindicatos piden en las zonas donde se usa AN-FO el pago de 1/8 u 2/8 (de jornal, o sea 1 ó 2 horas) por concepto de humo, lo cual eleva los costos.
- e) El nitrato de Amonio ( $\text{NO}_3 \text{NH}_4$ ) no se puede almacenar mucho tiempo.
- f) El AN-FO es más propenso que la dinamita en producir dióxido de nitrógeno tóxico.

## BIBLIOGRAFIA

### REVISTAS :

1. Aranaz E. Izaguirre, R. Pólvoras sin humo españolas  
Madrid, 1964.
2. Aranaz E. Izaguirre, R. Iniciación de las detonaciones.
3. Berger et Viard Physique des Explosifs Solids.  
1964.
4. Bickford, Manuel "L'utilisation pratique des ex -  
plosifs de mine dans leurs diver  
ses applications" 1966.
5. Blanco Antonio Pirología  
Editorial Dossat. Madrid.
6. Cebrián, J.P. Explosivos en la Construcción.
7. Clift, Fedoroff y Lefax A Manual for Explosives Laborato  
ries. Filadelpia, 1964.
8. Colver, Capt. E. de W.S High Explosives.  
Londres 1968.
9. Cook Melvin A. The Science of High Explosives.
10. Chalon Les Explosifs Modernes  
Paris, 1964.
11. Daniel J. Dictionaire des Matieres Explosi  
ves. 1962.
12. Langeforors U. Técnica Moderna de Voladura de  
y B. Kihlstrom Rocas.  
Editorial Urmo. 1968.



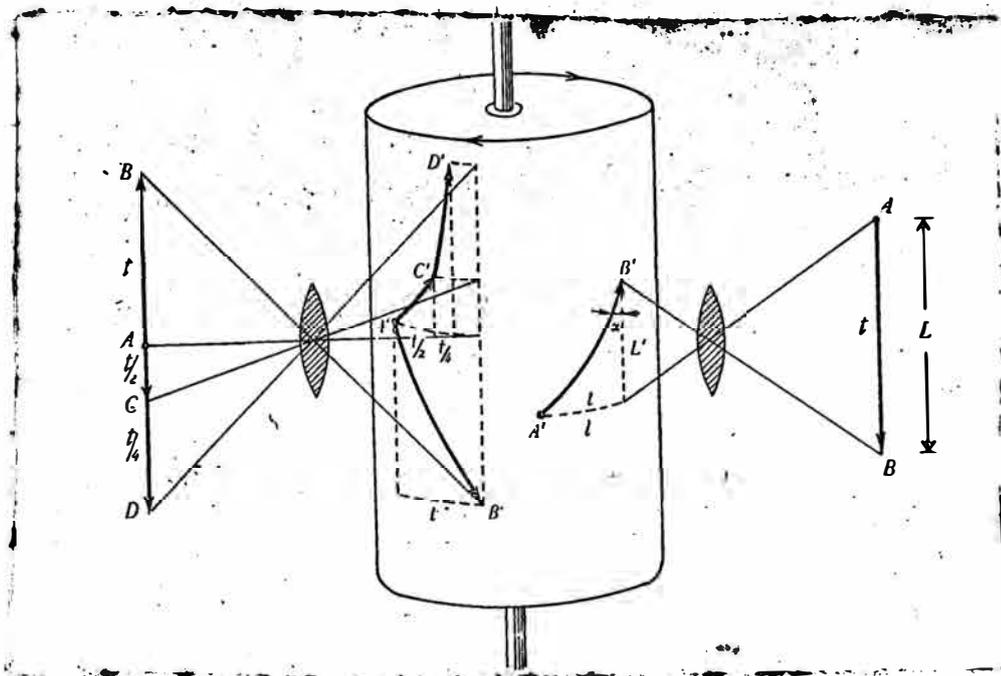


FIG. 1

Representación esquemática de la medición de la velocidad de detonación con el cronógrafo de tambor giratorio.

