

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA ELABORACION DE EMULSION GASIFICADA PARA LA INDUSTRIA MINERA”

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

NOE FELIPE ALCO CER RAMOS

LIMA – PERÚ

2013

A mi familia, amigos,
profesores y compañeros, por su
comprensión y apoyo constante en mi
formación profesional.

RESUMEN

La industria de los explosivos, ofrece una gran variedad de productos a la minería. Al momento de llevar a cabo la voladura, ciertas voladuras presentan humos de color naranja, que son un indicativo de gases NO_x, que son tóxicos, generando un problema ambiental.

La emulsión gasificada, es un explosivo más sensible que el heavy ANFO usado en la minería; debido a su sensibilidad y menor densidad. En el presente trabajo se describe a los explosivos, así como sus propiedades; y en especial a la emulsión como un sistema que presenta grandes ventajas en la minería, esto debido a la presencia de agua, teniendo la emulsión una gran resistencia al agua, respecto a otros explosivos (dinamita). Los emulsificantes, son de gran importancia en el proceso de elaboración de la emulsión, ya que son los encargados de unir la fase combustible y la fase oxidante. También cabe resaltar la importancia del aditivo gasificar la emulsión, ya que acorde a su concentración y la cantidad que se adiciona, se llega a una densidad que es definida acorde a la operación en mina.

El balance de oxígeno es también, un factor de importancia en la generación de los humos naranjas, sin embargo se puede ver que tanto el heavy ANFO y la emulsión presentan balance de oxígeno negativo, lo que indicaría que no se debería generar humos naranjas en ninguno de los dos casos.

La emulsión gasificada al ser más sensible, es un explosivo que detona en su totalidad, antes que otros factores intervengan para la generación de humos naranjas.

INDICE

I. INTRODUCCION	6
II. EXPLOSIVOS	8
2.1. Bases de los Explosivos	8
2.1.1. Explosivos Químicos	9
2.2. Deflagración	10
2.3. Detonación	10
2.3.1. Teoría Simple de la Detonación	12
2.4. Teoría de la Iniciación	15
2.4.1. Puntos Calientes (Hot Spots)	16
2.5. Emulsión	18
2.5.1. Emulsión Explosiva	18
2.5.2. Emulsificantes	20
2.5.3. Viscosidad	22
2.5.4. Tamaño de la Partícula	24
2.5.5. Características de la Emulsión	25
2.6. Productos de Detonación	29
2.7. Cálculo de Balance de Oxígeno	30
2.8. Mezclas de ANFO/Emulsión (Heavy ANFO)	32
2.9. Emulsión Gasificada	33
III. EXPERIMENTAL	35
3.1. Emulsión Gasificada	35
3.2. Preparación de la Emulsión Gasificada	35
3.3. Gasificación	36
3.4. Características de la Emulsión	37
3.5. Termoquímica de la Emulsión Gasificada y del Heavy ANFO	40
3.6. Análisis de Humos Naranjas	43
IV. CONCLUSIONES	45
V. RECOMENDACIONES	46

VI.	BIBLIOGRAFIA	47
VII.	ANEXOS	48

I. INTRODUCCION

El auge de la industria minera en el Perú en estos últimos años, ha conllevado a un auge económico en el país. La gran minería, mediana y pequeña minería contribuyen a que esto sea posible. Sin embargo es de resaltar que la minería debe de cumplir estándares ambientales que la ley menciona.

Una de las fases más importantes de la minería, es el proceso de extracción del mineral. De esta etapa mencionada, depende una de las etapas más importantes en cuanto al consumo de energía, como es el proceso de molienda (en este proceso se consume una gran cantidad de energía). Es importante por ello, el uso de explosivos que brinden una granulometría ideal y que les permita operar bajos los estándares ambientales.

Dentro de la industria de los explosivos, un explosivo común dentro de la minería a tajo abierto es el Heavy ANFO, que es una mezcla de ANFO (nitrato de amonio con diesel) y emulsión, que se bombea al interior de los taladros. El uso de esta mezcla dentro de la minería, se debe a que ciertos terrenos donde está presente la minería, presentan agua. La mezcla de ambos componentes es en diferentes proporciones, que se determinan acorde a la optimización de la propia mina en la voladura.

El uso del heavy ANFO como explosivo, brinda a la industria minera ventajas, como son un costo bajo de este producto, y una eficiencia en la voladura. Sin embargo, en algunas voladuras, se nota presencia de humos (gases) de una coloración naranja.

Esta presencia de humos naranjas, es un síntoma de producción de óxidos nitrosos (NOx). Esta presencia de humos, puede indicar que dentro de la

malla de voladura, algunos taladros no han llegado a detonar o no han detonado en su totalidad, causando su deflagración.

Los óxidos nitrosos son ligeramente tóxicos, y en parte contribuyen al efecto invernadero. Siendo una de las probables causas el fallo en la detonación, se debe de buscar opciones que puedan dar una solución a este evento. Un probable explosivo que pueda brindar una solución a esta problemática, es un explosivo más sensible.

La emulsión gasificada es un explosivo que brinda una solución a esta generación de humos naranjas. Esta emulsión gasificada, se sensibiliza al añadirle una solución gasificante (nitrito de sodio), al combinarse ambos componentes se genera dentro de la emulsión espacios (esferas) que contienen gas nitrógeno (N_2); siendo este gas presente en el interior de la emulsión el que ocasiona la variación de densidad, haciendo más sensible a este explosivo.

La emulsión gasificada, es una emulsión que presenta una química compleja dentro de la generación del N_2 , y son los componentes de esta, los que determinan la performance de la emulsión.

Esta emulsión representa ser una buena alternativa, ante otros explosivos, por sus características. Aumentando una alternativa al mercado de explosivos para el uso en la minería. Y su uso depende del análisis de costo-beneficio de la minera.

II. EXPLOSIVOS

2.1. Bases de los Explosivos

Una explosión es definida como una expansión violenta de un gas que usualmente genera calor, sonido y una onda de presión. Estos pueden ser convenientemente separados en tres distintas categorías.

Explosiones físicas, estas son las más comunes en la naturaleza. Las presiones de la explosión no generan calor, pero si grandes cantidades de gas. Una explosión de un balón es un ejemplo común. Las explosiones físicas pueden ser mucho más violentas que esto, un volcán es un ejemplo de una enorme presión de explosión.

Explosiones nucleares pueden ocurrir naturalmente, el sol es un primer ejemplo de una fusión nuclear. Resultando en la liberación de inmensas cantidades de calor, pero no de gas. Una explosión nuclear es la más energética tipo de explosión.

Explosiones químicas son el resultado de una rápida reacción química que libera grandes cantidades de calor y gas. Los explosivos químicos son los tipos más importantes en la industria de explosivos.

Un explosivo es un material, con elementos oxidantes y combustibles, que es capaz de experimentar excepcionalmente una reacción rápida sin la participación de reactantes externos. En general, los explosivos tienen tres características básicas:

1. Son compuestos químicos o mezclas iniciadas por calor, choque, impacto, fricción o una combinación de estos.
2. En la ignición, estos se descomponen muy rápidamente (detonación y deflagración)
3. En la detonación, es una rápida liberación de calor y gas, que se expande rápidamente, usualmente con suficiente fuerza para superar el confinamiento.

Una reacción química involucra la conversión de reactantes a productos. Para que esto ocurra, sin involucrar una significativa energía de entrada, los reactantes deberían tener una gran energía interna que los productos. Energía es requerida para producir actividad en las moléculas e iniciar la ruptura de los enlaces en la molécula. La formación de los productos resulta en una liberación de energía, que, en su conjunto, produce una reacción exotérmica. Después de la iniciación, las reacciones implicadas en el proceso de combustión y detonación son siempre exotérmicas, y por lo tanto siempre liberan energía.

2.1.1. Explosivos Químicos

Los explosivos químicos contienen componentes oxidantes y combustibles.

