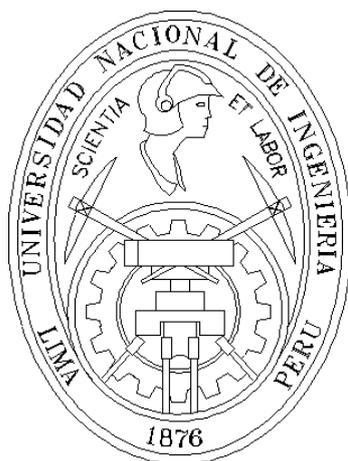


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Química



**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DEL NITRATO DE
AMONIO COMO INSUMO PARA EXPLOSIVOS DE USO
INDUSTRIAL EN LA MINERÍA**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
LICENCIADO EN QUÍMICA**

Presentado por:

ALEJANDRO JESÚS RAMÍREZ REYES

LIMA - PERÚ

2009

SÍNTESIS Y
CARACTERIZACIÓN DEL
NITRATO DE AMONIO COMO
INSUMO PARA EXPLOSIVOS
DE USO INDUSTRIAL EN LA
MINERÍA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación con cariño, a mis padres Julia y Eladio quienes me dieron la vida, a mi amada esposa Betty y en especial a mi hija Andrea, que es la luz y el motor de mi existencia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco la persistencia y el apoyo incondicional de mi amada esposa Betty, a mis amigos del trabajo Francisco y Wilson por brindarme la oportunidad y la orientación para la elaboración de este trabajo, y a los profesores Adolfo y Gino por sus aportes valiosos y recomendaciones.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.	9
OBJETIVO	14
CAPÍTULO I. GENERALIDADES – EXPLOSIVOS COMERCIALES	15
1.1. Definición	15
1.2. Procesos físico-químicos relacionados a los explosivos	15
A. Combustión	15
B. Deflagración	15
C. Detonación	15
1.3. Explosión	16
A. Explosión por descomposición muy rápida	16
B. Explosión por oxidación muy rápida del aire	16
C. Explosión nuclear	16
D. Explosión por exceso de presión	16
E. Ignición espontánea	17
1.4. Clasificación de los Explosivos	17
A. Explosivos Primarios	17
B. Explosivos Secundarios	19
C. Propelentes	22
1.5. Características de los Explosivos	24
A. Plasticidad	24
B. Viscosidad	24
C. Fluidez	25
D. Flujo (free flowing)	25
E. Tendencia a la compactación	25
F. Friabilidad	26
G. Homogeneidad	26
H. Porosidad	26
CAPÍTULO II. NITRATO DE AMONIO	27
2.1. Reseña Histórica	27
2.2. Química del Nitrato de Amonio	28
2.2.1. Síntesis del Nitrato de Amonio	30
2.2.2. Tipos de Nitrato de Amonio	31
A. Nitrato de Amonio Fertilizante	31
B. Nitrato de Amonio Técnico	31
2.2.3. Proceso de elaboración del Nitrato de Amonio	31

2.3. Agentes de Voladuras	35
A. Anfo	35
B. Emulsiones	37
B.1. Emulsiones Sensibilizados (explosivas)	38
B.2. Emulsión Matriz (no explosivas)	39
C. Anfo Aluminizado	40
D. Anfo Pesado	42
2.4. Características de los Agentes de Voladuras	45
A. Velocidad de Detonación	45
B. Tamaño de las partículas	45
C. Densidad	46
D. Energía	46
E. Presión de Detonación	48
F. Resistencia al agua	49
G. Categoría de humos	50
H. Iniciación	52
I. Efecto de la Temperatura	53
J. Inflamabilidad	54
CAPÍTULO III. CONTROL DE CALIDAD DEL NITRATO DE AMONIO TÉCNICO	55
3.1. Caracterización del Nitrato de Amonio Técnico como insumo para Explosivos	55
A. Nitrato de Amonio Grado Anfo (prill poroso)	55
B. Nitrato de Amonio Técnico (prill compacto)	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	61

RESUMEN

En esta monografía se presenta la síntesis del nitrato de amonio prill grado Anfo y Técnico, y su caracterización para ser empleados como insumo para la fabricación de explosivos de uso industrial en agentes de voladuras para la minería como Anfo y Emulsiones, respectivamente.

En el Capítulo I se definen a los explosivos y los procesos fisicoquímicos relacionados a ellos, los tipos de explosión involucrados de acuerdo al tiempo en que se llevan a cabo, la clasificación de los explosivos respecto a su naturaleza química, su desempeño y uso, y las características vinculadas al aspecto físico y manipuleo.

En el Capítulo II se desarrolla todo lo referente al Nitrato de Amonio, su reseña histórica, propiedades fisicoquímicas, síntesis, tipos de nitrato, el proceso de elaboración del Nitrato de Amonio de acuerdo a su uso como fertilizante y explosivo, el empleo como explosivos en agentes de voladura: Anfo, Emulsiones y mezclas de ambos, describiendo sus características principales que lo definen.

En el Capítulo III se detallan los controles y requisitos que deben cumplir el nitrato de amonio de acuerdo a las normas técnicas nacionales que rige en el país, para ser usado en la elaboración de explosivos de uso industrial y poder clasificarlo como grado Anfo o Técnico.

Por último, se citan las referencias bibliográficas consultadas para la elaboración del informe; así como también en Anexos, se presentan los Certificados de Análisis, Fichas Técnicas y de Seguridad, fotos de la presentación de los embalajes, forma y color de los prills de Nitrato de Amonio grado Anfo y Técnico.

INTRODUCCIÓN

El Nitrato de Amonio es un ingrediente esencial de casi todos los explosivos comerciales incluyendo la dinamita, las emulsiones y los hidrogeles. Sin embargo, su uso principal se da bajo la forma de una pequeña esfera porosa llamada “*prill*”, mezclada con aceite combustible. Cada año, se consumen en los EEUU cerca de cuatro mil millones de libras (aprox. un 1,8 millones de toneladas) de estas mezclas, conocidas popularmente como ANFO (por sus siglas en inglés, Ammonium Nitrate Fuel Oil), cubriendo aproximadamente el 80% del mercado nacional de los explosivos comerciales.

Desde su introducción en la década de los cincuenta, los productos ANFO han sido objeto de una amplia gama de aplicaciones en operaciones de voladura, tales como minas de carbón de tajo abierto, minas metálicas, canteras y construcción civil. Su uso generalizado se atribuye a su bajo costo y conveniencia.

Sus limitaciones: el no ser resistentes al agua y ser un producto de baja densidad, se deberían entender como deficiencias del producto existentes antes de la introducción del ANFO en un sistema de voladura.

La historia de los explosivos en emulsión empezó en 1961, cuando Richard Egly y Albert Neckar de la “*Commercial Solvents Corporation*” registraron una patente en el Registro de Patentes de los EEUU para un agente de voladura compuesto de una mezcla de emulsión de “agua en aceite” con un agente oxidante sólido, como el nitrato de amonio. Dicha patente se otorgó en 1964 como la Patente N° 3,161,551. Lejos de estar trabajando en un nuevo tipo de explosivos en forma de emulsión, lo que ellos estaban tratando de hacer era desarrollar un tipo de ANFO resistente al agua. Desarrollos posteriores en la década de los sesenta y a principios de los setenta, dieron como resultado los explosivos en emulsión, con características explosivas de diámetro mínimo y velocidades de detonación comparables a los diferentes grados de dinamita existentes. Además, las emulsiones se desarrollaron con características que les permitían un uso seguro y eficiente en sistemas de carguío a granel de gran volumen.

PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C., empresa fundada en 1953 bajo la denominación de “**Fabrica de Mechas S.A.**”, está dedicada a la fabricación y comercialización de explosivos, accesorios y agentes de voladura. Sus productos cuentan con los más altos estándares de calidad, seguridad y eficiencia y están destinados a cubrir las necesidades, tanto de la minería y la construcción civil, como de la prospección petrolera y gasífera, además de otros importantes segmentos de los sectores productivos a nivel nacional e internacional.

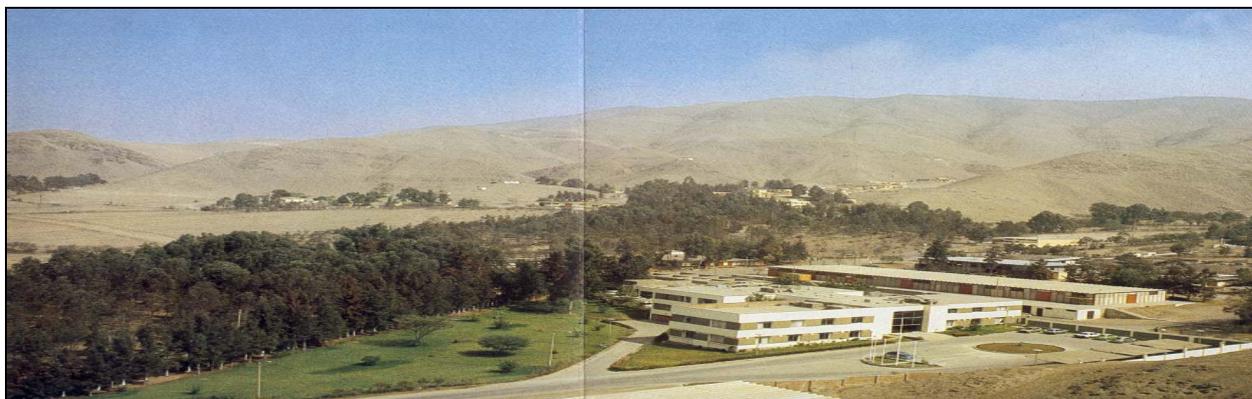
FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. es un grupo empresarial caracterizado por la importancia que ha dado a su desarrollo tecnológico y comercial, ampliando sus mercados hacia el ámbito internacional, instalándose exitosamente en Chile y próximamente en otras latitudes, donde, como en el mercado nacional, ofrece productos de avanzada tecnología desarrollados en sus propias instalaciones.