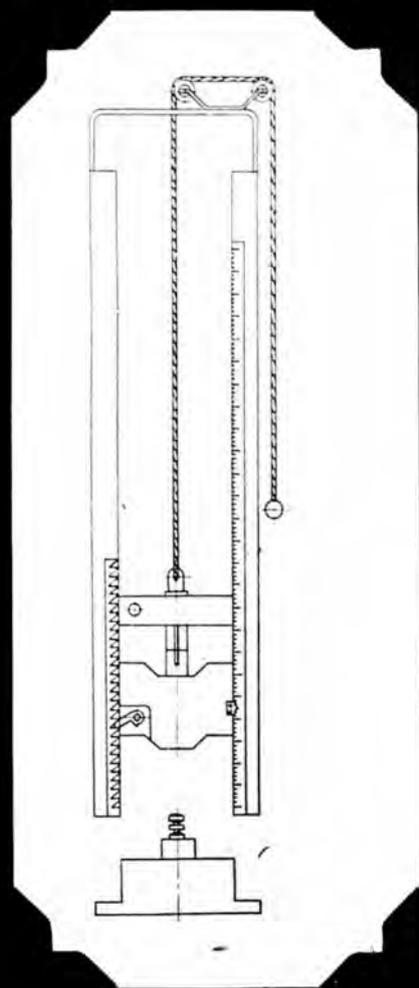


FIG 2

SENSIBILIDAD AL CHOQUE

# LA PRUEBA DE TRAZEL

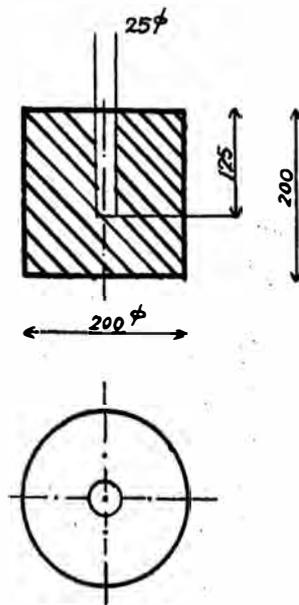


Fig 3



Fig 4

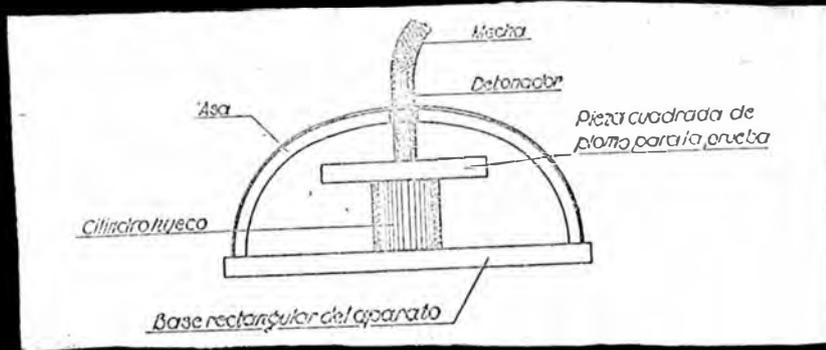


Fig 5  
PRUEBA PRACTICA DE CEBOS

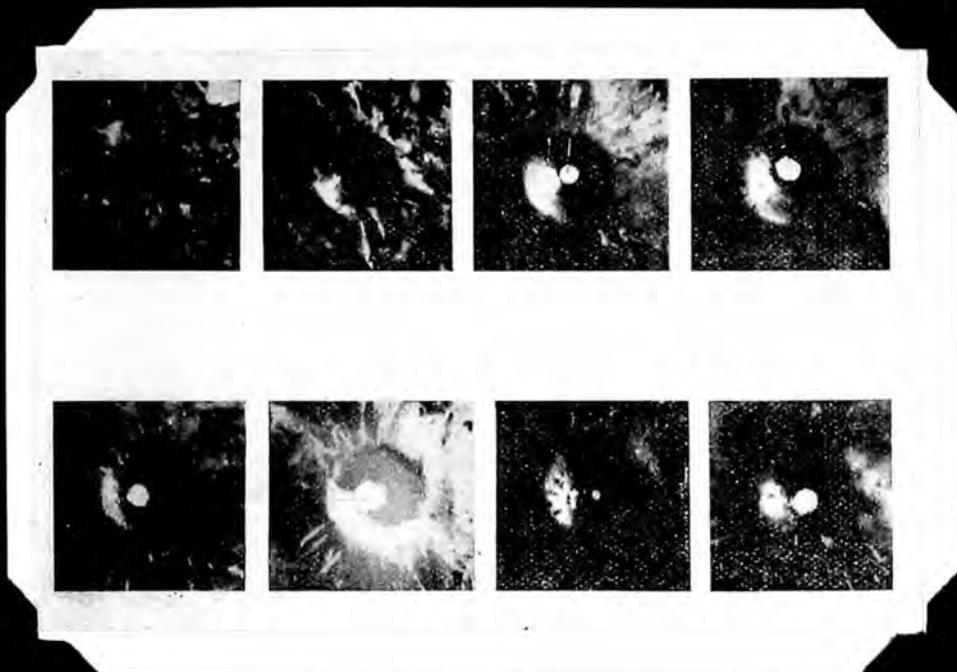


Fig 6  
Efectos logrados sobre las planchas al detonar los cebos.