Un compuesto explosivo tiene ambos componentes, el combustible y el oxidante, que reaccionan para formar los productos. A fin de que se lleve a cabo una reacción rápida, el combustible y el oxidante deben estar mezclados íntimamente. Cuanto menor sea el tamaño de los sólidos la reacción puede ocurrir más rápida. Un ejemplo de un compuesto explosivo es el nitrato de amonio con combustible (ANFO). Este comprende

granos sólidos de nitrato de amonio, el oxidante, rodeado por aceite, el combustible. Cuanto menor sea el tamaño del nitrato de amonio prill, la reacción puede ocurrir más rápida. Este es un efecto, debido al área superficial, cuanto más pequeño es el tamaño de las partículas mayor es el área superficial. Los compuestos explosivos son comúnmente usados en la industria comercial de voladura.

2.2. Deflagración

Una deflagración (llama), es una onda lenta (subsónica) donde los procesos de transporte como la viscosidad, conducción de calor y la difusión de la materia son los dominantes. Los cambios en el impulso y la energía cinética son pequeños y el cambio de presión a través de la onda, aproximadamente, se pueden despreciar.

Las reacciones de quemado son reacciones de superficie y como tal, la llama se extiende sobre la superficie más rápida que a través del cuerpo principal.

2.3. Detonación

Una detonación ocurre a velocidades supersónicas, 2000 a 8000 ms^{-1} en sólidos y líquidos. El transporte de propiedades, que eran importantes para la combustión, se vuelve poco importante en la detonación. Los cambios en el impulso y la energía cinética son dominantes, con propiedades importantes como la compresibilidad e inercia. El elemento principal de una onda de choque es un frente de choque, y la temperatura y presión alta producidas por este frente de choque es mantenida por un confinamiento inercial. Es decir, las capas exteriores del material

no son apreciablemente desplazadas antes que la reacción en el centro finalice.

El proceso en el que un explosivo va de un estado de no perturbación a una explosión se describe como el proceso de detonación. El proceso de detonación se puede explicar por la Teoría de la Detonación, que es basada en un estudio de la propagación de choque a través de materiales inertes.

Una región de onda de choque de muy alta presión que pasa a través de un material a la velocidad local del sonido para ese material. Una característica importante es que la velocidad local del sonido es la velocidad del sonido en el frente de impacto, donde el material está bajo alta presión. Una representación de una onda de choque en un material explosivo se muestra en la Figura 1. Este muestra el choque incidente en el material e inmediatamente como se ejerce una presión máxima, que se refiere al pico de Von Neumann. Después que el frente de choque ha pasado, la presión se reduce en una forma exponencial.

En una explosión, la onda de choque y la zona de reacción se denominan frente de detonación. La onda de choque comprime al explosivo, que rompe los enlaces químicos, causando la reacción química. Esta reacción química añade en forma continua energía a la onda de choque, que así como en la conducción delantera del frente de choque, se pierde también lateralmente. Esto se debe a que onda de detonación se expande hacia los lados así como hacia delante a través de la columna. Si más energía es agregada al frente de choque, por la reacción química, es pérdida lateralmente, la velocidad al frente aumenta.

Este proceso continua hasta que la energía agregada, al frente de detonación, iguala a las pérdidas laterales debido a la expansión y el flujo de calor. Una vez que lo anterior ha ocurrido, y las pérdidas del sistema es igual a la energía añadida, la velocidad de detonación en estado estacionario es lograda.

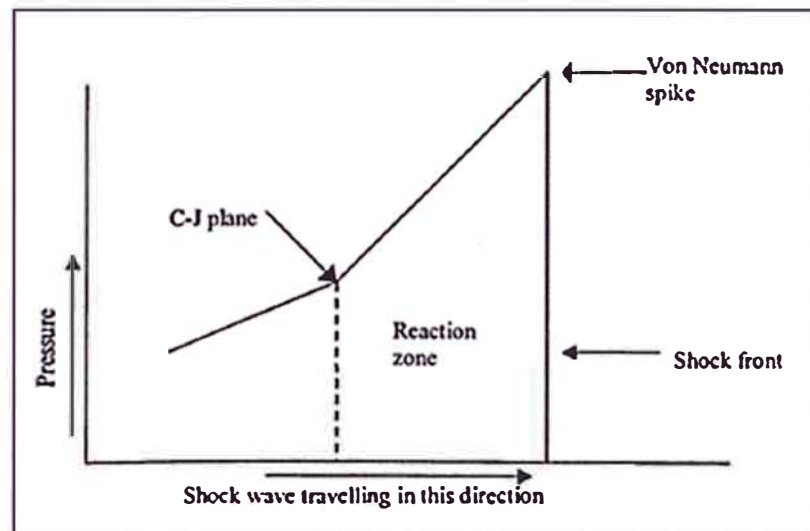


Fig. 1 Estructura de la onda de choque

2.3.1. Teoría Simple de la Detonación

El análisis de la detonación se lleva a cabo a través de la Teoría Chapman-Jouguet. En la teoría Chapman-Jouguet (CJ), el proceso de detonación es tratado como una onda unidimensional de espesores infinitesimales, sin masa, momento o pérdidas de energía, en un fluido no viscoso, esto se hace por simplicidad matemática. El proceso de detonación es mostrado esquemáticamente en la Figura 2.

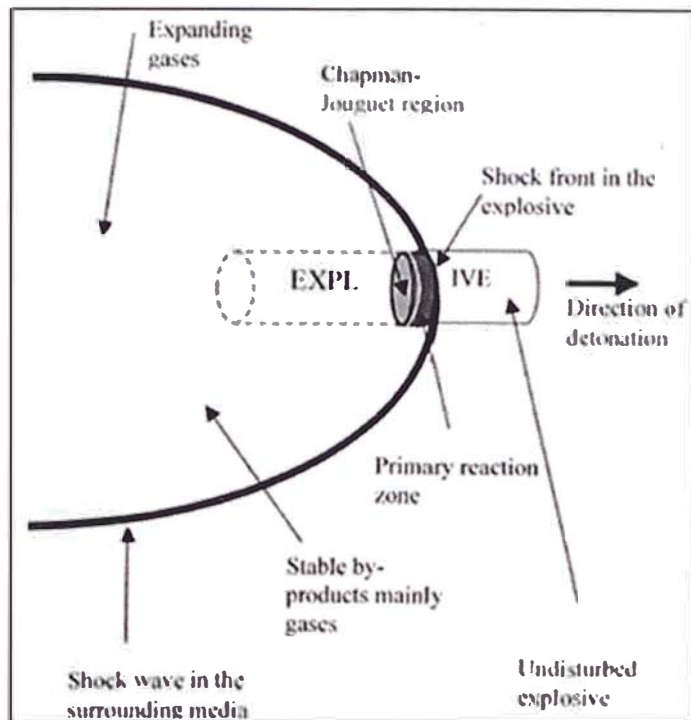


Fig. 2 Esquema del proceso de detonación en un explosivo

Se puede observar, a partir de la figura 2, que la región CJ descrita por las ecuaciones de la conservación, está en el plano final de la zona de reacción. Esto es un punto después que la onda de choque ha pasado a través del material y que las reacciones iniciales están completas, aunque los gases producidos aún no se han expandido y las reacciones con el oxígeno del aire aun no tienen lugar.

La teoría de la detonación ha tenido un significativo avance desde los 1900's, pero la teoría de Chapman-Jouguet continua siendo usada como base para la interpretación moderna. En los 1940's Zeldovich, VonNeumann y Doering independientemente desarrollaron un modelo que describe el proceso de detonación. Este se conoce como la teoría del modelo ZND. Este modelo hace algunas asunciones con el fin de simplificar las matemáticas del sistema.

1. El fluido es unidimensional (no hay pérdidas laterales).
2. El frente de detonación es una discontinuidad de salto (ocurre instantáneamente).
3. Los gases productos de la reacción que salen del frente de la detonación están en equilibrio termodinámico y químico y la reacción es completa (el explosivo es consumido y toda la energía es liberada).
4. La longitud de la zona de reacción química es cero. Un típico explosivo alto tiene una zona de reacción cerca de 1 mm de espesor. Para explosivos menos sensibles, como el Amatol (mezcla de nitrato de amonio con TNT) esta puede ser 10 veces la longitud.
5. El VOD es constante; esto es a proceso de estado estacionario; los productos que salen de la detonación son los mismos independientes del tiempo.