Se distingue asimismo por la preocupación permanente en la solución de los problemas específicos de sus usuarios, que comprenden los siguientes sectores:

- Minería Subterránea.
- Minería a Tajo Abierto.
- Obras de Construcción Civil.
- Canteras.
- Voladuras Submarinas.
- Prospección Petrolera.

En todas estas operaciones, *FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.* es capaz de asistir técnicamente a sus usuarios en el diseño y realización de las operaciones involucradas y de aportar innovaciones para cubrir todas sus necesidades.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. cuenta con 17 Plantas para la fabricación de accesorios, ubicadas en un área de 100 hectáreas en el Valle del Chillón, en el distrito de Puente Piedra, a 28 km de Lima.



También cuenta con tres plantas de fabricación de explosivos que se sitúan a 57 km al norte de Lima en la provincia de Chancay, dentro de un área de 1,100 hectáreas, en donde el grupo empresarial desarrolla además otros proyectos, así como con una planta de Emulsión Matriz en el distrito de Salaverry – La Libertad. *FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.* tiene oficinas comerciales y polvorines regionales que abarcan todo el Perú. Exporta a un gran número de naciones prácticamente en todos los continentes y mantiene relaciones comerciales con Estados Unidos y Europa.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C., medio siglo de desarrollo constante, preparada para el desafío del nuevo milenio.

MISIÓN

Proveer explosivos, accesorios de voladura y servicios seguros, confiables e innovadores para satisfacer las altas exigencias de nuestros clientes cumpliendo con las normas legales vigentes de modo fiel y exacto, lo que certifica la pureza de nuestros acuerdos comerciales en base a los más elevados valores éticos.

VISIÓN

“Liderar el desarrollo de soluciones en el mundo de los explosivos”.

LOCACIONES

FAMESA además de sus plantas de producción cuenta con una red de oficinas de ventas y polvorines, estratégicamente ubicados, que le permiten brindar un abastecimiento seguro y oportuno a los usuarios de explosivos y accesorios de voladura de las compañías mineras, petroleras y obras de construcción.

CALIDAD

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. empresa dedicada a la fabricación, comercialización de Explosivos y Accesorios de Voladura y Servicio Integral de Voladuras, conmemorando sus 56 años al servicio de la Minería, Construcción Civil y Prospección Sísmica, se encuentra comprometida con el *“servicio hacia sus clientes”*. Por esta razón y dado el nivel tecnológico alcanzado, se lanza al mercado internacional con la finalidad de seguir siendo competitivos en este mundo *“Globalizado”*.



Luego de un riguroso trabajo de implementación, a fines del 2003, *FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.* obtiene la certificación de su **Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001 versión 2000** contando con la acreditación de las empresas internacionales: **ANAB** (Estados Unidos) y **UKAS** (Reino Unido).



Estos compromisos de *FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.* fueron suscritos en la Política de la Calidad, cuyo texto dice:

“FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C., TIENE COMO COMPROMISO ANTE SUS CLIENTES, SUMINISTRAR PRODUCTOS Y SERVICIOS DE ALTA CALIDAD EN TÉRMINOS DE SEGURIDAD, CONFIABILIDAD Y OPORTUNIDAD; CON ALTOS ESTÁNDARES DE EFICACIA Y EFICIENCIA.

PARA EL LOGRO DE ESTE COMPROMISO CUENTA CON PERSONAL CALIFICADO, TECNOLOGÍA PROPIA Y UNA CULTURA ORGANIZACIONAL DIRIGIDA A ALCANZAR UNA MEJORA CONTINUA EN TODOS SUS PROCESOS”.

SEGURIDAD

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C., está comprometida, con la Seguridad en todos sus procesos, reconociendo la participación de sus trabajadores para mantener un ambiente de trabajo seguro y saludable. Este enfoque hacia la Seguridad traducido como *“Control Total de Pérdidas”*, se distribuye en las siguientes acciones:

1. Planificación eficaz en Seguridad, Higiene Industrial y Salud Ocupacional; tanto en la supervisión y capacitación, así como en la gestión de equipos de seguridad.
2. Control permanente del cumplimiento del Reglamento Interno de Seguridad e Higiene Industrial.
3. Capacitación continua a todo el personal, orientada a la Prevención de Riesgos Laborales a través de la aplicación de un proceso de Mejora Continua, establecido en los procedimientos de nuestro Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2000.
4. Cumplimiento de las disposiciones legales establecidas, aplicables a la industria de explosivos.
5. Actualmente Famesa Explosivos se encuentra en proceso de implementación del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud Ocupacional OSHAS 18001:2007.



MEDIO AMBIENTE

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C., empresa especializada en la fabricación y comercialización de explosivos, accesorios de voladura y servicio integral de voladura; *está comprometida con la Preservación y Protección del Medio Ambiente en todos sus procesos y operaciones.*

Con la finalidad de cumplir los compromisos con sus clientes, *FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.* ha emprendido una serie de tareas mediante la “*Mejora continua*” y dentro del marco legal establecido, para alcanzar los estándares aceptables de Protección al Medio Ambiente.



Con este esfuerzo se espera otorgar a los clientes, servicios implícitos que se traducen básicamente en la satisfacción de sus necesidades y expectativas, tales como:

1. Sustitución progresiva de insumos y materiales, tratamiento de efluentes y desperdicios industriales; para prevenir la contaminación ambiental interna.
2. Desarrollo de productos terminados alternativos a los tradicionales, que protejan y preserven el Medio Ambiente, debido al menor impacto ambiental que puedan tener los gases de detonación durante la voladura.
3. Reciclamiento de materiales residuales mediante compañías externas.
4. Implementación de sistemas de control de voladura que protejan el medio circundante, tales como el control de vibraciones y otros.
5. Programa de concientización y sensibilización del personal para el uso racional de los recursos naturales: agua, papel, electricidad y buenas prácticas ambientales.
6. Actualmente Famesa Explosivos se encuentra en proceso de implementación del Sistema de Gestión Ambiental ISO 14001:2004.

ASISTENCIA TÉCNICA

La calidad y seguridad de sus productos está respaldada por un permanente servicio de asistencia técnica, ofrecido tanto en el país como al exterior a través de un calificado plantel de ingenieros de minas cuya labor abarca la Asistencia Técnica de Pre-venta y Post-venta.

La Asistencia Técnica que pone al servicio del cliente, además de su importante objetivo práctico, tiene ahora una visión más analítica, puesto que se ha reforzado con recursos de instrumentación electrónica, como equipos de medición de velocidad de detonación, vibraciones, ondas de sonido, fragmentación, dispersión de tiempos de retardo y control de los gases producidos



por las voladuras; y todo ello soportado en programas informáticos (software) especialmente concebidos para el análisis de resultados de las mediciones, el diseño, control y optimización de sus operaciones de voladura.

SERVICIO INTEGRAL DE VOLADURA

A tono con el avance de la tecnología y como complemento del uso de sus productos, *FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.* ofrece el servicio integral de voladura en operaciones de cielo abierto, cubriendo las siguientes actividades:



- Construcción y administración de polvorines portátiles y fijos.
- Suministro de toda la línea de explosivos, agentes y accesorios de voladura.
- Primado, amarre y retacado de los taladros, con cuadrillas de personal especializado y calificado y la supervisión de ingenieros y técnicos experimentados.
- Preparación in-situ y carguío de los explosivos en los taladros, haciendo uso de su flota de camiones-fábrica y equipos auxiliares de apoyo.
- Asesoramiento y coordinación en los diseños de mallas de perforación y plantillas de voladura.
- Asistencia técnica para la optimización de resultados.

Para brindar un servicio integral de voladura de calidad, es una preocupación ejercitar la verificación permanente y sistemática del cumplimiento de los objetivos del cliente, respetando las normas de seguridad, preservando el medio ambiente, procurando la mejor calidad de los disparos y la eficiencia de las operaciones, reduciendo los costos de minado y cuidando la mina. De otro lado, siendo que el apoyo logístico y administrativo son indispensables para una eficaz y eficiente atención de los pedidos así como para la adecuada disposición de los recursos humanos, materiales y monetarios, cuenta con la mejor plana de Ejecutivos y Personal de apoyo en todas las áreas involucradas (Administración, Producción, Compras, Almacén, Legal, Finanzas, Contabilidad, etc.).

OBJETIVO

PRESENTAR LA SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DEL NITRATO DE AMONIO PRILL GRADO ANFO Y TÉCNICO QUE SE UTILIZA COMO INSUMO PARA LA FABRICACIÓN DE EXPLOSIVOS DE USO INDUSTRIAL EN LA MINERÍA.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES – EXPLOSIVOS COMERCIALES

1.1. Definición.- Los materiales explosivos son compuestos o mezclas de sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, que por medio de reacciones químicas de óxido-reducción, son capaces de transformarse en un tiempo muy breve, del orden de una fracción de microsegundo, en productos gaseosos y condensados, cuyo volumen inicial se convierte en una masa gaseosa que llega a alcanzar muy altas temperaturas y en consecuencia muy elevadas presiones.

Así, los explosivos comerciales son una mezcla de sustancias, combustibles y oxidantes, que incentivadas debidamente, dan lugar a una reacción exotérmica muy rápida, que genera una serie de productos gaseosos a alta temperatura y presión, químicamente más estables, y que ocupan un mayor volumen, aproximadamente 1 000 a 10 000 veces mayor que el volumen original del espacio donde se alojó el explosivo.

Estos fenómenos son aprovechados para realizar trabajo mecánico aplicado para el rompimiento de materiales pétreos, en lo que constituye la “*técnica de voladuras de rocas*”.

Los explosivos constituyen una herramienta básica para la explotación minera y para obras de ingeniería civil.

1.2. Procesos físico-químicos relacionados a los explosivos.- Los procesos de reacción según su carácter físico-químico y el tiempo en que se realizan se catalogan como:

A. Combustión.- Puede definirse como tal a toda reacción química capaz de desprender calor pudiendo o no, ser percibida por nuestros sentidos, y que presenta un tiempo de reacción bastante lento.

B. Deflagración.- Es un proceso exotérmico en el que la transmisión de la reacción de descomposición se basa principalmente en la conductividad térmica. Es un fenómeno superficial en el que el frente de deflagración se propaga por el explosivo en capas paralelas, a una velocidad baja, que generalmente no supera los 1 000 m/s.