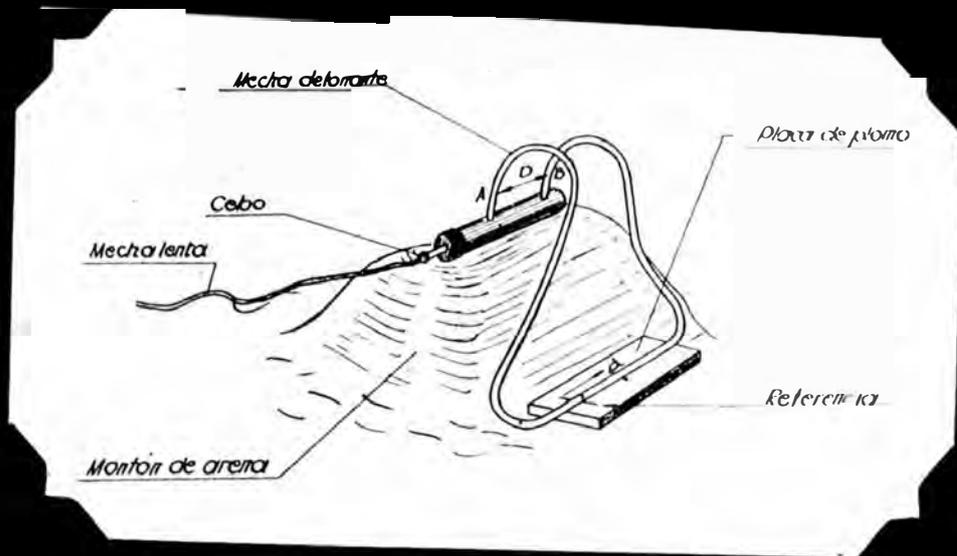


Fig 7

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE DETONACIÓN

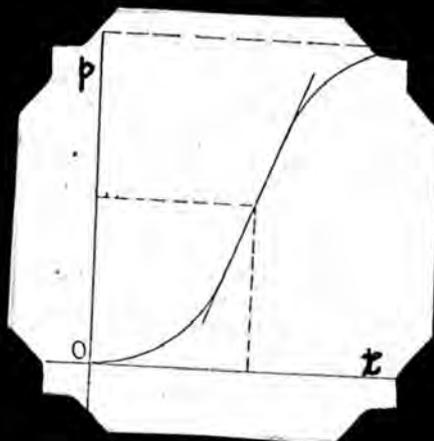


Fig 8

CÁLCULO DE LA VIVACIDAD

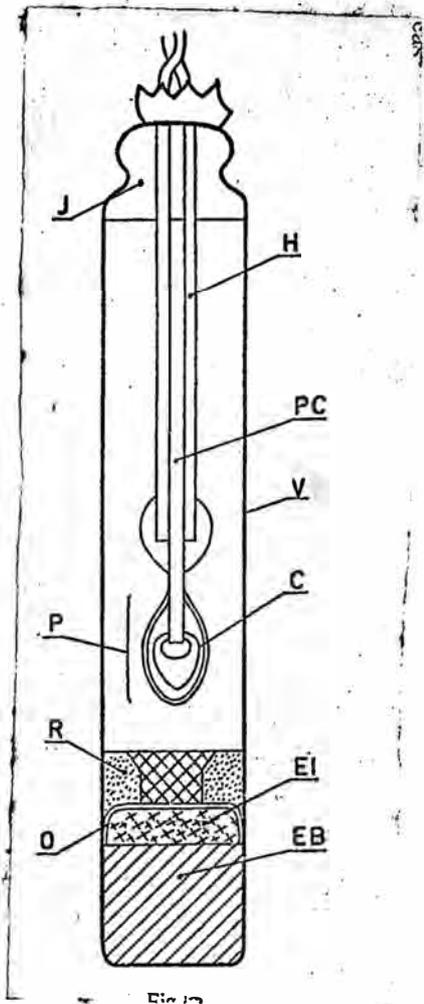


Fig. 13

DETONADOR ELECTRICO

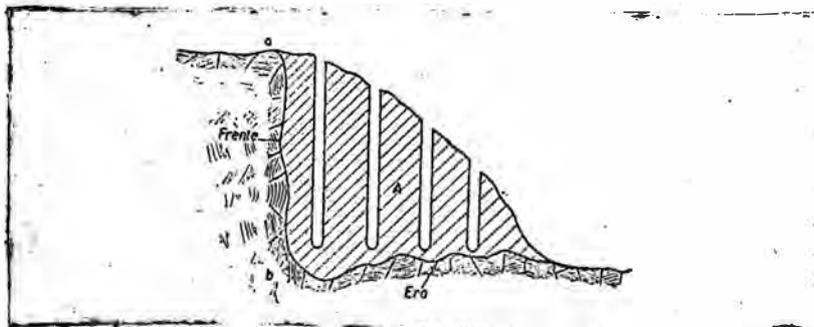


FIG. 14

FRENTE DE CANTERA

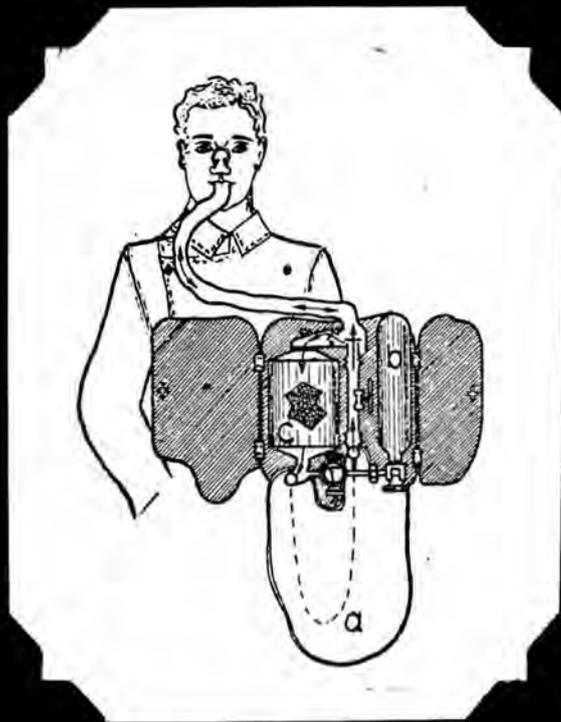


Fig 15  
EQUIPO RESPIRADOR

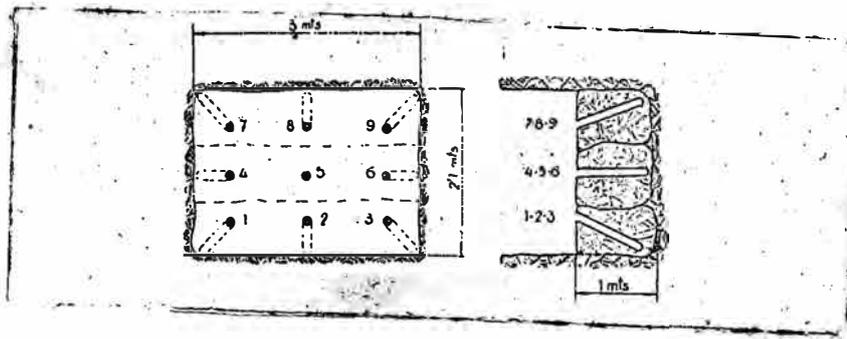


FIG. 16

TRAZO EMPLEADO EN EL TUNEL DE KONIGSHUTTE ( PRUSIA)

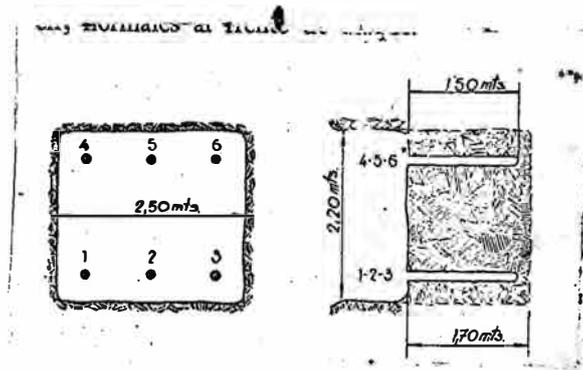


FIG. 17

TRAZO EMPLEADO EN EL TUNEL DE PFAFFENSPRUNG

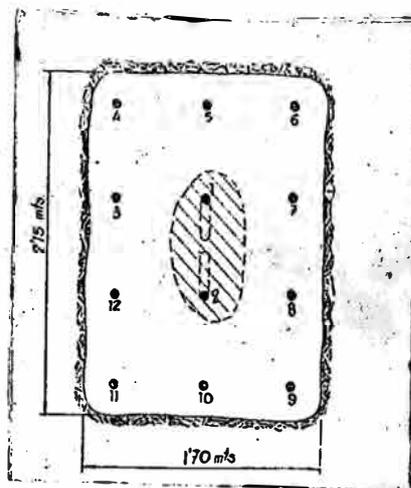


FIG. 18

TRAZO EMPLEADO EN EL TUNEL DE LUGAU

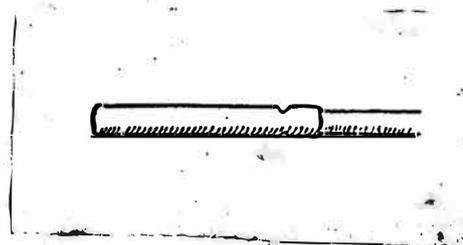


FIG. 19

FULMINANTE UNIDO A LA GUIA

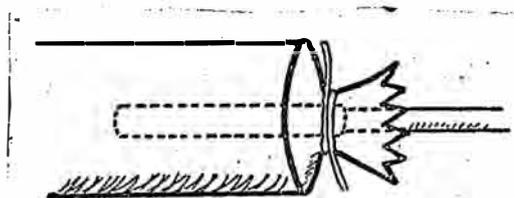


FIG. 20

PREPARACION DEL CARTUCHO DE DINAMITA

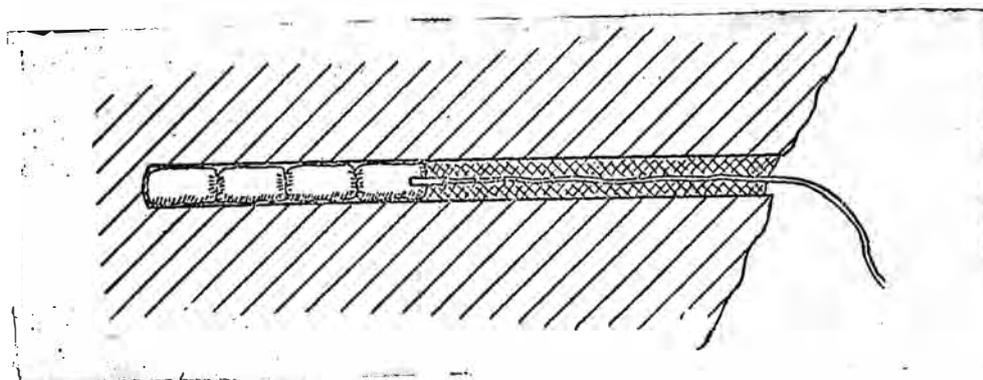
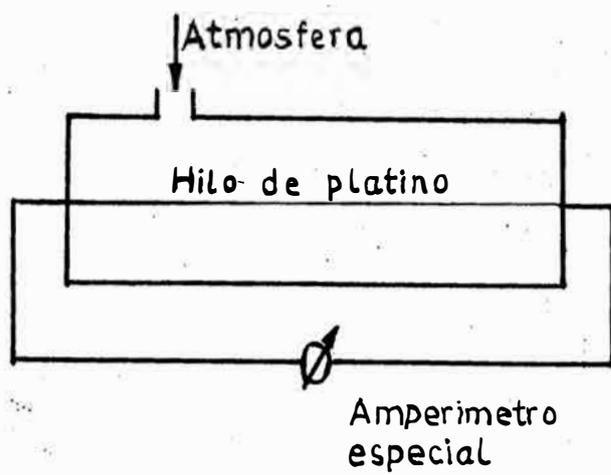