Todas estas suposiciones son sabidas incorrectas, pero esto permite que las matemáticas sean manejables y los resultados obtenidos por este método son razonables acorde al experimento.

La teoría básica permite perfiles para la temperatura, presión y densidad que son determinados a través de la zona de reacción y la figura 3 muestra estas variaciones a través de la zona de reacción.

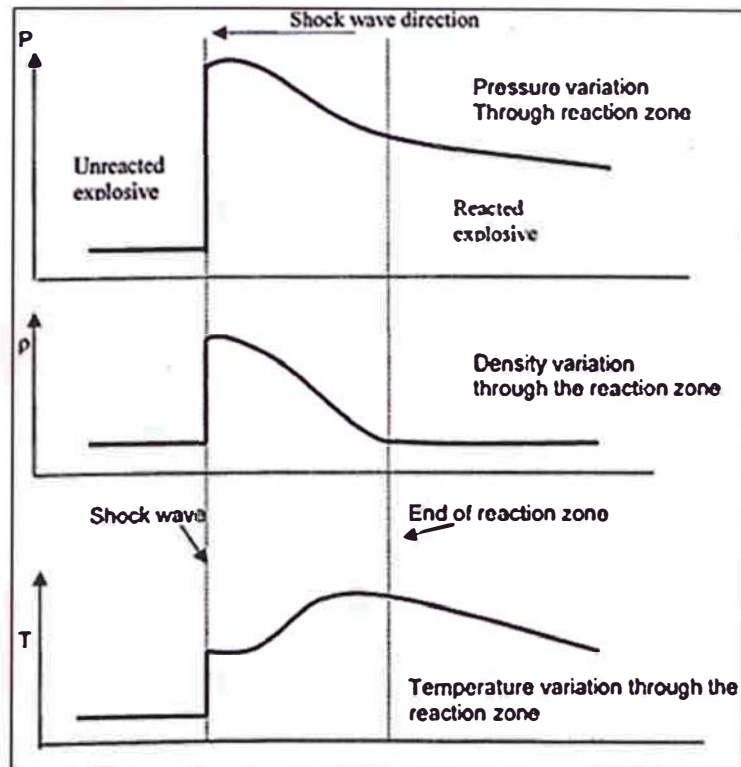


Fig. 3 Variación de presión, densidad y temperatura a través de la onda de detonación

Esto muestra que la presión y densidad llegan a un máximo instantáneo en el frente de choque, que luego cae a través de la zona de reacción. Considerando que la temperatura sigue aumentando a lo largo de la zona de reacción, como consecuencia de las reacciones secundarias.

2.4. Teoría de la Iniciación

Un explosivo puede ser iniciado por diferentes formas de transmisión de energía. Estos pueden ser: fricción, choque, eléctrico o térmico.

Independientemente de la forma que la energía es suministrada a un explosivo para causar la iniciación, una vez que la energía de

activación para el mecanismo es excedido, el proceso de detonación comenzara. Un explosivo puede ser iniciado por la aplicación de un choque de mayor energía que su energía de activación crítica. Por debajo de esta energía crítica, la reacción no generara suficiente energía para mantenerse. Esto no quiere decir que la reacción no se produzca, pero que la reacción se “desvanece”. Si el explosivo contiene agentes sensibilizantes, tales como granos o burbujas entonces la presión de choque mínima requerida para la iniciación se reduce en aproximadamente un orden de magnitud. Los huecos en el explosivo causa irregularidades en el flujo de masa cuando impacta y el explosivo es iniciado por puntos calientes formados en estas irregularidades. El mecanismo de punto caliente es importante en la propagación y en el fracaso de la onda de detonación.

2.4.1. Puntos Calientes (Hot Spots)

Los puntos calientes han sido bien caracterizados por pequeñas áreas donde el calor es generado cuando un explosivo es sometido a una variedad de estímulos. A pesar que son grandes, comparados con dimensiones moleculares, esto son pequeños, dentro del rango de 10^{-5} a 10^{-3} cm^3 , en comparación con las dimensiones físicas de la carga. Los estímulos, que pueden producir puntos calientes en los explosivos, son:

- Compresión adiabática de pequeñas burbujas de gas atrapadas.
- Puntos calientes friccionados
 1. Fricción inter-cristalina.
 2. Partículas de arena.
 3. Superficies de confinamiento.

- Calentamiento de un explosivo viscoso que fluye rápidamente.
- Ruptura de cristales.

Para las emulsiones explosivas, la principal área de interés es la compresión adiabática de las burbujas de gas. Cuando ocurre una reacción adiabática no hay transferencia de calor dentro o fuera del sistema, todo el trabajo suministrado se convierte en calor del punto caliente. Una emulsión explosiva usualmente tiene micro balones o burbujas de gas agregadas para incrementar la fuente de puntos calientes. Los micro balones (#M) son balones de vidrio con un diámetro promedio de 60 μm ; se llenan a 0.2 bar con dióxido de azufre y oxígeno molecular.

La iniciación de la explosión, cuando pequeñas burbujas son atrapadas en el líquido, se debe a la compresión adiabática de las burbujas. Para un gas ideal la temperatura dentro de la burbuja (T_2 grados absolutos) depende de la relación de compresión dada por:

Determinación de la temperatura para la relación de compresión de puntos calientes:

$$T_2 = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

P_1 = Presión inicial en la burbuja de gas

P_2 = Presión final en la burbuja de gas

γ = Relación de calores específicos (C_p/C_v) (y tiene valores aceptados entre 1.4 para aire y 1.29 para dióxido de azufre)

T_1 = Temperatura inicial

T_2 = Temperatura final

La presión inicial es generalmente la presión atmosférica pero en microbalones se llenan a una presión reducida de 0.2 bar. Cuanto mayor sea la presión inicial de la burbuja más baja es la temperatura obtenida por el punto caliente. Al tener, los microbalones a una presión de 0.2 bar el diferencial de presión es mayor y por lo tanto la temperatura obtenida será mayor. Esto proporciona un medio para determinar la temperatura.

2.5. Emulsión

2.5.1. Emulsión Explosiva

Una emulsión explosiva es una dispersión termodinámicamente inestable de dos o más líquidos inmiscibles o parcialmente miscibles. Para que este sistema se estabilice requiere de un agente emulsificante. Los diámetros de las gotas líquidas que se encuentran dispersas se encuentran en el rango de 2 y 20 μm . Una emulsión explosiva está compuesta de dos fases: fase oxidante (dispersa), y la fase combustible (continua). La fase oxidante, contiene sustancias como: nitrato de amonio, sodio, calcio, agua y otros aditivos; mientras que la fase combustible, contiene sustancias como: petróleo, aceites minerales, emulsificantes y otros aditivos. Otros ingredientes de en la emulsión explosiva son el aluminio y modificadores de densidad (burbujas de vidrio, microesferas de cerámica, resinas fenólicas, gasificación, etc).