La deflagración es sinónimo de una combustión rápida. Los explosivos más lentos al ser activados dan lugar a una deflagración en la que las reacciones se propagan por conducción térmica y radiación.

C. Detonación.- Es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción y por la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva (que se traduce en presión sobre área circundante).

En los explosivos detonantes la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que los transmiten por choque, deformándola y produciendo calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un

movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y que se denomina “*onda de choque*”, la que se desplaza a velocidades entre 1 500 a 7 000 m/s según la composición del explosivo y sus condiciones de iniciación.

En resumen, deflagración y detonación son fenómenos de óxido-reducción, siendo la deflagración de carácter subsónico, pues las ondas de compresión o dilatación de baja densidad se propagan con una velocidad menor o igual que la del sonido dentro de los gases resultantes como producto de la combustión rápida, mientras que la detonación es de carácter supersónico, pues las ondas de compresión se propagan a velocidad mayor que la del sonido con respecto al medio gaseoso resultante.

En general, respecto a la velocidad, los explosivos son considerados como:

- **Deflagrantes:** cuando la velocidad esta por debajo de los 1 000 m/s.
- **Detonantes de bajo régimen:** de 1 000 a 1 800 m/s (transición entre deflagración y detonación).
- **Detonantes de régimen normal:** con velocidades entre 1 800 y 5 000 m/s (categoría a los que pertenecen casi todos los explosivos de uso industrial).
- **Detonantes de alto régimen:** cuando la velocidad está por encima de los 5 000 m/s (es el caso de los altos explosivos de uso militar).

1.3. Explosión.- La explosión, por su parte, es un fenómeno de naturaleza física, resultada de una liberación de energía tan rápida que se considera instantánea. La explosión es un efecto y no una causa.

En la práctica se consideran varios tipos de explosión que se definen con base en su origen, a la proporción de energía liberada y al hecho que desencadenan fuerzas capaces de causar daños materiales, las cuales podemos mencionar:

A. Explosión por descomposición muy rápida.- La liberación instantánea de energía generada por una descomposición muy rápida de materias inestables requiere una materia inestable (explosivo) y un procedimiento de detonación.

B. Explosión por oxidación muy rápida del aire.- La liberación de energía generada por oxidación muy rápida de un vapor, gas o polvo inflamable (gasolina, grisú en las minas de carbón).

C. Explosión nuclear.- Este tipo implica la liberación instantánea de energía creada por fusión nuclear, tal como sucede en una bomba de hidrógeno o por fisión nuclear, tal como sucede en la bomba atómica (uranio).

D. Explosión por exceso de presión.- Este tipo de explosión es el resultado de la liberación instantánea de la energía generada por un exceso de presión en recipientes, calderos o envases y puede deberse a diversos factores como calentamiento, mal funcionamiento de válvulas u otros motivos.

E. Ignición espontánea.- La ignición espontánea puede producirse cuando tiene lugar un proceso de oxidación lento de la materia sin una fuente externa de calor; comienza lentamente pero va haciéndose más rápida hasta que el producto se inflama por sí solo (carbón mineral acumulado, nitrato de amonio apilado sin ventilación).

1.4. Clasificación de los Explosivos.- En términos generales los explosivos por su forma de reacción se clasifican en: explosivos químicos y explosivos nucleares.

Los *explosivos químicos* actúan por procesos de reacción química de detonación producidos por efecto de una onda de choque. Están mayormente vinculados a compuestos nitrados y que generalmente contienen oxígeno, nitrógeno y elementos oxidables (combustibles) tales como carbono e hidrógeno, son de aplicación común en minería y construcción civil.

Los *explosivos nucleares* están vinculados a la desintegración de materiales como uranio 235 y plutonio, proceso que desprende inmensas cantidades de energía. Su empleo actual es en el campo militar y de investigación, tema que no se profundizará en este trabajo.

La clasificación de los explosivos químicos han sido tratados por muchos científicos durante este siglo, y fueron clasificados con respecto a su naturaleza química, su desempeño y usos, predominando las dos últimas. Teniendo en cuenta lo anterior, los explosivos químicos pueden ser divididos en tres clases: explosivos primarios, explosivos secundarios y propelentes, tal como se muestra en la Figura N° 01 y que a continuación se detalla.

A. Explosivos Primarios.- Los explosivos primarios (también conocido como altos explosivos primarios) se diferencian de los explosivos secundarios en que ellos sufren una transición muy rápida de la combustión a la detonación, y tienen la capacidad de transmitir la detonación a explosivos menos sensibles. Los explosivos primarios pueden detonar cuando están sometidos al calor y al golpe. En la detonación las moléculas en los explosivos se disocian y producen tremenda cantidad de calor y/o energía. Estos pueden iniciar en un segundo a explosivo mas estable. Po esta razón, son usados como iniciadores.

Los explosivos primarios se diferencian considerablemente en su sensibilidad al calor y en la cantidad de calor que producen en la detonación. El calor y la energía pueden variar pero es comparable a los explosivos secundarios. La velocidad de detonación de los explosivos primarios está en el rango de 3 500 a 5 500 m/s.

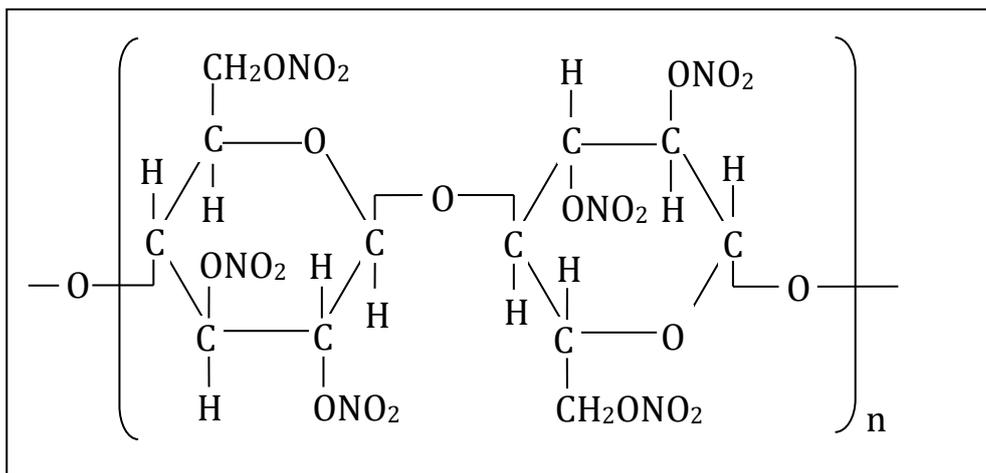
Los explosivos primarios tienen un alto grado de sensibilidad a la iniciación por golpe, fricción, chispa eléctrica o altas temperaturas y hacen explosión si están o no confinado, los cuales se mencionan a continuación:

- Estifnato de Bario
- Mononitroresorcinato de plomo
- Dinitrobenzofurozano de potasio
- Azida de mercurio

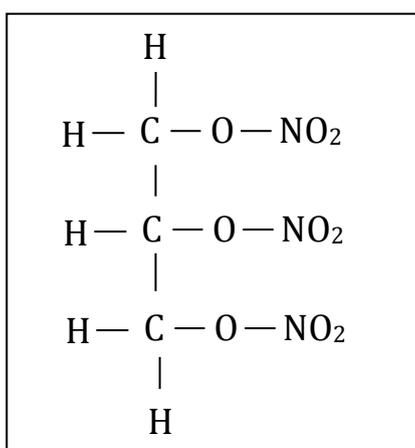
B. Explosivos Secundarios.- Los explosivos secundarios (también conocido como altos explosivos) se diferencian de los explosivos primarios por que ellos no pueden detonar fácilmente por calor o golpe, y son generalmente más poderosos que los explosivos primarios. Los explosivos secundarios son menos sensibles que los explosivos primarios, y solo pueden ser iniciados a la detonación por la energía producida por la explosión de un explosivo primario. En la iniciación, la composición del explosivo secundario se disocia casi instantáneamente en otros componentes más estables.

Algunos explosivos secundarios son mas estables que una bala de rifle, pueden ser quemados o incendiados sin detonación. Los explosivos más estables el cual detonan a muy altas velocidades, ejercen una gran fuerza durante su detonación que los materiales explosivos usados para iniciarlos. La velocidad de detonación de los explosivos secundarios está en el rango de 5 500 a 9 000 m/s, a continuación se mencionan los siguientes:

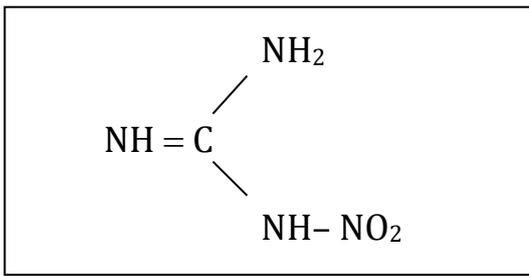
- 1,3,3-Trinitroazotidina (TNAZ)
- Nitrocelulosa (seca 13,4%N): $C_6H_7O_2(OH)_x(ONO_2)_y$