FIG. 21

CARGA DE UN TALADRO



APARATO TORRES QUEVEDO  
Para reconocimiento del Géisú

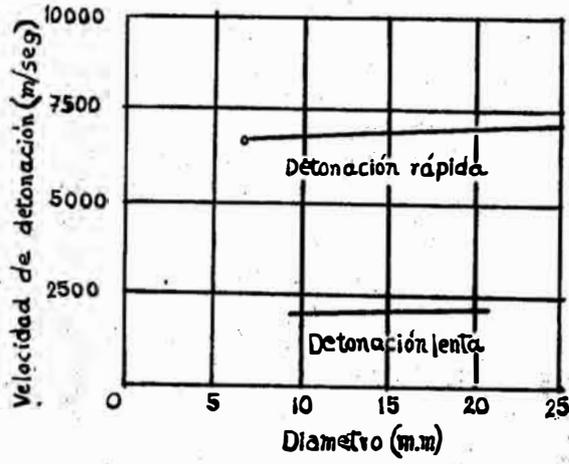


Fig 9

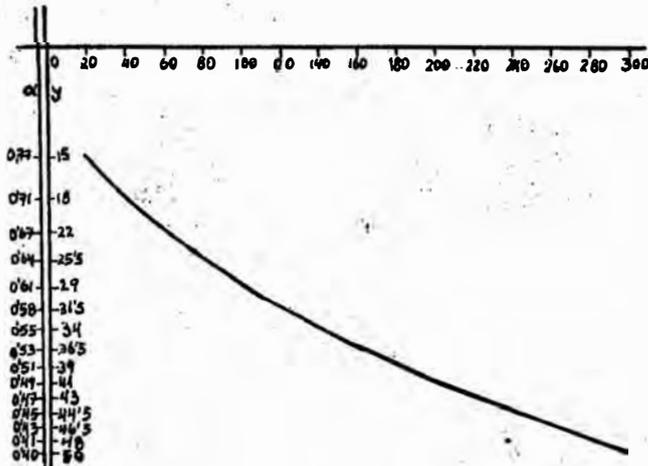


Fig 10

Cálculo de valores del covolumen  $\alpha$  de un explosivo

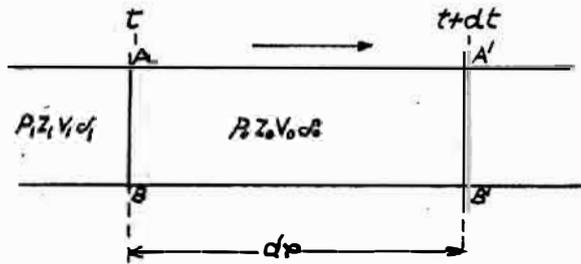


Fig 11  
 Representación esquemática del medio en que se verifica la detonación

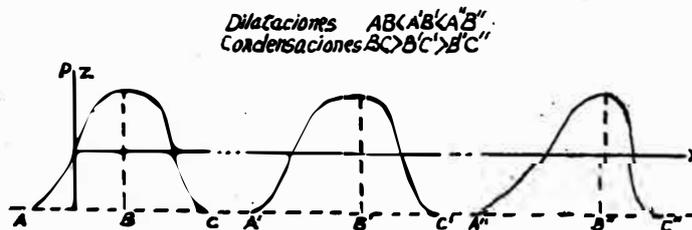


Fig 12

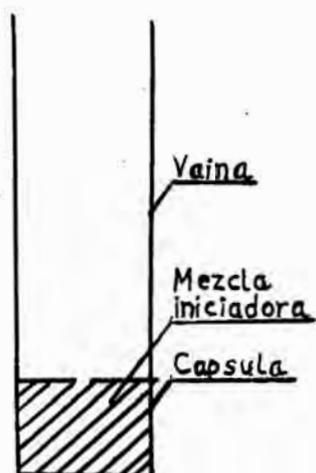


Fig 11a  
FULMINANTE SIMPLE

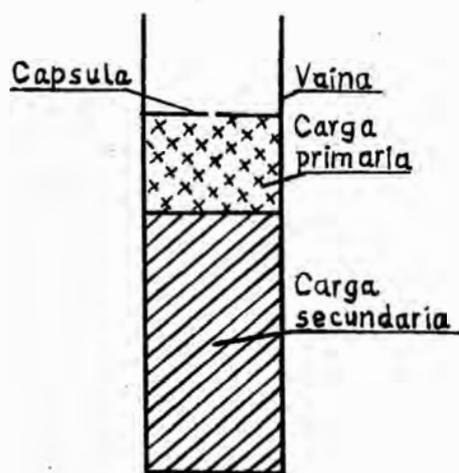
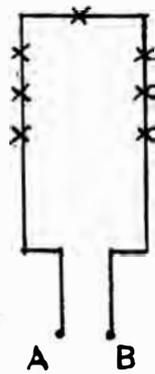
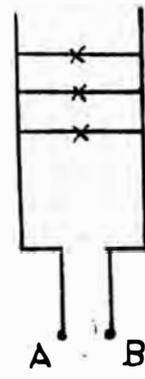