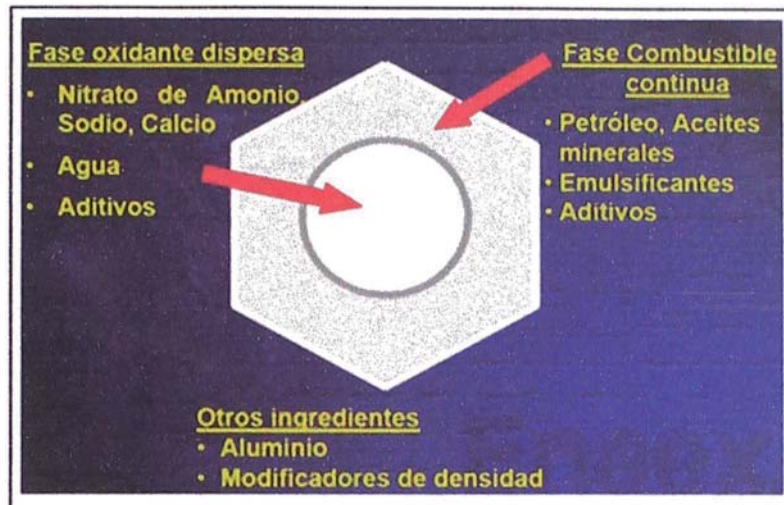


Fig. 4 Fases oxidante y combustible de una emulsión



Fig. 5 Diagrama de elaboración de emulsión explosiva

Se tiene dos tipos de emulsión, una emulsión a granel y una emulsión encartuchada. Ambos tipos difieren en sus propiedades y en su uso.

La emulsión tipo granel, se usa principalmente en la minería de tajo abierto. En este tipo de emulsiones a granel, se tiene uno que es para su uso en el Heavy ANFO, y otros que se usan como explosivo en sí mismo.

La emulsión encartuchada, se usa tanto en tajo abierto como en minería subterránea, siendo la presentación de este en cartuchos de diferentes diámetros y longitud.

2.5.2. Emulsificantes

En una emulsión, para dispersar las gotitas de la fase continua, es necesario el hacer uso de un emulsificante. La adición de un emulsificante permite al sistema inestable termodinámicamente lograr un grado de estabilidad, por la separación de las dos fases. El agente emulsificante minimiza la tendencia de los glóbulos a coalescer, o unirse para formar un glóbulo mayor, que eventualmente llevaría a la separación de las dos soluciones. La estabilidad de una emulsión depende de las propiedades del emulsificante y la película que se forme en la interfaz entre las dos fases. La película en la interfaz debe ser dura y elástica y debe de formarse rápidamente en la preparación.

Los agentes emulsificantes de superficie activa son los principales emulsificantes que se usan en la industria. Comúnmente los emulsificante son sustancias, que como los detergentes, tienen componentes hidrofóbicos e hidrofílicos. Una ilustración de una separación por un emulsificante se muestra en la fig. 6. El emulsificante que rodea la gota será a menudo más de una molécula, y con frecuencia son varias capas la que separan las dos fases.

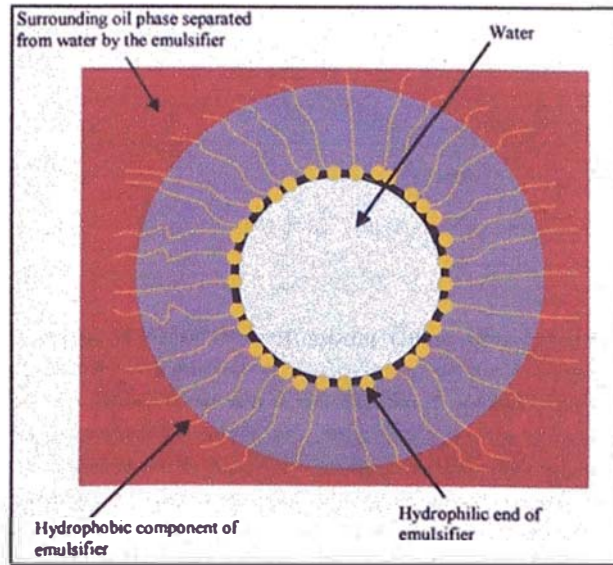


Fig. 6 Separación de un emulsificante

La elección del emulsificante depende del tipo de emulsión que se requiera, aceite en agua o agua en aceite, y de la solubilidad del emulsificante en cada fase. Como una regla general, la fase en el cual el tensoactivo es más soluble es la fase continua. El mecanismo exacto de la formulación de la emulsión y la elección del emulsificante es más un arte que una ciencia, que con los ensayos de prueba y error y la experiencia anterior se decide por el emulsificante.

Un emulsificante común en las emulsiones explosivas, es el sorbitan monooleato. La estructura de este es mostrada:

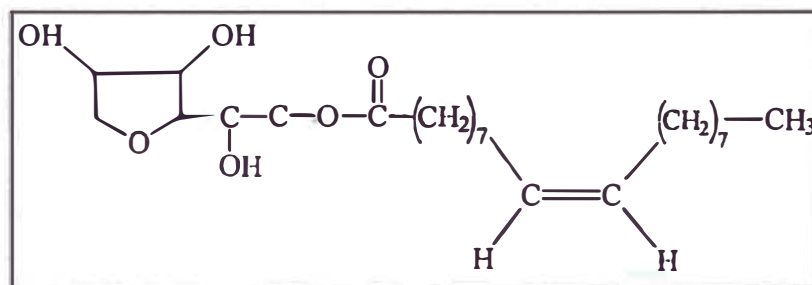


Fig. 7 Estructura de emulsificante (sorbitan monooleato)

2.5.3. Viscosidad

La viscosidad es una medida de la propiedad de fluir de un producto. Es la relación entre la fuerza de corte aplicada y la cantidad de deformación resultante. La deformación de un fluido es expresada como una tasa de corte. Por lo tanto, la viscosidad es la relación entre la fuerza de corte y la velocidad de corte. El concepto de viscosidad viene del postulado de Newton (1690's) que, la fuerza de corte σ es proporcional a la gradiente de velocidad o tasa de corte $\dot{\gamma}$, a través de la ecuación; Fuerza de Corte:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

Donde:

η : viscosidad de corte

En los casos simples, como agua o soluciones acuosas, la fuerza de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. La constante de proporcionalidad es llamada coeficiente de viscosidad. Los fluidos donde esta proporcione s directa son llamados fluidos Newtonianos. Para fluidos Newtonianos η es independiente de $\dot{\gamma}$ y además no cambia con respecto a $\dot{\gamma}$. Para fluidos Newtonianos η es usualmente llamado viscosidad.

Tabla 1. Viscosidad de diferentes fluidos

Fluido	Viscosidad (Pa.s)
Vidrio	10^{40}
Vidrio fundido (500°C)	10^{12}
Asfalto	10^8
Polímeros fundidos	10^3
Jarabe espeso	10^2
Miel	10^1
Glicerina	10^0
Aceite de oliva	10^{-1}
Aceite ligero	10^{-2}
Agua	10^{-3}
Aire	10^{-5}

Valores a T = 25°C y P = 1 atm

Hay muchos tipos de fluidos no-Newtonianos, cada uno tiene distintas propiedades. La medición de estas viscosidades es más complicada, ya que se requiere de la función adicional del tiempo. El comportamiento de la viscosidad, cuando la fuerza es aplicada, a través del tiempo, determina el tipo de fluido no-Newtoniano. En emulsiones es común que la viscosidad aparente bajar con el aumento del corte.

La viscosidad de las emulsiones varía de acuerdo a la composición, asimismo si es una emulsión de tipo granel o encartuchada. Para las emulsiones a granel es común viscosidades que van de 20 000 cP a 60 000 cP en una temperatura cercana a los 80°C; mientras que en las emulsiones encartuchadas esta viscosidad es superior (mayor a 120 000 cP).

2.5.4. Tamaño de Partícula

Un importante parámetro para las emulsiones es el tamaño de gota, que tiene injerencia en las propiedades físicas de la emulsión. Hay diferentes formas para determinar el tamaño de partícula, sin embargo el tamaño de partícula de las emulsiones no es una ciencia exacta, en el proceso se acumulan errores, pero estos pueden ser minimizados por una cuidadosa selección de los métodos y las buenas prácticas.

El método más común, para el análisis de tamaño de partícula involucra el uso del microscopio. Muestras de emulsión son puestas en el portaobjetos del microscopio y una foto digital es tomada. Esta es convertida por computadora a una imagen blanca y negra, que permite conocer el tamaño de la gota. Un histograma reporta el tamaño de las gotas y el número de gotas. Mientras más grande sea el tamaño de la muestra, se incrementara la precisión de este método.