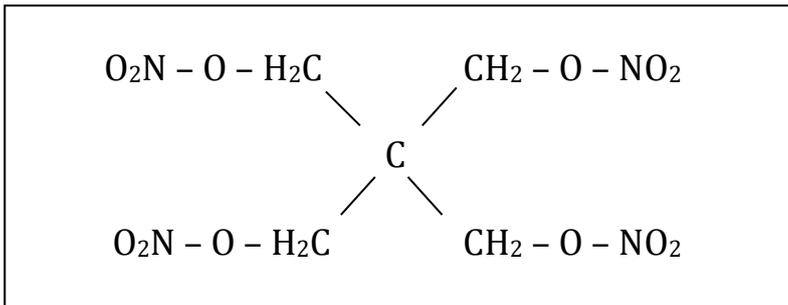
- Nitroglicerina: $(C_3H_5N_3O_9)$



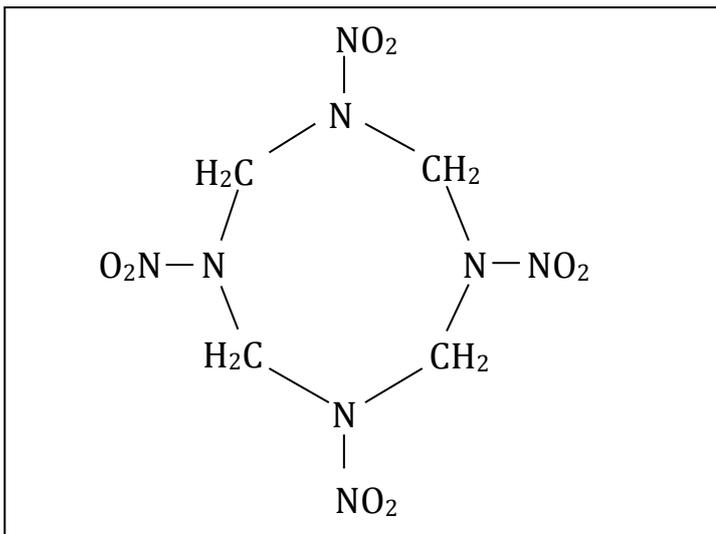
- Nitroguanidina (picrato): (C₆H₃N₃O₇)



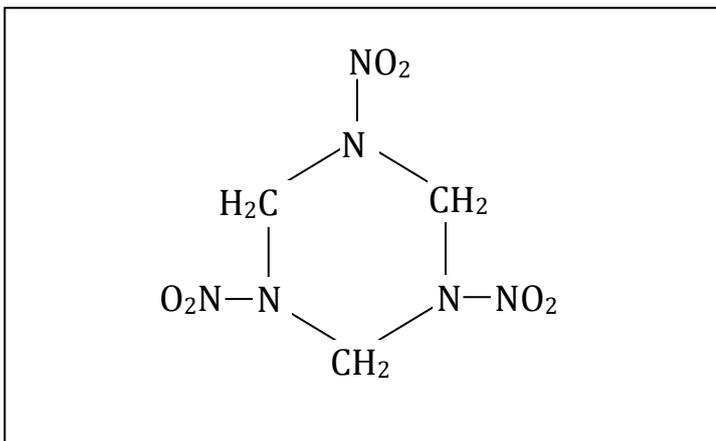
- Tetranitrato de pentaeritritol (PETN): (C₅H₈N₄O₁₂)



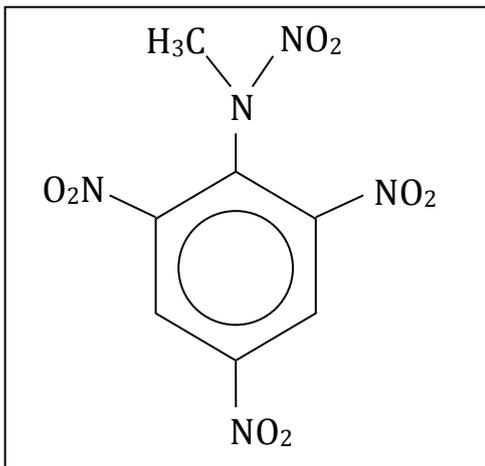
- Ciclotetrametilenotetranitamina ó Octógeno (HMX-β): (C₃H₆N₆O₆)



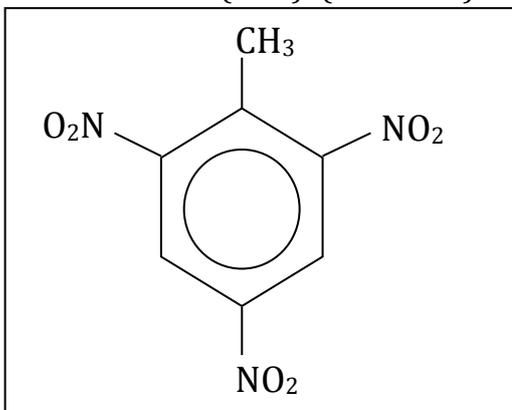
- Ciclotrimetilenotrinitramina ó Hexógeno (Ciclonita o RDX): (C₄H₈N₈O₈)



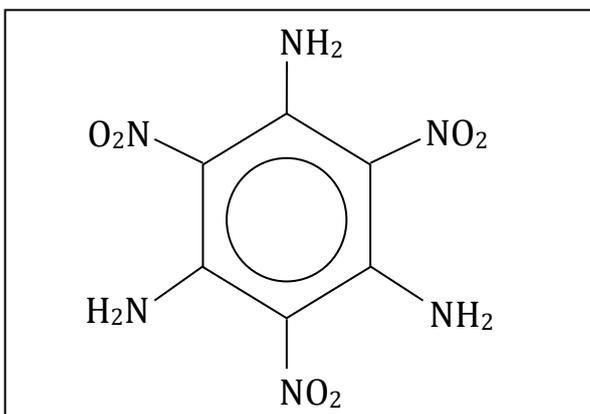
- Tetril o Tetritol o 2,4,6-Trinitrofenilmetilnitramina: (C₇H₅N₅O₈)



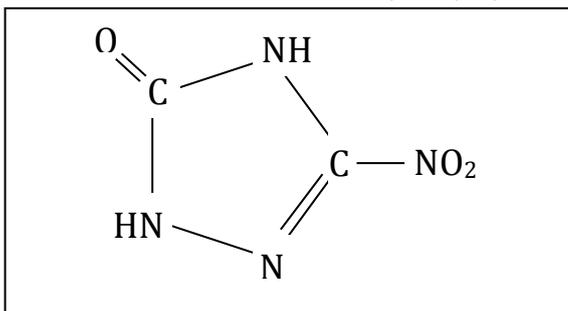
- Trinitrotolueno (TNT): (C₇H₅N₃O₆)



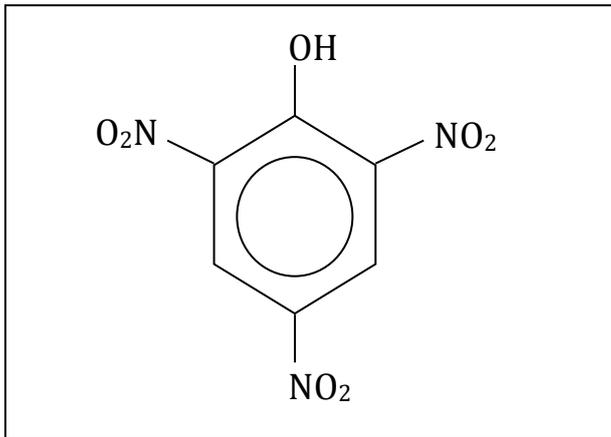
- 1,3,5-Triamino-2,4,6-Trinitrobenceno (TATB): (C₆H₆N₆O₆)



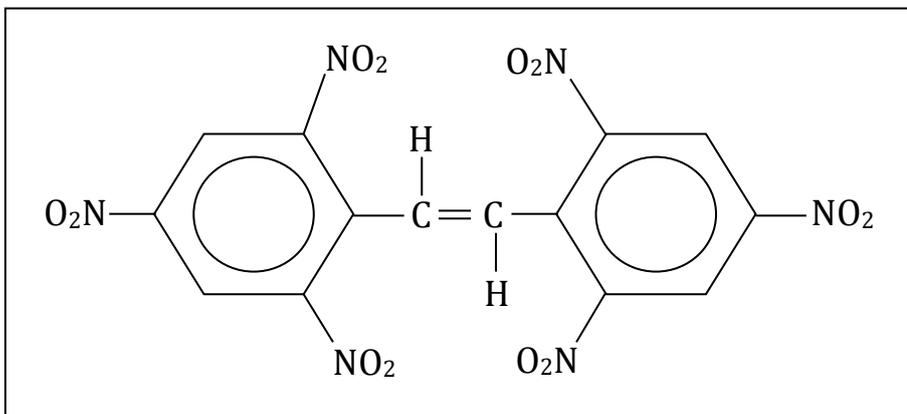
- 5-Nitro-1,2,4-Triazol-3-ona (NTO): (C₂H₂N₄O₃)



➤ Ácido pícrico ó 2,4,6-Trinitrofenol: (C₆H₃N₃O₇)