Fig 12a  
FULMINANTE COMPUESTO

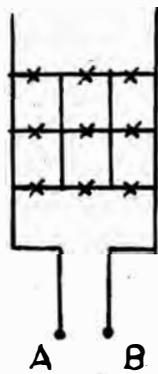


Esq. IV



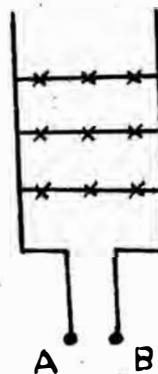
Esq. V

**CONEXION EN SERIE**



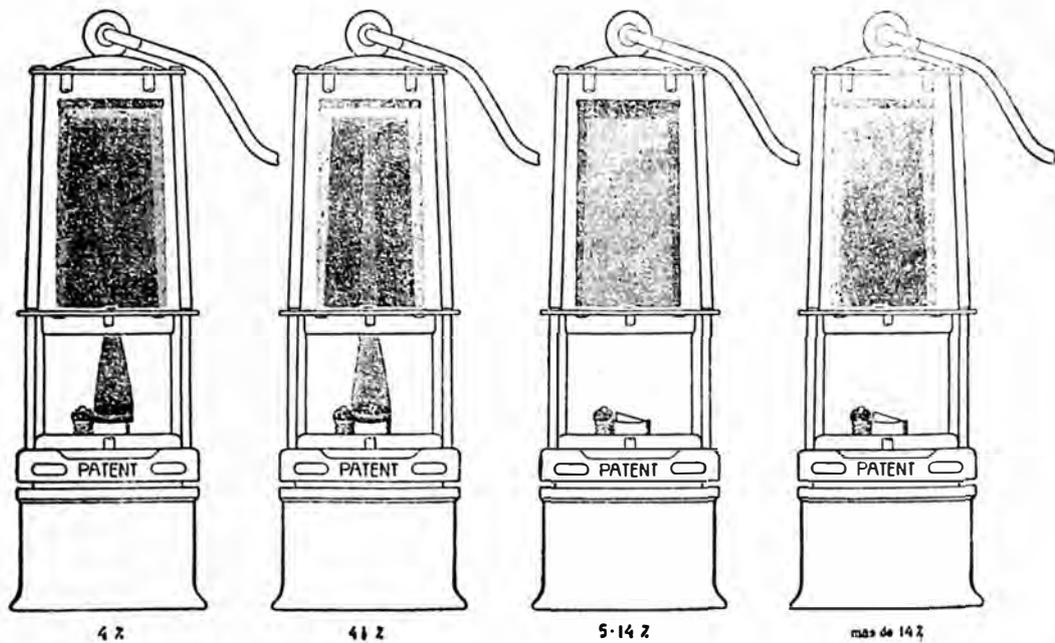
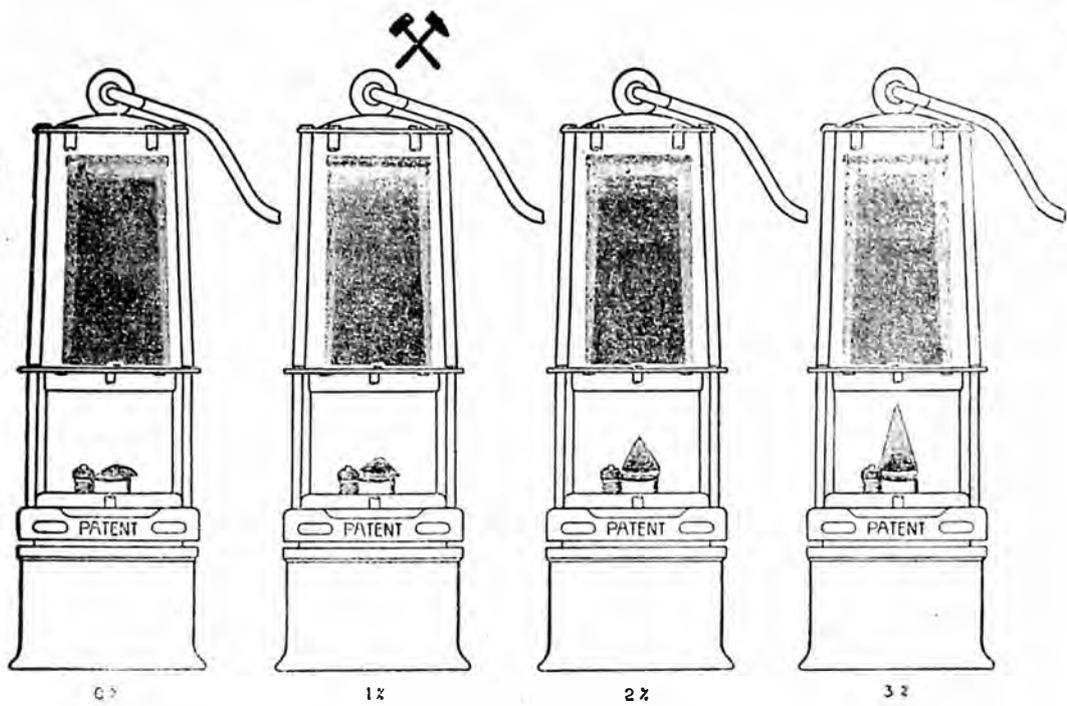
Esq. VI

**CONEXION EN PARALELO**



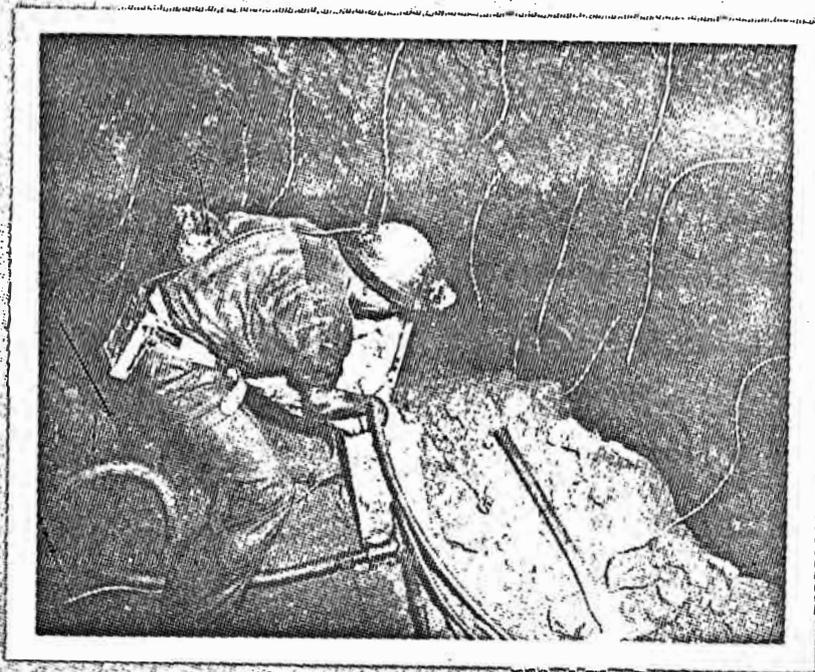
Esq. VII

**CONEXIONES MIXTAS**



LAMPARAS DE SEGURIDAD

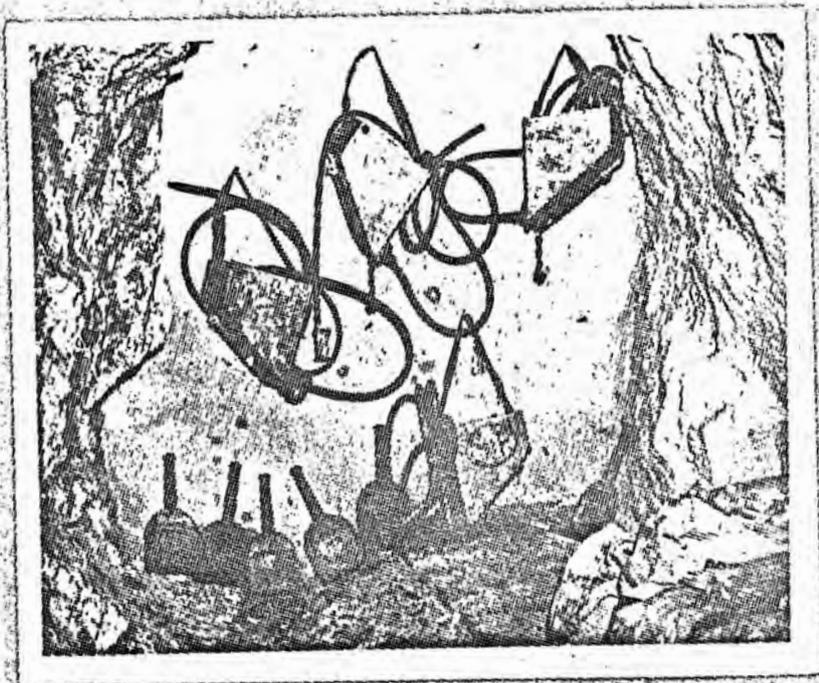
3.- Cargando el "Anoloder"