Una técnica alternativa para la caracterización del tamaño de partícula es la cromatografía hidrodinámica. La cromatografía hidrodinámica está emergiendo, en los últimos 20 años, como un método para el análisis del tamaño de partícula. Muestras son aisladas en un solvente y es pasada a través de una columna empacada con pequeñas perlas porosas. El líquido de transporte es inerte a las partículas y las camas son empacadas en largas columnas, usualmente sin revestimiento inmovilizado. La separación depende del flujo hidrodinámico del fluido que fluye en el régimen Poiseuille. Esto significa que las partículas grandes se mueven rápidamente con el fluido inerte y las partículas pequeñas se mueven a velocidades lentas. La

turbulencia generada alrededor de las camas causa que las partículas más pequeñas tomen un camino más largo y por lo tanto pasar más lentamente por la columna. Tamaños mixtos de partículas introducidas por la parte superior de la columna se separan según su tamaño. Las partículas grandes emergen primero, seguido en orden por partículas intermedias y las más pequeñas.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de gota de las emulsiones es de 2 a 20 μm ; sin embargo es común encontrar valores entre 4 a 10 μm .

2.5.5. Características de la emulsión

Las emulsiones presentan ciertas características como son:

- Potencia explosiva.
- Poder rompedor.
- Velocidad de detonación (VOD).
- Densidad.
- Resistencia al agua.
- Humos.
- Balance de oxígeno.

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

se emplean con mayor frecuencia: Péndulo balístico, energía relativa por unidad de peso y de volumen.

El método del péndulo balístico (figura 8), mide la potencia de un explosivo en tanto por ciento relativo a la goma pura, se toma como base asignándole un valor de 100%. Para medir la Energía Relativa por unidad de peso y de volumen se utilizan explosivos que son insensibles al detonador, es decir, que necesitan de iniciadores de alto poder explosivo. La potencia se define por:

AWS: Energía absoluta por unidad de peso (cal/g)

ABS: Energía absoluta por unidad de volumen (cal/cm³)

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

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

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

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

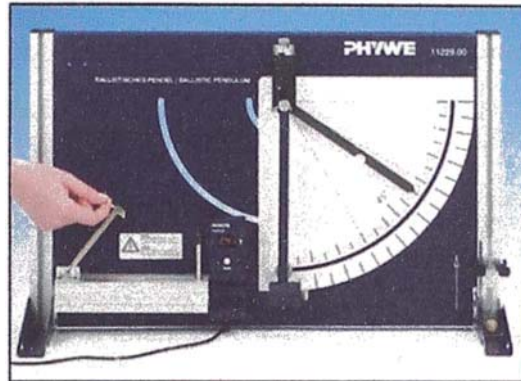


Fig. 8 Péndulo balístico

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

Para esta prueba se usa una cantidad de material explosivo (100 gramos en forma usual, o una referencia que se desee establecer para hacer las comparaciones).

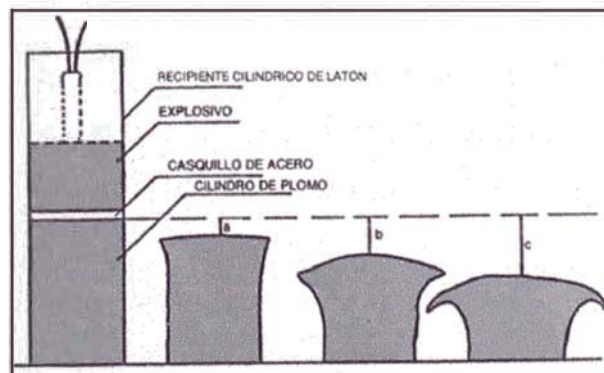


Fig. 9 Poder rompedor (Método hess)

Velocidad de detonación (VOD): También conocida como velocidad explosiva, es la velocidad a la que el frente de onda de choque viaja a través de un explosivo en detonación.¹ Las

velocidades de detonación son siempre mayores que la velocidad local del sonido en ese medio material.

La velocidad de detonación es proporcional a la potencia cedida por la detonación del explosivo, por tanto a mayor velocidad, mayor será también la energía cedida por unidad de tiempo, que radica en la onda de choque y en la elevación de la temperatura y presión de los gases.

Densidad: La densidad de la emulsión explosiva es un factor importante, ya que nos da la idea del performance del explosivo.

Resistencia al agua: Las emulsiones son muy buena en terrenos que presentan agua, razón a ello su gran uso en la industria minera (se hace mezclas con el ANFO).

Humos: El conjunto de productos gaseosos resultantes de la reacción de detonación del explosivo se denomina humos, podemos citar algunos de ellos: vapores nitrosos (NOx), vapor de agua, monóxido de carbono (CO), anhídrido carbónico (CO₂) y otros gases producto de reacciones de detonación.

Balance de oxígeno: El balance de oxígeno (OB o OB%) mide la existencia de la cantidad de oxígeno necesaria para conseguir una oxidación completa de los productos de reacción. Una sustancia, o mezcla de sustancias, con un balance de oxígeno equilibrado puede realizar la oxidación completa de forma autónoma; es decir: si se calienta en un recipiente sellado sin suministro externo de oxígeno quedan productos completamente oxidados, completamente quemados, sin restos

de agente oxidante. Si queda oxígeno sin reaccionar se considera que hay un exceso de oxígeno y si quedan sustancias sin reaccionar o parcialmente oxidadas hay un defecto de oxígeno.

Valores conocidos de balance de oxígeno son:

Nitrato de amonio	B.O. +20
Nitroglicerina	B.O. +3.5
Trinitrotolueno	B.O. -74

Cabe mencionar, lo siguiente:

- Explosivos con deficiencia de oxígeno favorecen la formación de monóxido de carbono (CO).
- Explosivos con exceso de oxígeno favorecen la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x)

2.6. Productos de Detonación

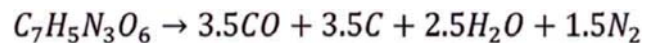
Los productos de detonación de los explosivos, son principalmente gases, siendo los más representativos: el oxígeno (O₂), el nitrógeno (N₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos nitrosos (NO_x), y otros más dependiendo de la composición del explosivo.

Existen reglas para poder determinar los productos de detonación de los explosivos, ejemplo son: la regla de Kistiakowsky-Wilson, regla modificada de Kistiakowsky-Wilson, regla de Springall Roberts.

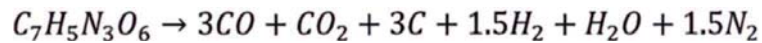
Cada regla mencionada anteriormente condiciones, la regla modificada de Kistiakowsky-Wilson se usa para explosivos que tienen un balance de oxígeno por debajo de -40.

Para el caso del trinitrotolueno ($C_7H_5N_3O_6$), este tiene un balance de oxígeno de -74. Se aplicará la regla modificada de Kistiakowsky-Wilson y la regla de Springall Roberts.

Regla de Kistiakowsky-Wilson:



Regla de Springall Roberts:

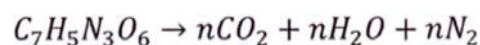


Como se puede observar, ambas reglas proveen diferentes respuestas para la descomposición del explosivo en productos, estas reglas se usan como una guía.

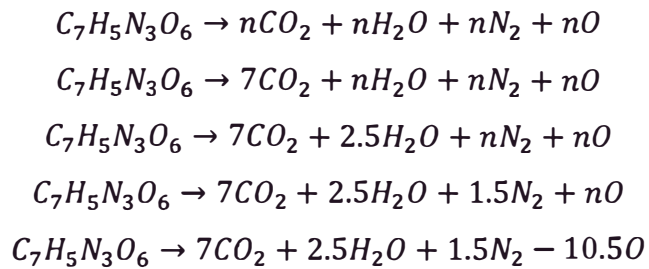
2.7. Cálculo de Balance de Oxígeno

Siendo el balance de oxígeno una de las principales características de los explosivos, su cálculo es importante.