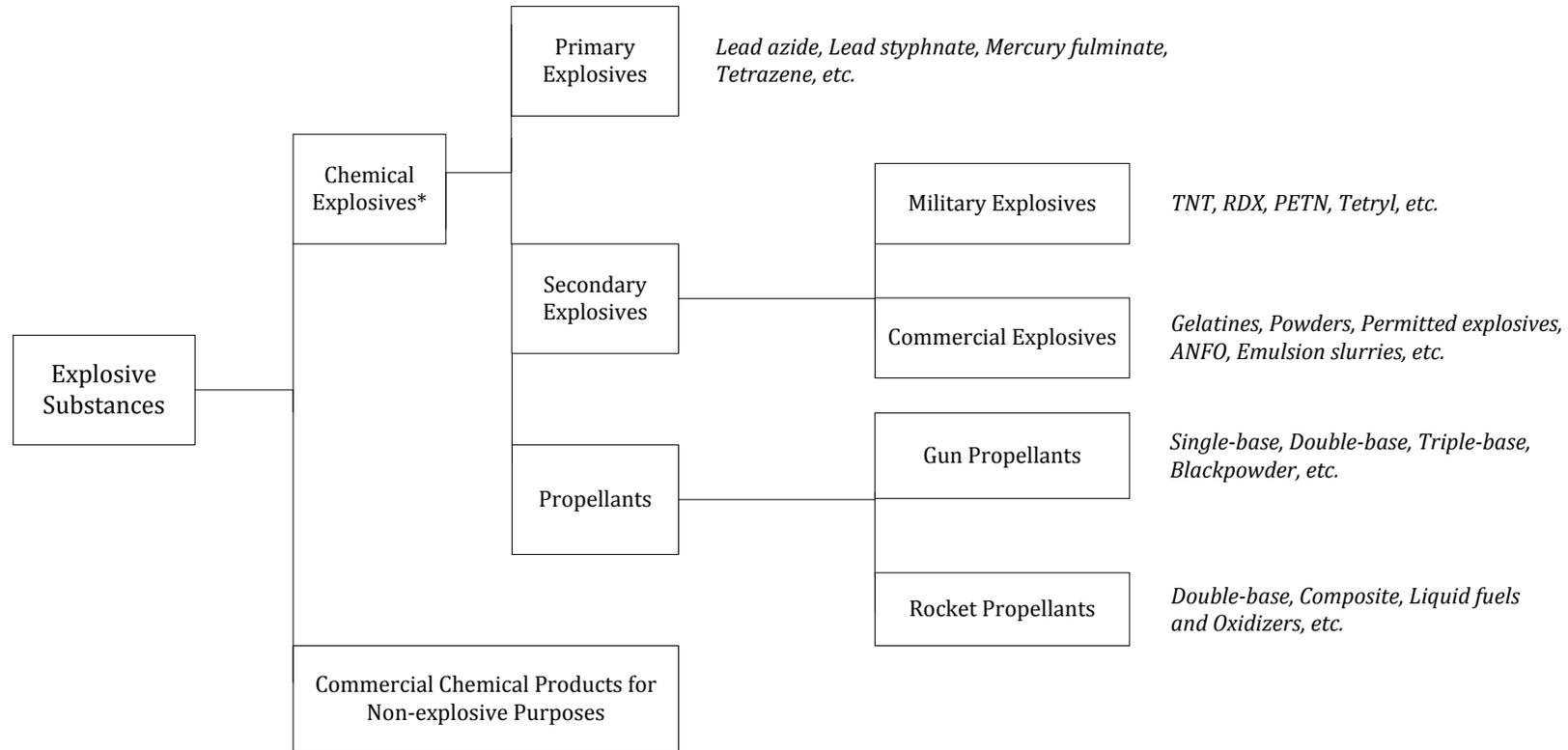


➤ Hexanitroestilbeno (HNS): (C₁₄H₆N₆O₁₂)



C. Propelentes.- Los propelentes son materiales combustibles que contienen dentro de ellos mismos todo el oxígeno necesario para su combustión. Los propelentes solo arden y no explotan; lo hacen usualmente un poco violenta y están acompañados por una flama o chispa y un silbido o sonido crepitoso, pero no agudo, estallido ruidoso como en el caso de explosivos detonantes. Los propelentes pueden ser iniciados por una llama o chispa, y cambia del estado sólido al gaseoso relativamente lento en cuestión de milisegundos.

Ejemplos de propelentes son la pólvora negra, propelentes con menos humos, accesorios de voladura y explosivos con nitrato de amonio, el cual no contiene nitroglicerina u otros compuestos nitro aromáticos.



**Pyrotechnic compositions can also be classed as chemical explosives.*

El nombre “Pirotécnico” es derivado de las palabras griegas “pyr” (fuego) y “techne” (un arte), el cual describe el efecto observado en la combustión de una composición pirotécnica. Estos efectos incluyen la producción de humos coloreados, sonido, y la emisión de luces coloreadas brillantes. Las composiciones pirotécnicas también son usados en dispositivos generadores de calor, retardos e iniciadores.

Los pirotécnicos son muy similares a los explosivos y a los propelentes. Los explosivos desarrollan altas velocidades de reacción generando productos gaseosos, los propelentes son generadores de gas y desarrollan velocidades menores que los explosivos, y los pirotécnicos reaccionan visiblemente con la formación de residuos sólidos.

Las composiciones pirotécnicas contienen un combustible y un oxidante, el cual es formulado específicamente para producir una gran cantidad de energía. Esta energía es usada para producir una llama o brillo, o combinado con otras sustancias volátiles para producir humo y luz como en los fuegos artificiales, o para producir grandes cantidades de gas como en los cohetes de juegos artificiales.

Figura N° 01. Clasificación de las Sustancias Explosivas.

1.5. Características de los Explosivos.- Son las propiedades físicas y químicas que tienen relación directa con su condición de estado. Unas determinan su aspecto y estado físico, otras su factibilidad de empleo con seguridad en determinadas condiciones de la roca y del medio ambiente. Finalmente otras determinan el rendimiento del explosivo en su aplicación en voladura; a estas últimas se las conoce como “*propiedades de tiro*”.

En conjunto deben garantizar la estabilidad del explosivo en su manipuleo, transporte, almacenaje y uso, pero también eventualmente influyen en la ocurrencia de algunos fenómenos inconvenientes como la segregación, exudación, desensibilización, endurecimiento y otros, que deben prevenirse.

Con excepción de la nitroglicerina y algún otro compuesto líquido, los explosivos en su mayoría son sólidos, algunos homogéneos y compactados como el TNT colado, otros heterogéneos y semisólidos como la dinamita, llegando a granulares sueltos como ocurre con la pólvora y el ANFO.

El color, aroma, textura, son muchas veces características identificatorias de tipo y hasta de marca.

En forma general mencionaremos algunas propiedades vinculadas al aspecto físico y manipuleo:

A. Plasticidad.- Capacidad que tiene un cuerpo para moldearse, bajo la acción de una fuerza, tomar forma y mantenerla después de retirarse dicha fuerza, como se observa en los explosivos plásticos y gelatinas explosivas como la dinamita semigelatina de la Figura N° 02. La plasticidad disminuye con el tiempo o con el frío y es contraria a la elasticidad y a la rigidez.



Figura N° 02. Dinamita semigelatina Famesa.

B. Viscosidad.- Consistencia ligosa o glutinosa debido a la fricción interna de las moléculas, causada por su resistencia a fluir o cambiar inmediatamente de forma cuando se les somete a deformación por presión, corte o penetración. Cuanto más viscoso, más lento el cambio.

La viscosidad es propia de los aceites, slurries y emulsiones como las emulsiones explosivas encartuchadas de la Figura N° 03. Conforme más viscosos son, se contienen mejor en los taladros fisurados, mientras que los acuosos tienden a filtrarse por las grietas.



Figura N° 03. Emulsión explosiva encartuchada Famesa.

C. Fluidéz.- Capacidad de fluir y desplazarse que corresponde a los cuerpos líquidos y gases, cuyas moléculas tienen poca adherencia entre sí y toman la forma del depósito que los contiene (ejemplo: nitroglicerina y nitroglicol).

Viscosidad y fluidéz son importantes en el carguío mecanizado de productos acuosos a granel, como las emulsiones.

D. Flujo (free flowing).- Es la capacidad que muestra un explosivo granular seco para fluir libremente o deslizarse bajo su propio peso desde su contenedor, transportarse libremente por la manguera durante el carguío neumático, y para llenar rápida, fácil y completamente un taladro de voladura. Es condición importante que los explosivos no encartuchados diseñados para carguío neumático como el ANFO de la Figura N° 04. Depende fuertemente del contenido de humedad del explosivo; con incrementos del 0,5 al 1% la fluibilidad decae drásticamente.



Figura N° 04. Nitrato de Amonio energizado ANFO – Famesa.

E. Tendencia a la compactación.- Se refiere a la facilidad que presentan algunos explosivos para compactarse o convertirse en una masa coherente, con total pérdida de su fluibilidad y adicionalmente considerable reducción de su detonabilidad. Esto ocurre frecuentemente con el Nitrato de Amonio que en muchos casos requiere ser recubierto por algún agente antiaglomerante (*anticaking*), como diatomita o productos orgánicos (*hidrocarburos*).

F. Friabilidad.- Los explosivos friables, al contrario de los plásticos, tienden a desmenuzarse o a pulverizarse cuando son manipulados excesivamente o transportados neumáticamente, contaminando la atmósfera con partículas diminutas dispersos, dependiendo esto de la fragilidad de sus gránulos (*prills*).

Esta característica debe ser tomada en cuenta para el transporte a gran distancia por malas carreteras, donde los gránulos se pulverizan con maltrato del viaje.

Por lo contrario, la friabilidad es una cualidad en minerales y rocas, en las que representa la facilidad de fracturarse homogénea y fácilmente. Una roca friable es adecuada para voladura.

G. Homogeneidad.- En los explosivos acuosos y dinamitas se refiere a su textura uniforme y en los pulverulentos a su grado de pulverización, mientras que en los granulares sueltos esta propiedad se refiere a las especificaciones de distribución de sus granos por tamaño, según malla o tamiz (también denominada “*composición granulométrica*”).

Un *agente de voladura* demasiado fino como el ANFO tiende a llenar por completo el taladro, mejorando el grado de acoplamiento y de compactación, pero corriendo el riesgo de desensibilizarse.

Generalmente ambas características se determinan por análisis de malla utilizando un juego de tamices de aperturas cada vez más pequeñas para fraccionar la muestra por tamaños, lo que se indica en porcentajes de malla (*sieve size*).

H. Porosidad.- Es el radio del volumen de intersticios o huecos contenidos en un material respecto a su propio volumen o masa. Es un factor importante en los gránulos o perlas de Nitrato de Amonio para absorber al petróleo en la preparación de los nitrocarbonitratos (NCN) como el ANFO.

Cada explosivo tiene ciertas características o propiedades que lo diferencia de los otros. Los científicos de la industria de los explosivos han desarrollado, tanto métodos de medición de estas propiedades, como formas de relacionar a algunas de ellas con el rompimiento de la roca. A continuación se mencionan dichas propiedades:

- Velocidad de detonación
- Densidad
- Presión de detonación
- Presión del taladro
- Energía
- Sensibilidad
- Resistencia al agua
- Humos
- Flamabilidad
- Características de seguridad

CAPÍTULO II. NITRATO DE AMONIO

2.1. Reseña Histórica.- J. R. Glauber fue el primero en sintetizar el nitrato de amonio en 1659, combinando ácido nítrico con carbonato de amonio, y no fue hasta principio del siglo 19 cuando fue considerado para uso en explosivos por Grindel y Robin como un reemplazante del Nitrato de Potasio en la pólvora negra. Estas propiedades explosivas también fueron reportadas en 1849 por Reise y Millon cuando una mezcla de nitrato de amonio en polvo y carbón hizo explosión con calentamiento. El Nitrato de Amonio (al que nos referimos comúnmente como “NA”), al cual Glauber bautizó con el nombre de “*nitrum flammans*”, se da en la naturaleza rara vez y en cantidades muy pequeñas. Hoy en día, este compuesto químico tiene dos usos muy diferentes y ampliamente reconocidos: 1) es un fertilizante importante en la industria agrícola; y 2) constituye el ingrediente básico de muchos explosivos comerciales, en donde cumple la función de oxidante.