4.- Cargando los Taladros (Notar la linea tierra)



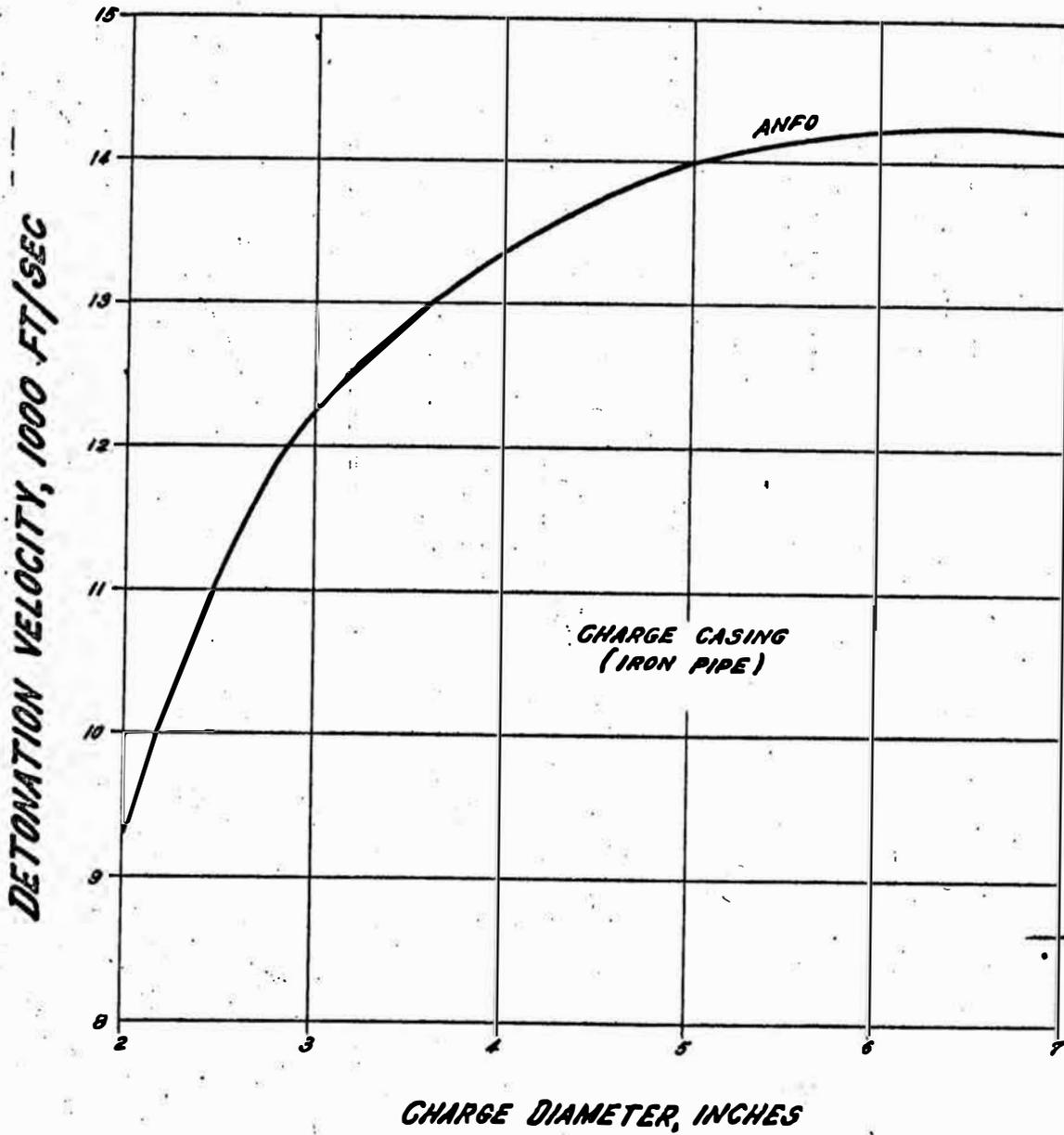
1.- Los Cargadores "Penberthy Anoloder"



2.- Polvorín de AN-FO (Notar la fecha y hora)