Se usa el trinitrotolueno ($C_7H_5N_3O_6$), como ejemplo:



Esta ecuación necesita ser balanceada, y esta se hace introduciendo átomos de oxígeno, como se muestra a continuación:



El balance de la reacción de combustión para el trinitrotolueno ($C_7H_5N_3O_6$) es de signo negativo para el oxígeno. Esto indica que el trinitrotolueno es insuficiente de oxígeno en su molécula para la oxidación en forma de agua y dióxido de carbono.

Para el cálculo del balance de oxígeno, hacemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Peso molecular del trinitrotolueno} &= (7 \times 12) + (5 \times 1) + (3 \times 14) \\ &+ (6 \times 16) \end{aligned}$$

$$\text{Peso molecular del trinitrotolueno} = 227$$

El peso molecular total de los átomos de oxígeno en los productos, es de $= -10.5 \times 16 = -168$

$$\text{Monto de oxígeno liberado} = -168 / 227$$

$$\text{Monto de oxígeno liberado} = -74\%$$

Hay métodos alternativos para calcular el balance de oxígeno. Para calcular el balance de oxígeno (BO) de un explosivo de la forma $C_aH_bN_cO_d$ con un peso molecular MW.

$$BO = \frac{[d - (2a) - (b/2)] \times 1600}{MW}$$

Usando esta ecuación, el balance de oxígeno para el Ciclotrimetilentrinitramina, denotado como RDX ($C_3H_6N_6O_6$), se obtiene un balance de oxígeno de -21.61%.

Sin embargo esa ecuación que se usa, solo presenta átomos de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno. Cuando el explosivo tiene otros átomos, para calcular el balance de oxígeno de la sustancia de debe de hacer el cálculo a partir de sus productos que se formaran como parte del proceso de combustión. Se usa las reglas de los productos de detonación, incluyendo si hubiera algún otro átomo los compuestos a formarse, por ejemplo, si hubiera Aluminio (Al), se formaría Al_2O_3 , de haber Sodio (Na), se formaría Na_2O .

El balance de oxígeno es una de las principales características de los explosivos.

2.8. Mezclas de ANFO / Emulsión (Heavy ANFO)

El ANFO (Ammonium Nitrate - Fuel Oil) es una mezcla de gránulos porosos de nitrato de amonio y diésel, en una proporción de peso de aproximadamente 94/6, resultando una mezcla de óptima performance y mínima producción de gases tóxicos. Se caracteriza por su relativa baja potencia volumétrica y su nula resistencia al agua. Una forma de disminuir dichos efectos es mediante el agregado de emulsión al ANFO. Estas mezclas de ANFO y emulsión se suelen llamar Heavy ANFO.

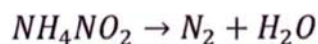
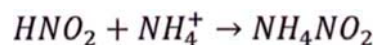
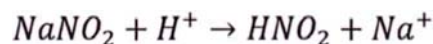
ANFOs con un 50% de emulsión en peso o más tienen una buena resistencia al agua, asimismo los ANFOs con 50% o más de emulsión son bombeables. El diámetro crítico de los ANFOs usados en la minería es del orden de los 150 mm.

La densidad de un heavy ANFO 50/50 (50% de ANFO y 50% de emulsión) es de 1.30 g/cc. Para un heavy ANFO 60/40 (60% de ANFO y 40% de emulsión) es de 1.23 g/cc

2.9. Emulsión Gasificada

La emulsión gasificada es una emulsión base al cual se adiciona un aditivo para generar en su interior puntos calientes (hot spot) que permiten a este explosivo ser sensible.

La reacción que se lleva a cabo entre la emulsión matriz base y el aditivo que sensibiliza la emulsión es:



Las reacciones que se llevan a cabo generan el N₂, que forman los puntos calientes (hot spot) para el explosivo, para la emulsión ya gasificada.

Es el nitrógeno que se forma dentro de la emulsión gasificada la que hace variar la densidad de la emulsión, siendo necesario también el medio ácido para que se pueda llevar a cabo la reacción.

III. EXPERIMENTAL

3.1. Emulsión Gasificada

La emulsión gasificada a la cual se hará referencia es una emulsión del tipo granel. Esta emulsión tiene como característica más importante, que se sensibiliza a través de un aditivo (esta sensibilización se hace en pequeño en laboratorio y en los taladros en la minería).

3.2. Preparación de la emulsión gasificada

La preparación de la emulsión gasificada requiere que se haga primeramente una emulsión matriz base, y posterior a ello se prepara la emulsión gasificada

La emulsión matriz base, se prepara en batch en un equipo emulsificador. Se prepara dos soluciones, una solución oxidante y una solución combustible.

La solución oxidante se lleva a una temperatura aproximada de 85°C, mientras que la solución combustible a una temperatura cercana a los 60°C. Se ingresa la solución oxidante al equipo emulsificador, y se enciende el agitador de éste, a una frecuencia que va de 10 a 15 herz. Se adiciona la solución oxidante dentro del equipo emulsificador (ya se está formando la emulsión), adicionada toda la solución oxidante, se incrementa la frecuencia del equipo emulsificador a 25 herz, y se mantiene esta frecuencia por un periodo de 15 minutos.

Una vez formada la emulsión, esta se retira del emulsificador, y se mide su densidad y viscosidad a una temperatura próxima a los 80°C, la emulsión se pone en un recipiente y se envía a enfriar a un baño.

Tabla 2. Composición solución oxidante

Componente	Composición (%)
Nitrato de amonio	60.0 - 70.0
Nitrato de sodio	10.0 - 15.0
Ácido	0.1 - 2.0
Agua	15.0 - 25.0

Tabla 3. Composición solución combustible

Componente	Composición (%)
Emulsificante	0.5 - 3.0
Aceite	3.0 - 8.0

3.3. Gasificación

Para la gasificación de la emulsión base, se hace uso de un aditivo (solución de nitrito de sodio, con una concentración que va entre 5% a 35%).

En un recipiente se pone la emulsión matriz base, y se adiciona el aditivo (el porcentaje de adición va de 0.2% a 2.0%). Se hace uso de una espátula para su mezclado, y se empieza a tomar el tiempo, en un vaso el cual se conoce su masa y volumen, se pone en éste la emulsión ya gasificada. Se va tomando las masas del envase con la emulsión gasificada, retirándose la porción emulsión gasificada del ras del envase, y sus tiempos.

A continuación se muestra una tabla, con valores de la densidad de la emulsión gasificada con diferentes porcentajes adicionados de nitrito de sodio.

Tabla 4. Gasificación con aditivo al 15%

% NANO ₂ (15%)	0.50%	0.75%	1.00%
t (min)	ρ (g/cc)	ρ (g/cc)	ρ (g/cc)
0	1.3786	1.3786	1.3786
5	1.3333	1.3147	1.2664
10	1.2664	1.2192	1.1599
15	1.2252	1.173	1.1123
20	1.2072	1.1462	1.0846
25	1.1943	1.1321	1.0651
30	1.1865	1.1148	1.0506

Tabla 5. Gasificación con aditivo al 25%

% NANO ₂ (25%)	0.50%	0.75%	1.00%
t (min)	ρ (g/cc)	ρ (g/cc)	ρ (g/cc)
0	1.3786	1.3786	1.3786
5	1.3047	1.2434	1.1890
10	1.1871	1.0981	1.0333
15	1.1195	1.0226	0.9544
20	1.0830	0.9792	0.9053
25	1.0579	0.9503	0.8767
30	1.0428	0.9296	0.8538

3.4. Características de la emulsión

Algunas características de la emulsión matriz base, como de la emulsión gasificada, son:

Densidad emulsión matriz base (25°C) : 1.3600 a 1.4000 g/cc

Viscosidad emulsión matriz base (25°C) : 15000 a 15000 cP

La adición de nitrito de sodio es un factor importante en el proceso de gasificación, el cual se puede ver en el siguiente grafico (obtenido de las tablas 4 y 5).