Las propiedades explosivas del Nitrato de Amonio fueron usadas por primera vez en 1867 por Alfred Nobel en reemplazo parcial de la nitroglicerina en las dinamitas. A pesar de que existen patentes que datan desde 1870, y que muestran la formulación de explosivos conteniendo sólo Nitrato de Amonio e ingredientes combustibles, no fue sino hasta 1935, cuando la empresa duPont introdujo un “*agente de voladura*” enlatado llamado “*Nitramon*”, que dichas formulas adquirieron un uso práctico. Este producto contenía DNT como sensibilizador, de modo que no se compara desde el punto de vista de su importancia histórica con los agentes de voladura introducidos en la década de los cincuenta.

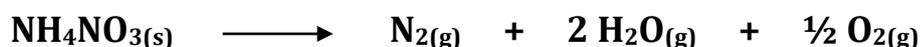
En 1953 se inició la experimentación en operaciones de voladura con una mezcla de nitrato de amonio de grado fertilizante en prills (FGAN, por sus siglas en inglés) y polvo de carbón, en una mina de tajo abierto en el estado de Indiana. La mezcla venía empaquetada en tubos grandes de polietileno, y se la cebaba con cargas de dinamita de 20 libras (9 kg). Es una creencia generalizada que este producto se desarrolló debido a la publicidad generada por el desastre de la ciudad de Texas (EE.UU.) ocurrido el 16 de abril de 1947, en el cual dos barcos (“*Grandchamp*” y “*Highflyer*”) cargados con fertilizante de nitrato de amonio estallaron. En realidad, dicha explosión ocurrió con Nitrato de Amonio granulado, no en prills, otro desastre sucedió el 28 de julio del mismo año, el barco “*Ocean Liberty*” explotó en la ciudad de Brest (Francia), y en 1947 el momento “*aún no había llegado*” para el nuevo material de voladura. La razón del éxito de los experimentos realizados en Indiana se debió a que los prills eran fáciles de conseguir (hacia 1948 toda la producción de fertilizantes en los EEUU se había convertido al sistema de prills), y a que la perforación en seco de taladros de diámetro grande en las minas de superficie empezaba a convertirse en la norma común. El hombre responsable de este nuevo producto fue Bob Akre de las Minas de Carbón Maumee, y el producto se denominó “*Akremita*”. Muy poco tiempo después del anuncio del experimento en Mayo de 1955, otras minas empezaron a utilizar prills mezclados con combustible diesel común N^o 2 y, muy pronto, el nombre “*ANFO*” había sido ya adoptado.

El método Akremita de empaquetado en bolsas plásticas pronto fue reemplazado por ANFO embolsado, para su vertimiento directo en los taladros o para el mezclado en el lugar de trabajo (o incluso “*en el taladro*”) de prills de NA con aceite combustible. Los camiones de carguío a granel se emplearon para el cargado directo al taladro ya desde 1956.

2.2. Química del Nitrato de Amonio.- Es una sal inorgánica higroscópica e inodora de color blanco a incoloro de forma granular o cristalina, cuya fórmula química es:



Posee 60% de oxígeno en su composición; en presencia de aire, con una humedad superior al 60%, puede convertirse en líquido. Aisladamente no es un explosivo, pero bajo ciertas condiciones como el confinamiento y cebado puede reaccionar violentamente de acuerdo a la siguiente reacción:



Calor total de la explosión liberado (Qe) = 1 440 kJ/kg = 344 kcal/kg

El Nitrato de Amonio adquiere una de las siguientes cinco formas de cristalización que posee dependiendo de la temperatura; cuando se mezcla con una determinada cantidad de combustible adquiere propiedades explosivas reaccionando violentamente con él, aportando el oxígeno necesario. Se obtiene por reacción química entre el amoníaco y el ácido nítrico, ocasionalmente presenta un ligero olor a amoniaco. Las propiedades físico-químicas del Nitrato de Amonio se muestran en la Tabla N° 01.

En todos los explosivos industriales modernos, el ingrediente de mayor injerencia es el nitrato de amonio. Sea que se trate de las dinamitas tradicionales, de los agentes de voladura granulados o de los explosivos en emulsión. El nitrato de amonio representa, en promedio, entre 70 y 95% de la composición global del explosivo.

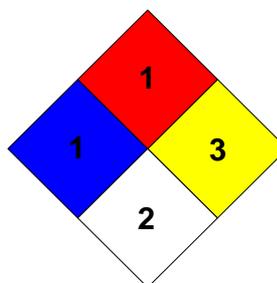
La utilización del nitrato de amonio se remonta a muchos años atrás y el descubrimiento de sus propiedades explosivas se debió a dos tragedias que sucedieron en los años 40's del siglo pasado, una en Texas (EE.UU.) y la otra en Brest (Francia). Con ello se demostró el potencial explosivo del nitrato de amonio, que luego dio origen, al desarrollo de una nueva técnica de fabricación, el proceso granulado.

El potencial económico del nitrato de amonio como agente explosivo se aprovechó recién en el año de 1955, cuando H. B. Lee y R. L. Akre patentaron el uso del nitrato de amonio fertilizante.

En los Anexos se presenta la Ficha Técnica de Seguridad (Material Safety Data Sheet – MSDS) del Nitrato de Amonio de la empresa peruana EXSA S. A., el cual nos brinda información técnica, peligros y riesgos del material, así como la forma correcta de manipulación, almacenamiento, transporte y las acciones que hay que tomar en casos de emergencia.

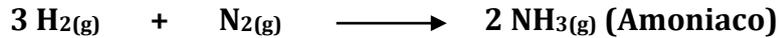
Tabla N° 01. Propiedades Físico-Químicas del Nitrato de Amonio.

Densidad	1,72 g/mL (20 °C)
Peso Molecular (ó masa molar)	80,04 g/mol
Densidad aparente	~ 600 - 700 kg/m ³
Valor de pH	4,5 - 7,0 (100g/L (20 °C))
Solubilidad en agua	1920 g/L (20 °C)
Solubilidad en etanol	38 g/L (20 °C)
Punto de ebullición	210 °C (483 K)
Punto de fusión	169 °C (442 K)
Descomposición térmica	> 210 °C (483 K)
Energía de formación	- 4424 kJ/kg
Entalpía de formación	- 4563 kJ/kg
Tipo de cristales: α - forma tetragonal β - forma ortorrómbica (Pseudotetragonal) γ - forma ortorrómbica δ - forma tetragonal ϵ - forma cúbica regular (Isométrico)	Rango de temperatura: (°C) - 18 a - 16 - 16 a 32,1 32,1 a 84,2 84,2 a 125,2 125,2 a 169,6
Número CAS	6484-52-2
Número UN	1942
Frase R	R 8-9
Frase S	S 15-16-41
Etiqueta de peligrosidad	Material oxidante (5.1)
Clasificación de Riesgo (NFPA)	
Health (Salud)	: 1 (color azul)
Flammability (Inflamabilidad)	: 1 (color rojo)
Reactivity (Reactividad)	: 3 (color amarillo)
Specific hazard (Riesgo específico: contacto)	: 2 Oxidante (color blanco)
(0): No especial (1): Ligero (2): Moderado (3): Severo (4): Extremo	



2.2.1. Síntesis del Nitrato de Amonio.- Se obtiene por reacción química entre el Amoniacó y el Ácido Nítrico.

El Amoniacó se obtiene de la siguiente reacción:

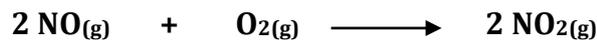


El Ácido Nítrico se obtiene a partir del mismo Amoniacó a través de una serie de reacciones químicas:

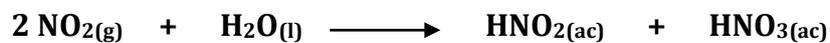
➤ Primero se le agrega oxígeno (O_2), al amoniacó (NH_3) para producir óxido nítrico (NO) y agua (H_2O):



➤ Luego, el óxido nítrico obtenido, se oxida rápidamente a dióxido de nitrógeno (NO_2):



➤ Seguidamente el dióxido de nitrógeno se disuelve en agua y es transformado en ácido nitroso (HNO_2) y ácido nítrico (HNO_3):



Es importante saber que el nitrato de amonio no existe en la naturaleza, éste se elabora a partir del amoniacó y el ácido nítrico mediante la siguiente reacción química:



La producción de Nitrato de Amonio es un proceso de múltiples pasos descritos anteriormente, por lo que podemos mostrar en la Figura N° 05:

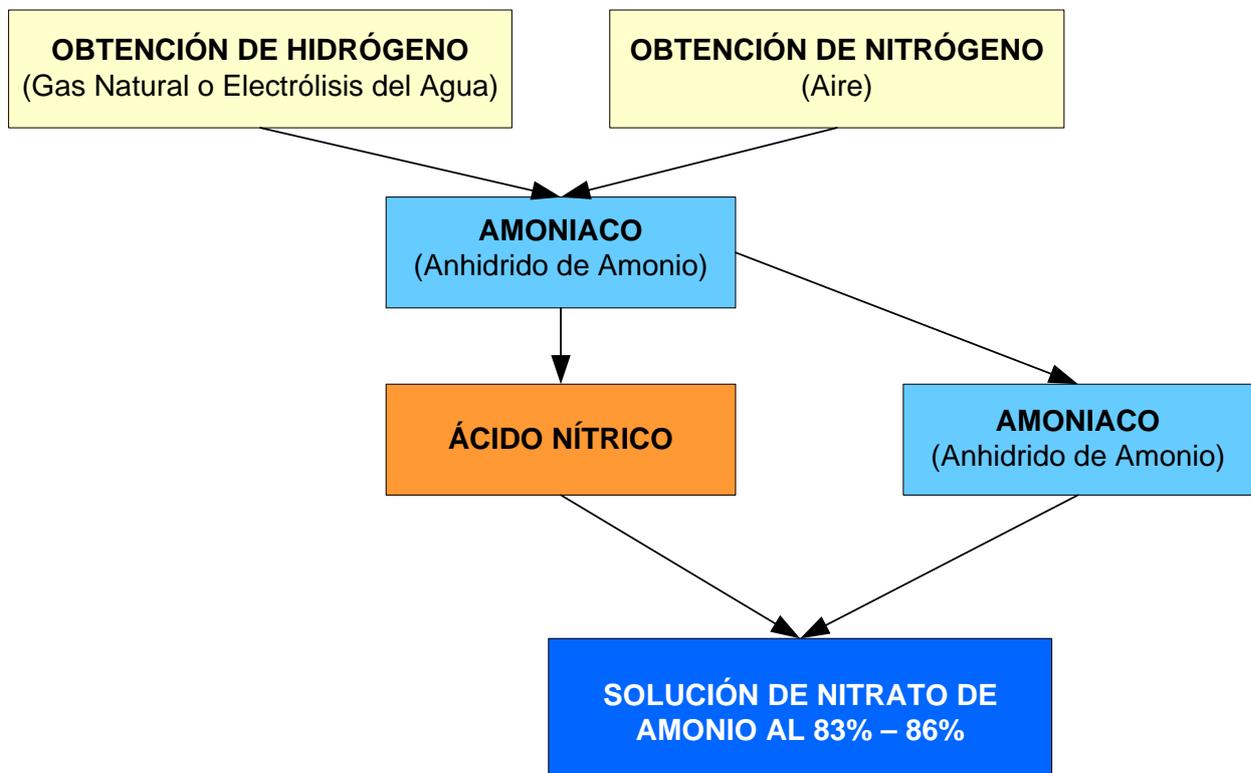


Figura N° 05. Proceso de Síntesis del Nitrato de Amonio.

2.2.2. Tipos de Nitrato de Amonio.- Existen básicamente dos tipos; Nitrato de Amonio Fertilizante (o Agrícola) y Nitrato de Amonio Técnico, cuyas características se detallan a continuación:

A. Nitrato de Amonio Fertilizante (33,0% de Nitrógeno).- Cuyas características son: cristalino, compacto, con cobertura de diatomita y su uso primordial es como fertilizante, no apto para voladura.

B. Nitrato de Amonio Técnico (34,5% de Nitrógeno).- Se presenta en dos tipos: cristalino y granular poroso, con cobertura de hidrocarburos, apto para la elaboración de explosivos de uso industrial como Agentes de Voladura. El nitrato de amonio, técnico cristalino o granular no poroso ("*prill compacto*"), se usa en la fabricación de dinamitas y emulsiones como componente oxidante, mientras que el granular poroso ("*prill poroso*") se emplea en la preparación de Anfo, es por eso que también se le denomina "*Nitrato de Amonio Grado Anfo*".

2.2.3. Proceso de elaboración del Nitrato de Amonio.- En la Figura N° 06 se muestran en forma resumida los procesos de obtención de los diferentes tipos de Nitrato de Amonio.

Para obtener un Nitrato de Amonio Técnico, con prills compactos, se emplea un proceso en el que la solución concentrada se dispara o proyecta contra un disco giratorio dentro de una torre de prillado; obteniendo gránulos irregulares de tamaño heterogéneo y más denso, ligeramente por encima de 1,7 g/mL ("*Proceso Montecatini*").

El Nitrato de Amonio poroso se obtiene mediante un proceso, en donde la solución concentrada (94 a 96%) es rociada a través de placas perforadas o cánulas en la parte superior de una torre de 30 a 61 m de altura, contra una corriente de aire caliente formando gotitas líquidas de nitrato de amonio, que durante la caída hace que el agua de la solución, se evapore completamente, produciendo partículas esféricas porosas, redondeados y menos densas al generarles poros internamente (*prill poroso*). Los prills así producidos son enfriados, secados y revestidos con agentes antiaglutinantes (*anticaking*) para hacerlas fluir libremente. Estas torres de prillado son mucho más altas que las que se usan para obtener el grado técnico. En la Figura N° 07 se muestra la Planta Química de Nitrato de Amonio más moderna de Sudamérica de la empresa Enaex S.A. localizada en Mejillones Chile, se observa la torre de prillado de 50 m de altura aproximadamente, donde se elabora el nitrato de amonio poroso de baja densidad "*PRILLEX*".

Con el "*Proceso Kaltenbach*" se elabora un nitrato de amonio poroso con una densidad de 0,75 a 0,78 g/cm³; absorción de petróleo de 9,0 a 15,0%; tamaño de prill pequeño y más duro; y menor cantidad de finos.

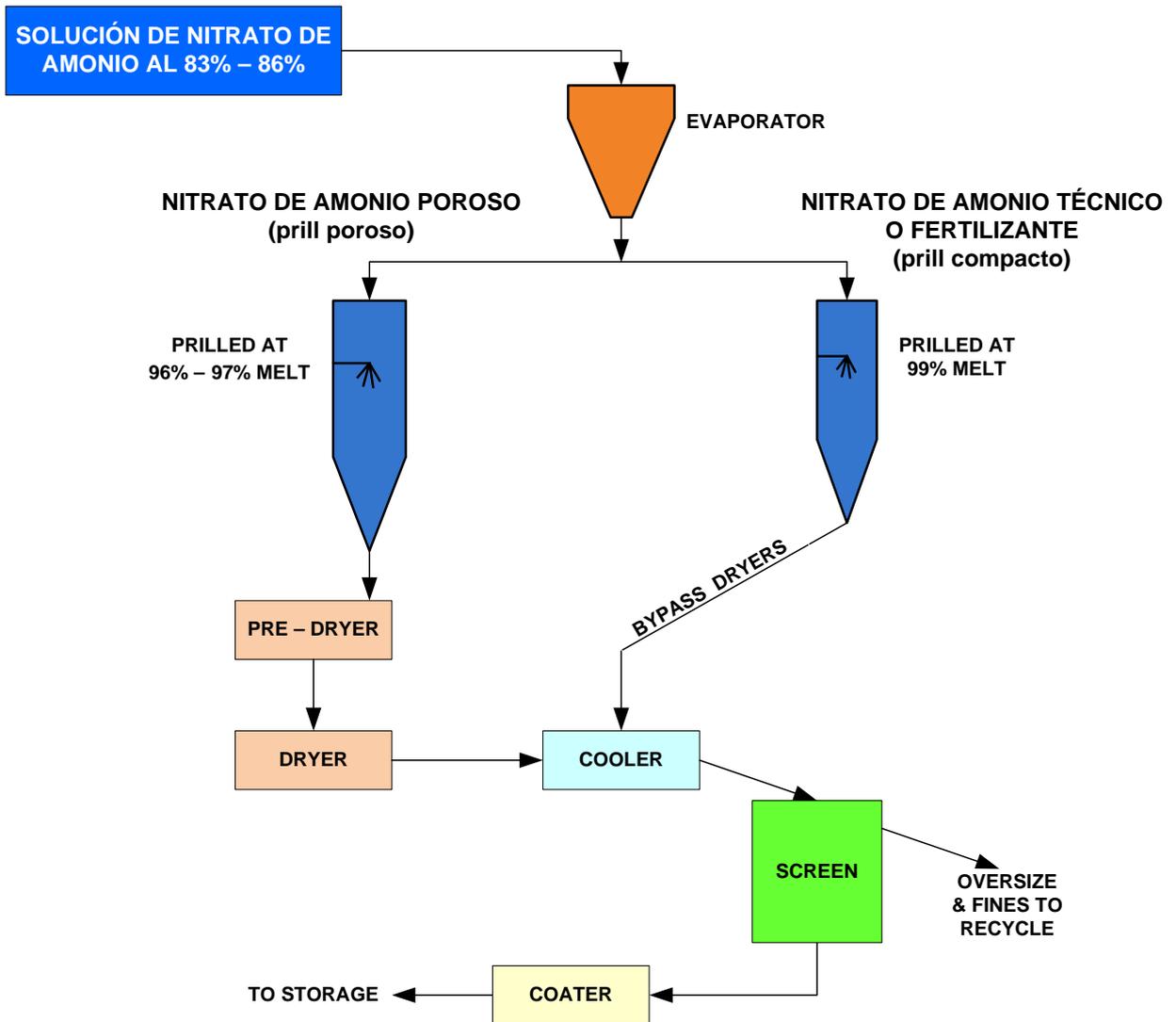


Figura Nº 06. Proceso de Elaboración del Nitrato de Amonio poroso y técnico.

En el Capítulo III se describe la caracterización del Nitrato de Amonio Técnico que se emplea como insumo para la elaboración de los explosivos de uso industrial como Agentes de Voladura en sus dos presentaciones:

Nitrato de Amonio Grado Anfo (prill poroso), llamados también: Nitrato de Amonio de Baja Densidad, Nitrato de Amonio prill grado Anfo, Nitrato de Amonio técnico grado Anfo, Nitrato de Amonio poroso grado Anfo, Nitrato de Amonio prill poroso, Nitrato de Amonio poroso, Nitrato de Amonio poroso grado explosivo, o Nitrato de Amonio poroso grado industrial.

Nitrato de Amonio Técnico (prill compacto), llamados también: Nitrato de Amonio de Alta Densidad, o Nitrato de Amonio prill grado Técnico.