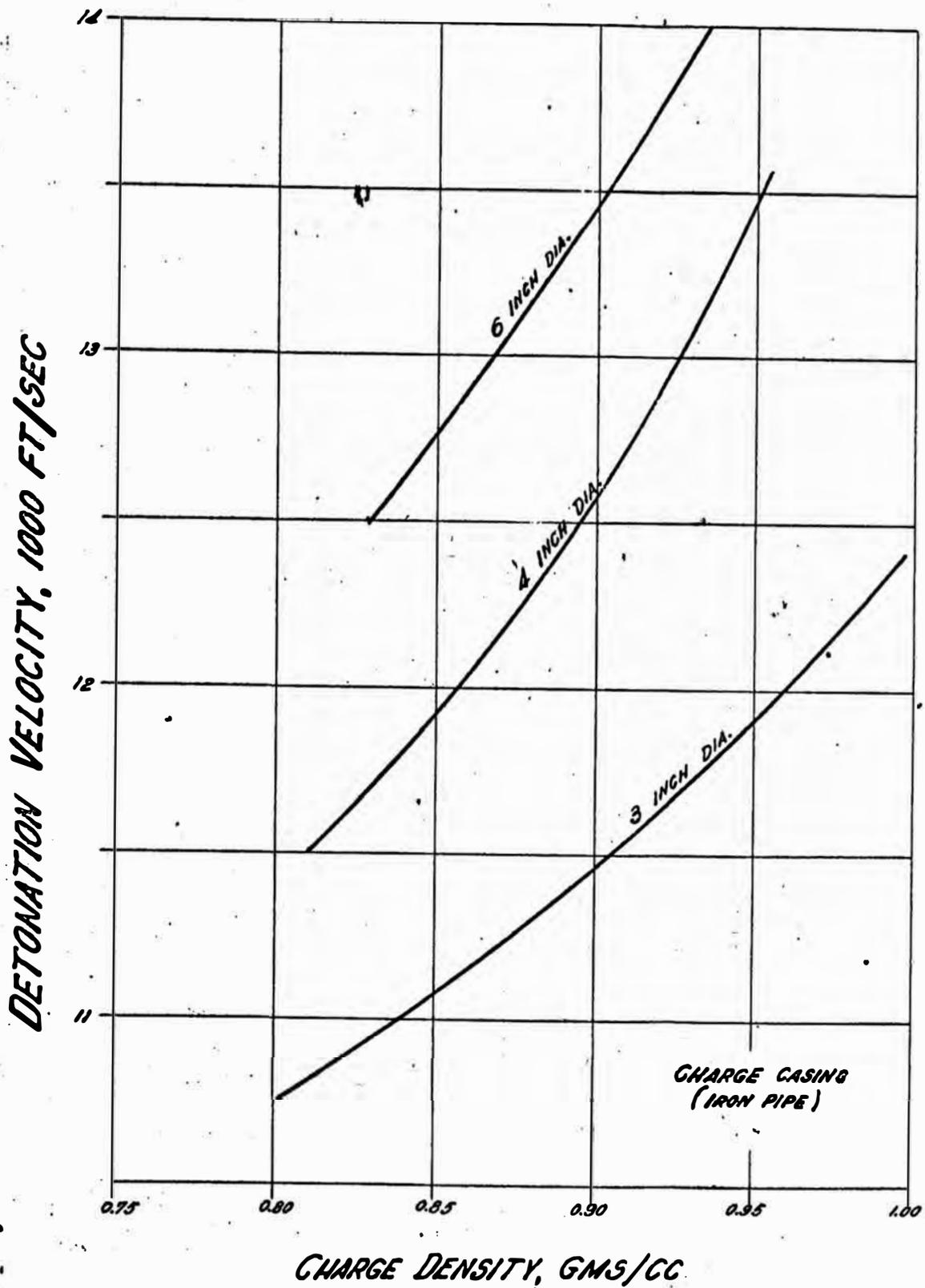


GRAFICOS DE ANFO



**FIG. No 2**

**INFLUENCE OF CHARGE DIAM. ON  
DETONATION VELOCITY**



CHARGE CASING  
(IRON PIPE)

**FIG. No 3**  
**INFLUENCE OF CHARGE DENSITY ON**  
**DETONATION VELOCITY**

DETONATION VELOCITY, 1000 FT/SEC

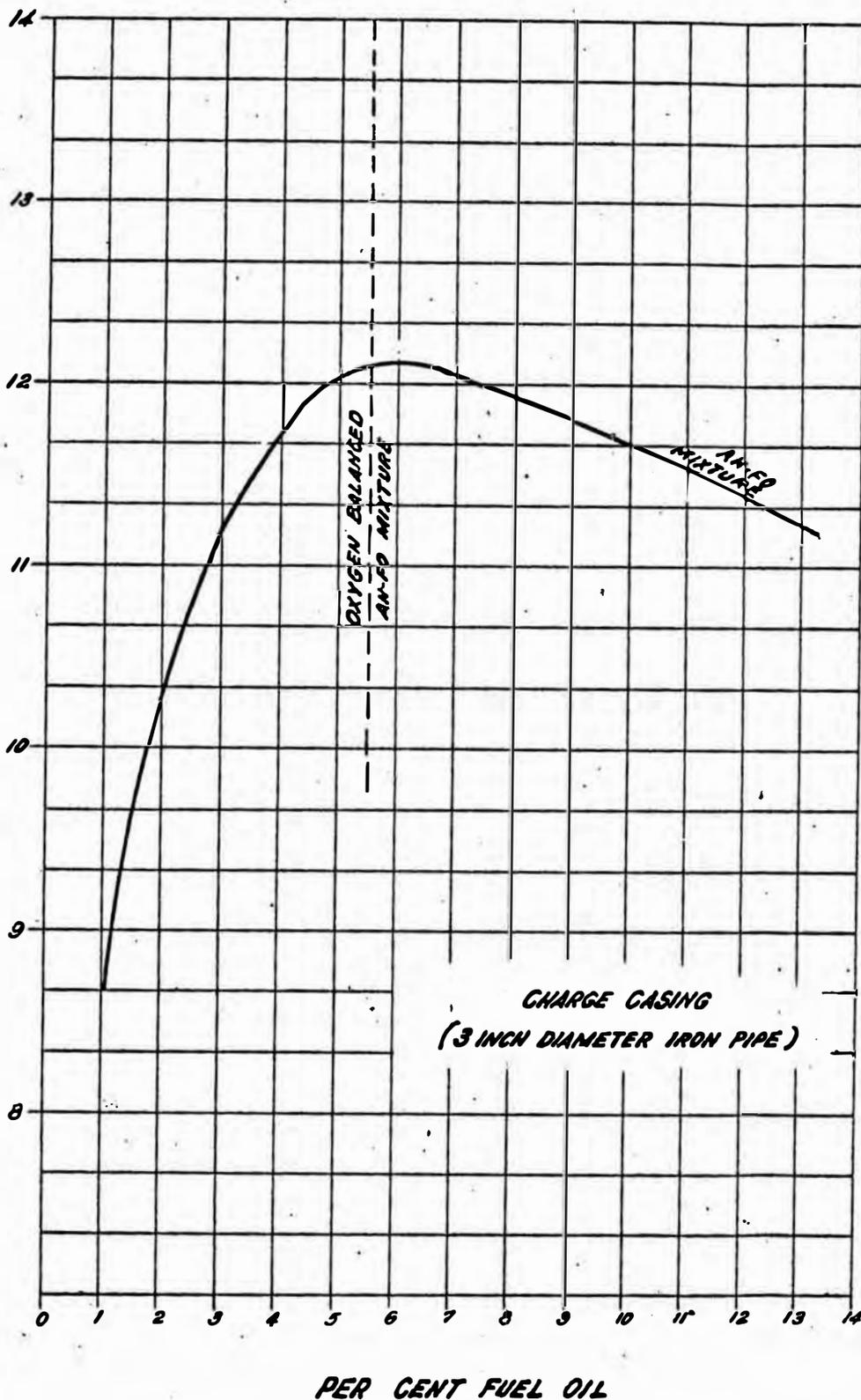
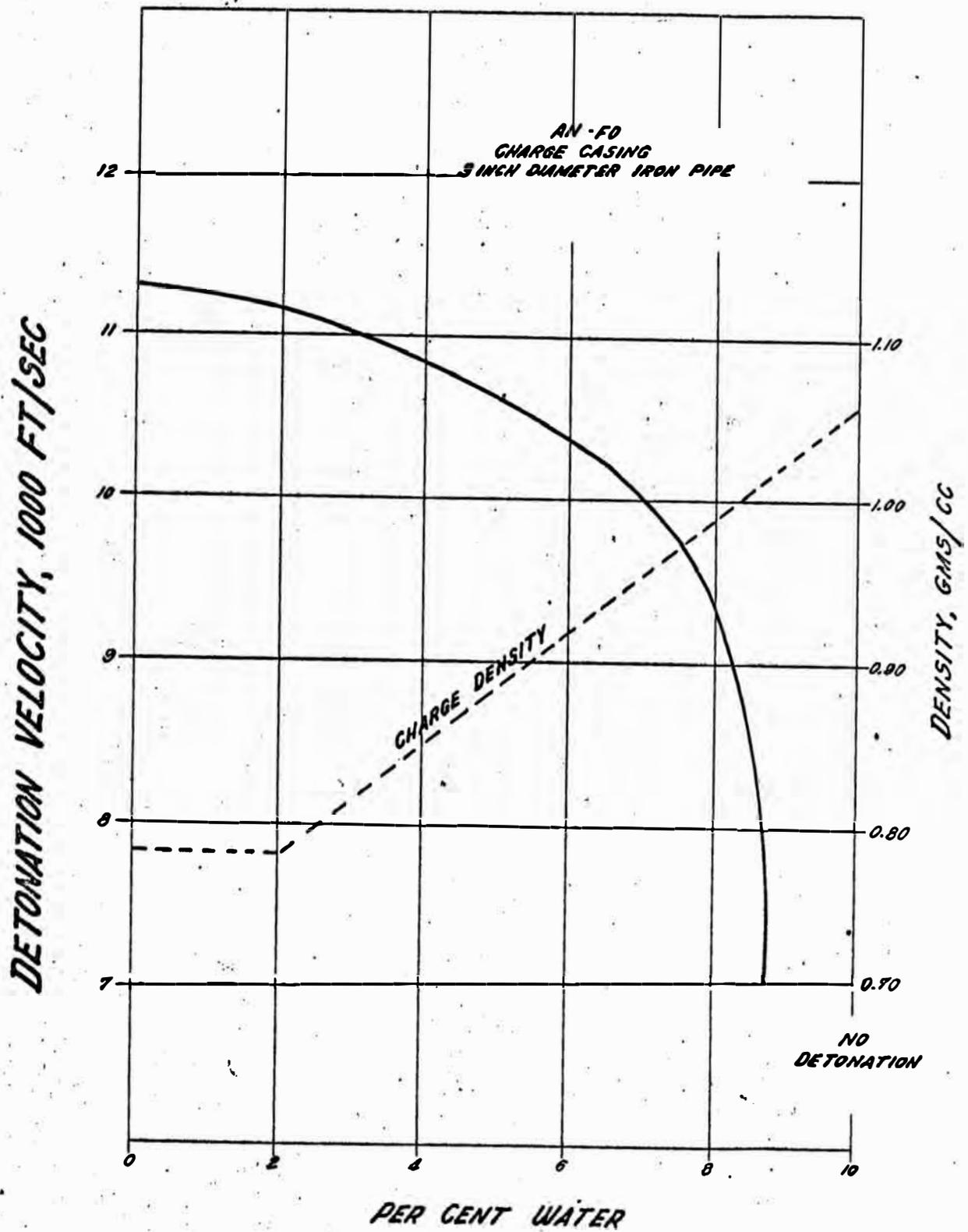