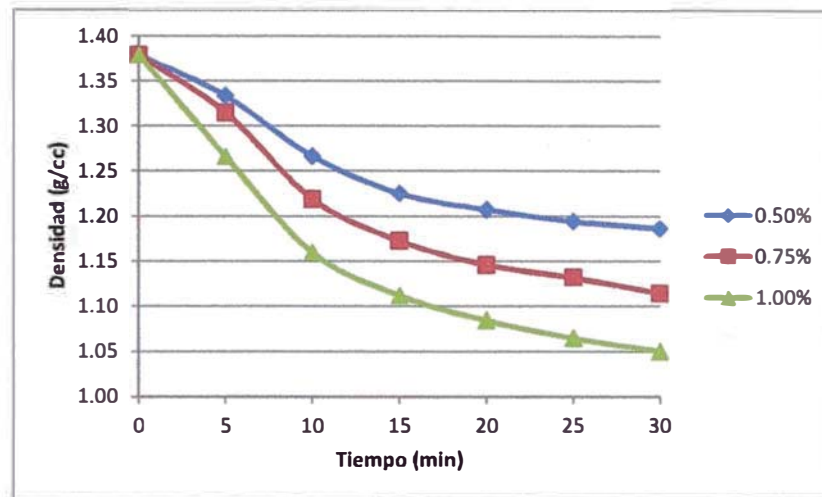


Gráfico 1. Gasificación con nitrito de sodio (15%)

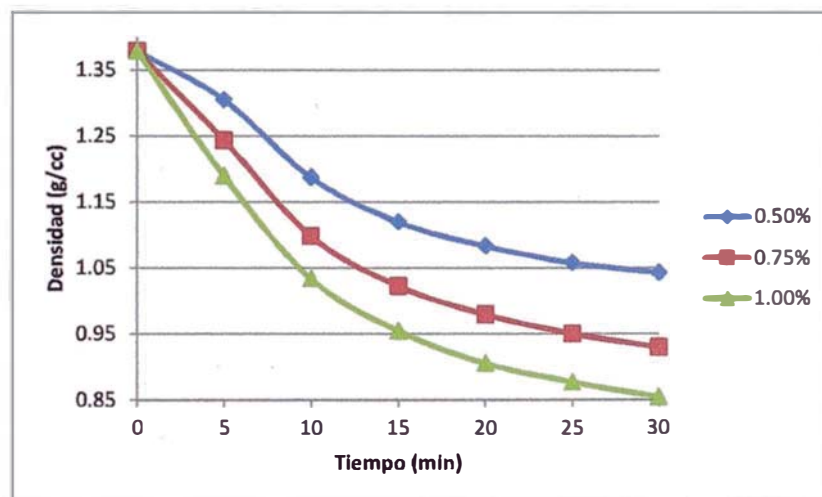


Gráfico 2. Gasificación con nitrito de sodio (25%)

Asimismo, el emulsificante que se use en la elaboración de la emulsión matriz base, influye en el proceso de gasificación.

Una composición para la emulsión matriz base es la siguiente:

Tabla 6. Composición de la emulsión

Componente	Porcentaje (%)
Nitrato de amonio	60.00
Nitrato de sodio	10.00
Acido acético	1.00
Agua	20.00
Emulsificante	2.00
Aceite	7.00
Total	100.00

Para medir la velocidad de detonación de esta emulsión, se siguió el siguiente procedimiento. Se puso en un tubo de 2 1/2 pulgadas de PVC la emulsión, en su proceso de gasificación (este tubo tiene dos perforaciones pequeñas, que se distancian 100 mm), una vez ya gasificada.

Se lleva al lugar de pruebas, donde se pone el tubo en posición horizontal, y se pone en las dos perforaciones las fibras de vidrio; se inicia esta emulsión gasificada con un fulminante. En el equipo de medición de ingresa el valor de la distancia, y se inicia con el equipo el fulminante, procediendo a la detonación. Se obtiene el tiempo (a través de la fibra óptica), y con una simple división entre la distancia y el tiempo, se obtiene la velocidad de detonación (VOD).

Velocidad de detonación (VOD)

5000 a 6000 m/s

3.5. Termoquímica de la Emulsión Gasificada y del heavy ANFO:

Para poder ver el comportamiento de estos dos explosivos se verá desde el punto de vista fisicoquímico, ya que la detonación del explosivo libera energía.

Para el Heavy ANFO, se considera una mezcla de 50/50 (50% de ANFO y 50% de emulsión).

La composición del Heavy ANFO, se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Composición Heavy ANFO

Componente	Porcentaje (%)
ANFO	50.00%
Nitrato de amonio	94.00
Diesel	6.00
Emulsión	50.00%
Nitrato de amonio	70.00
Agua	22.00
Emulsificante	2.00
Aceite	6.00

La fórmula global de este Heavy ANFO es mostrado en la tabla 8.

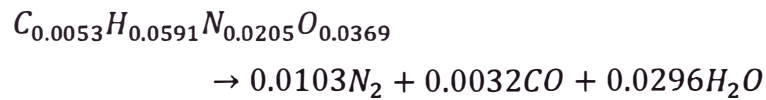
Tabla 8. Composición Global Heavy ANFO 50/50

Componente	Porcentaje (%)
Nitrato de amonio	82.00
Agua	11.00
Emulsificante	1.00
Diesel	6.00
Total	100.00

Las moles de átomos en 1g de mezcla del heavy ANFO 50/50, son:

C: 0.0053 ; H: 0.0591 ; N: 0.0205 ; O: 0.0369

La reacción del heavy ANFO 50/50 es:



Para calcular el calor de explosión:

$$Q = \frac{\Delta H_d \times 1000}{M}$$

Donde:

$$\Delta H_d = H_p(\text{producto}) - H_p(\text{explosivo})$$

M : Masa del explosivo (para el caso 1g)

$$Q = -174.3348 \text{ kJ/mol}$$

El volumen de gases producidos es:

$$\text{Volumen de gases} = (0.0103 + 0.0296) * 22.4$$

$$\text{Volumen de gases} = 0.8938 \text{ dm}^3$$

El balance de oxígeno:

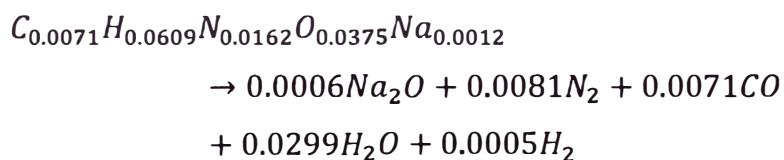
$$B.O. = -5.1941$$

Para la termoquímica de la emulsión gasificada, se tiene los datos de la tabla 6.

Las moles de átomos en 1g de emulsión matriz base es:

C: 0.0071 ; H: 0.0609 ; N: 0.0162 ; O: 0.0375 ; Na: 0.0012

La reacción de la emulsión es:



Para calcular el calor de explosión:

$$Q = \frac{\Delta H_d \times 1000}{M}$$

Donde:

$$\Delta H_d = H_p(\text{producto}) - H_p(\text{explosivo})$$

M : Masa del explosivo (para el caso 1g)

$$Q = -144.9123 \text{ kJ/mol}$$

El volumen de gases producidos es:

$$\text{Volumen de gases} = (0.0081 + 0.0071 + 0.0299 + 0.0005) * 22.4$$

$$\text{Volumen de gases} = 1.0214 \text{ dm}^3$$

El balance de oxígeno:

$$B.O. = -12.1644$$

Comparando el heavy ANFO 50/50 y la emulsión gasificada:

Tabla 9. Comparación entre HA 50/50 y emulsión

Propiedad	Heavy ANFO 50/50	Emulsión Gasificada
Calor de explosión (kJ/mol)	-174.3348	-144.9123
Volumen de gases (dm ³)	0.8938	1.0214
Balance de oxígeno	-5.1941	-12.1644
Densidad (g/cc)	1.2900	1.3786 (sin gasificar) 1.0500 (gasificado)

Acorde con la tabla se puede observar que cada explosivo tiene ciertas características, que son aplicables acorde a las necesidades de las compañías mineras.

3.6. Análisis de humos naranjas

La presencia de humos naranjas (figura 10), después de la operación de voladura; indica la presencia de NO_x (óxido nitroso). Estos gases son tóxicos, y se busca en los procesos de voladura que no se produzcan. Una causa de esta humos son el desbalance de oxígeno del explosivo. Sin embargo al observar la tabla 9, se puede ver que ambos explosivos tienen un balance de oxígeno negativo (deficiencia de oxígeno).



Fig. 10 Humos naranjas en voladura

En el mismo proceso de detonación, se puede llevar a cabo una deflagración del explosivo, siendo esto la causa para la presencia de estos humos naranjas.

Lo anterior nos lleva a concluir que se requiere de un explosivo más sensible al terreno en el cual se lleva el proceso de voladura. La emulsión gasificada, es un explosivo más sensible, produciendo una reacción de detonación de mayor rapidez y eficiencia, produciendo gases a mayor temperatura que puede inhibir o reducir la generación de los gases NO_x (humos naranjas).

IV. CONCLUSIONES

- La emulsión matriz para el gasificado, es un buen explosivo que aumenta el mercado de productos para el sector minero.
- La velocidad de reacción en la emulsión gasificada es determinada por la cantidad de nitrito de sodio y su concentración. Es decir a mayor cantidad y concentración, la velocidad de reacción es mayor y viceversa.
- La densidad final del producto es determinada por la cantidad de nitrito de sodio y su concentración.
- La cantidad de nitrito de sodio y su concentración, tienen una gran influencia en el tamaño de burbujas que se forma en el proceso de gasificación.
- El emulsificante es otro de los factores a tomar en cuenta en el proceso de gasificación, influyendo en el tamaño de burbujas que se forman.

V. RECOMENDACIONES

- La emulsión gasificada representa una buena alternativa en los procesos de voladura en el cual se observa la presencia de humos naranjas.
- El optimizar la emulsión gasificada, con la finalidad de que su uso en la minería se extienda; y no solo en aquellas mineras en las cuales se presenta los humos naranjas.
- Seguir investigando sobre las diferentes variables que influyen en el proceso de gasificación.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Akhavan J. The Chemistry of Explosives Capítulo 3 y 4
2nd edition – R.S.C – 2004

- Kubota N. Propellants and Explosives Capítulo 3 y 4
1st edition – Wiley-VCH – 2002

- Silva G. Compilación de Apuntes sobre Capítulo 4
Tecnologías de Explosivos y
Técnicas de Voladura
Department of Mining Engineering
Queen's University
Kingston, Ontario – 1995

- Katsabanis Explosives Technology Capítulo 1, 3, 4
Department of Mining Engineering y 11
Queen's University - 1996

VII. ANEXOS

Anexo 1. Calor de formación

Componente	Calor de formación (Kj/mol)
Nitrato de amonio	-365.40
Nitrato de sodio	-467.90
Acido acetico	-484.30
Agua	-285.80
Emulsificante	-24.00
Diesel	-28.00

Componente	Calor de formación (Kj/mol)
Oxido de sodio	-414.20
Nitrogeno	0.00
Monoxido de carbono	-110.50
Agua	-241.80
Carbono	0.00
Dioxido de carbono	-393.50
Hidrogeno	0.00
Oxigeno	0.00

Anexo 2. Balance de Oxígeno

Componente	Balance de Oxígeno
Nitrato de amonio	20.00
Nitrato de sodio	47.06
Acido acetico	-106.67
Agua	0.00
Emulsificante	-313.27
Diesel	-307.69

Anexo 3. Propiedades Heavy ANFO 50/50

Sustancia	Formula Empirica	Proporción en masa (g)	Masa molar
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	0.82	80.00
Agua	H ₂ O	0.11	18.00
Emulsificante	C ₆₂ H ₁₂₁ NO ₃	0.01	927.00
Diesel	C ₂ H ₂	0.06	26.00

Sustancia	Proporción molar en 1g de mezcla	Moles de atomos en 1g de mezcla				Moles	Fracción molar	Peso molecular
		C	H	N	O			
Nitrato de amonio	0.01025000	0.0000	0.0410	0.0205	0.0308	0.0103	0.5487	43.8982
Agua	0.00611111	0.0000	0.0122	0.0000	0.0061	0.0061	0.3272	5.8888
Emulsificante	0.00001079	0.0007	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.5353
Diesel	0.00230769	0.0046	0.0046	0.0000	0.0000	0.0023	0.1235	3.2121
Total		0.0053	0.0591	0.0205	0.0369	0.0187	1.0000	53.5344

Componente	Calor de formación (Kj/mol)	Moles	ΔH (kJ/mol)
Nitrato de amonio	-365.40	0.0103	-3.7454
Agua	-285.80	0.0061	-1.7466
Emulsificante	-24.00	0.0000	-0.0003
Diesel	-28.00	0.0023	-0.0646
			-5.5568

Componente	Calor de formación (Kj/mol)	Moles	ΔH (kJ/mol)
Nitrogeno	0.00	0.0103	0.0000
Monoxido de carbono	-110.50	0.0032	-0.3536
Agua	-285.80	0.0296	-8.4597
			-8.8133

Sustancia	Porcentaje (%)	Balance de oxigeno
Nitrato de amonio	0.82	20.00
Agua	0.11	0.00
Emulsificante	0.01	-313.27
Diesel	0.06	-307.69
		-5.1941

Anexo 4. Propiedades de Emulsión

Sustancia	Formula Empirica	Proporción en masa (g)	Masa molar
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	0.60	80.00
Nitrato de sodio	NaNO ₃	0.10	85.00
Acido acetico	CH ₃ COOH	0.01	60.00
Agua	H ₂ O	0.20	18.00
Emulsificante	C ₆₂ H ₁₂₁ NO ₃	0.02	927.00
Diesel	C ₂ H ₂	0.07	26.00

Sustancia	Proporción molar en lg de mezcla	Moles de atomos en lg de mezcla					Moles	Fracción molar	Peso molecular
		C	H	N	O	Na			
Nitrato de amonio	0.00750000	0.0000	0.0300	0.0150	0.0225	0.0000	0.0075	0.3309	26.4689
Nitrato de sodio	0.00117647	0.0000	0.0000	0.0012	0.0035	0.0012	0.0012	0.0519	4.4115
Acido acetico	0.00016667	0.0003	0.0007	0.0000	0.0003	0.0000	0.0002	0.0074	0.4411
Agua	0.01111111	0.0000	0.0222	0.0000	0.0111	0.0000	0.0111	0.4902	8.8230
Emulsificante	0.00002157	0.0013	0.0026	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0010	0.8823
Diesel	0.00269231	0.0054	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.1188	3.0880
	Total	0.0071	0.0609	0.0162	0.0375	0.0012	0.0227	1.0000	44.1148

Componente	Calor de formación (Kj/mol)	Moles	ΔH (kJ/mol)
Nitrato de amonio	-365.40	0.0075	-2.7405
Nitrato de sodio	-467.90	0.0012	-0.5505
Acido acetico	-484.30	0.0002	-0.0807
Agua	-285.80	0.0111	-3.1756
Emulsificante	-24.00	0.0000	-0.0005
Diesel	-28.00	0.0027	-0.0754
			-6.6231

Componente	Calor de formación (Kj/mol)	Moles	ΔH (kJ/mol)
Oxido de sodio	-414.20	0.0006	-0.2485
Nitrogeno	0.00	0.0081	0.0000
Monoxido de carbono	-110.50	0.0071	-0.7846
Agua	-285.80	0.0299	-8.5454
Hidrogeno	0.00	0.0005	0.0000
			-9.3300

Sustancia	Porcentaje (%)	Balance de oxigeno
Nitrato de amonio	0.60	20.00
Nitrato de sodio	0.10	47.06
Acido acetico	0.01	-106.67
Agua	0.20	0.00
Emulsificante	0.02	-313.27
Diesel	0.07	-307.69
		-12.1644