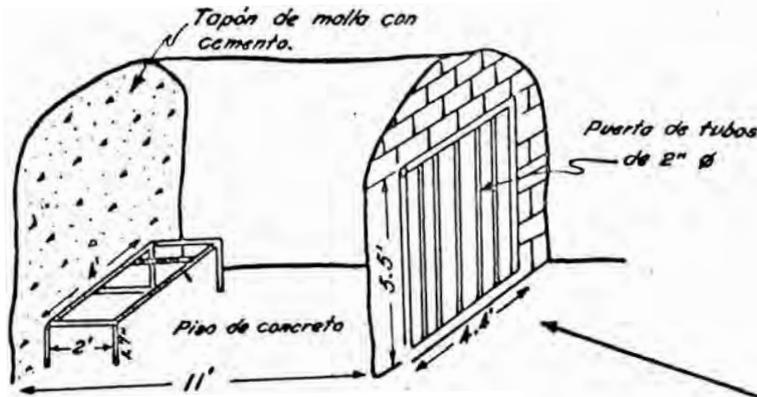
FIG. No 4.  
INFLUENCE OF OIL CONTENT ON  
DETONATION VELOCITY



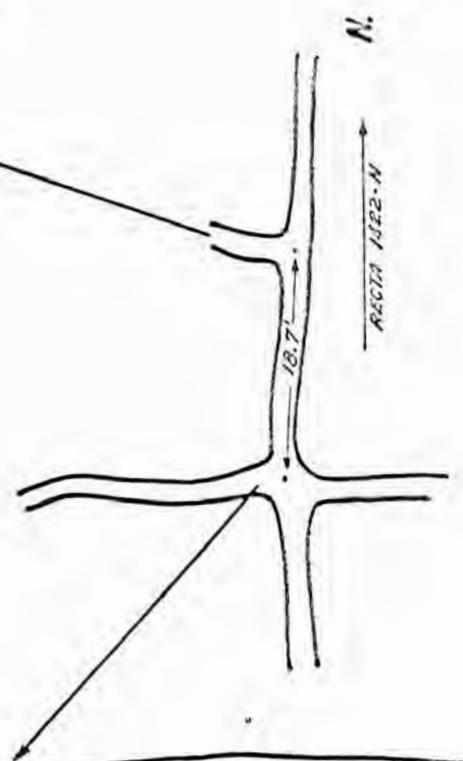
**FIG. No 5**

**EFFECT OF WATER CONTENT ON  
DETONATION VELOCITY**

# Croquis del Polvorin de AN-FO y Petzoleo Nivel 1.400 Mina Cerro



Bodega de Petzoleo



## Polvorin de AN-FO

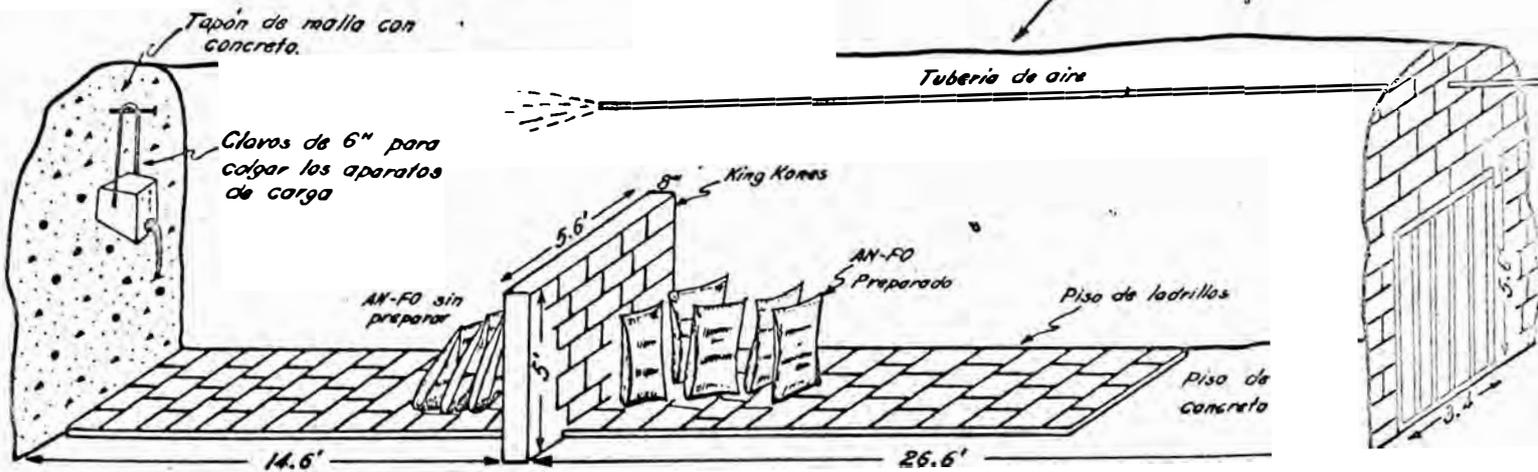


Figure No. 7

Tesis "AREQUIPA"

Peral 117