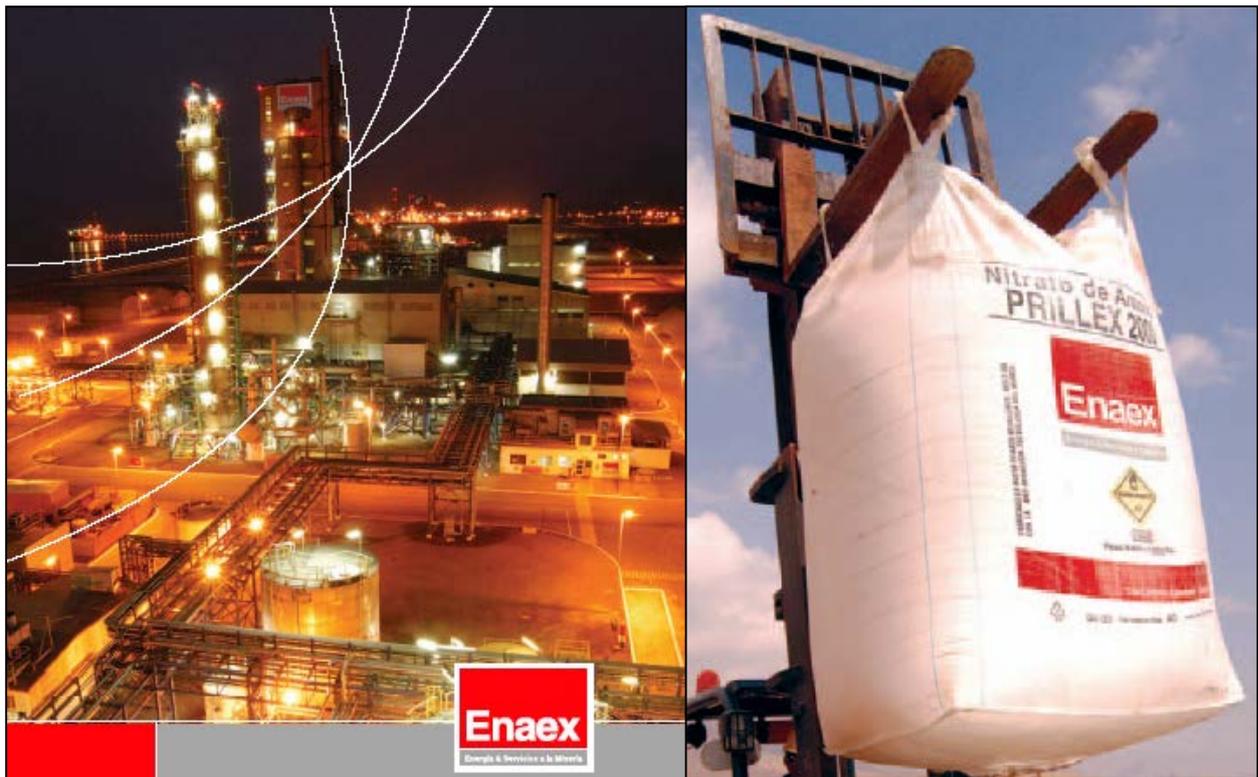


Figura Nº 07. Planta Química de elaboración del Nitrato de Amonio Poroso de baja densidad marca “PRILLEX” de la empresa chilena Enaex S.A., al fondo se observa la torre de prillado de 50 m de altura aproximadamente.

Se debe tener en cuenta la facilidad que tiene el Nitrato de Amonio de cambiar su estructura cristalina cuando las temperaturas de almacenamiento son extremas, el efecto de la temperatura es mayor en el Nitrato de Amonio prill poroso que en el Nitrato de Amonio prill compacto, a este fenómeno se le llama Ciclado del Nitrato de Amonio, y puede afectar seriamente el almacenamiento y desempeño de cualquier explosivo o Agente de Voladura que contenga Nitrato de Amonio en forma de prill poroso.

Las temperaturas a las cuales ocurre el ciclado en condiciones normales son $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $32,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto significa que los productos que se almacenan durante el invierno y por periodos largos durante el verano, sobre todo en áreas de clima extremo, sufrirán grados de ciclado. En el verano en un Polvorín con poca ventilación o en un silo de almacenamiento con exposición directa al sol, la temperatura de ciclado puede alcanzarse con facilidad. El efecto del ciclado en el nitrato de amonio cuando éste se encuentra aislado de la humedad ambiente es que las prills se rompen en partículas cada vez más finas.

Las consecuencias por efecto del ciclado pueden ser mayores, ya que la calidad del Nitrato de Amonio se pierde por aglomeración de prills o poca capacidad de absorber el petróleo, lo que implica que la reacción química no libera la cantidad de energía necesaria para el fracturamiento. Además, en estos casos lo más probable es que se generen gases no deseados dado que la reacción química no es la correcta.

Los prill están formados por cristales pseudotetrales. Cuando la temperatura sobrepasa los 32,1 °C cada cristal se rompe en cristales ortorrómbicos más pequeños como se observa en la Figura N° 08. Al bajar nuevamente la temperatura, los pequeños cristales se rompen en cristales más finos aún, manteniendo una forma pseudotetrales. Este proceso puede continuar hasta que la densidad aumente de 0,8 g/mL, alcanzando valores cercanos a 1,2 g/mL. Este incremento en la densidad puede hacer que el producto contenga más energía por unidad de volumen.



Figura N° 08. Al lado izquierdo se observa los prill color naranja y al lado derecho el efecto causado por la temperatura cuando se sobrepasa los 32,1 °C.

Como recomendación general, el Nitrato de Amonio poroso deben almacenarse protegidos de la lluvia y rayos solares, preferiblemente en un medio seco con buena ventilación y respetando las distancias de seguridad establecidas por las autoridades como se muestra en la Figura N° 09, y se debe rotar bajo la regla FIFO, el primero que entra, es el primero en salir.

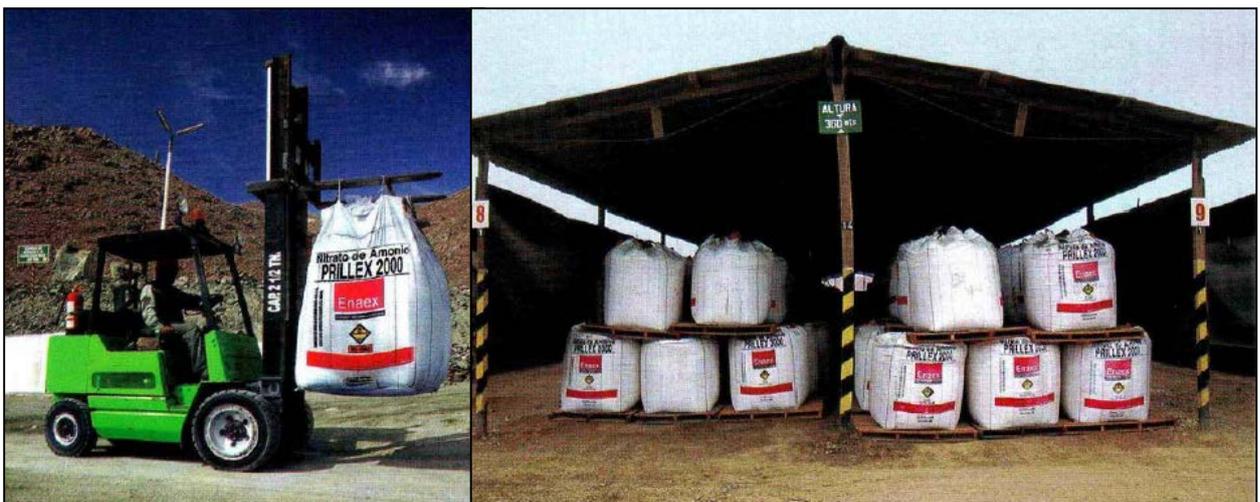


Figura N° 09. Traslado y Almacenamiento de Nitrato de Amonio Grado Anfo PRILLEX.

2.3. Agentes de Voladuras.- Los explosivos de uso industrial empleados en voladura de rocas llamados también “*Agentes de Voladuras*” fabricados a base de Nitrato de Amonio, actúan con base a una reacción físico-química de combustión muy rápida que comprende a tres elementos: oxidante, combustible y sensibilizador.

El *oxidante* proporciona oxígeno al *combustible* para arder y generar humo, vapor de agua, cenizas y calor en forma convencional y es el *sensibilizador*, el que en cierta forma actúa como un incentivador para acelerar la reacción al nivel de explosión, incrementando enormemente la temperatura con la que los humos y gases sobrecalentados tienden a expandirse casi instantáneamente para producir los efectos de trituración y desplazamiento de la roca.

Los agentes de voladura también son catalogados como “Explosivos Secundarios Compuesto”, y requieren de un cebo potente de alta energía y velocidad para iniciarlos, como por ejemplo; Booster y Dinamitas que son aumentadores altamente energéticos.

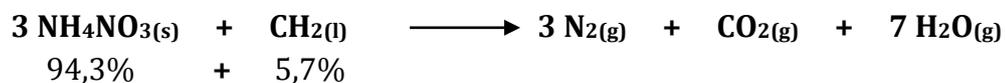
A continuación describiremos los agentes de voladuras mas usados en la actividad minera: Anfo, Emulsiones, Anfo Aluminizado y Anfo Pesado.

A. Anfo.- Es un agente de voladura granular, seco, compuesto por una mezcla de nitrato amonio poroso y petróleo diesel N° 2.

No existe solamente un Anfo, la acción explosiva depende en alto grado de las condiciones de voladura y de sus características físico-químicas. Por ejemplo la eficiencia del Anfo aumenta en cuanto la porosidad del nitrato de amonio es más alta y, en consecuencia, la densidad de carga del explosivo es menor. Estos poros garantizan la absorción y retención del agregado combustible y actúan como elementos sensibilizadores en su detonación.

En ocasiones se trata de mejorar las performances del Anfo añadiéndole aluminio u otros aditivos, que aun así tienen limitaciones en resistencia al agua.

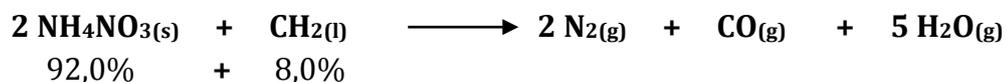
La mezcla ideal, porcentajes en pesos, corresponde al 94,3% de nitrato de amonio (componente oxidante) y 5,7% de petróleo (componente combustible); con ello se obtendrá un mejor balance de oxígeno en la detonación, esta mezcla óptima proporciona el 100% de energía útil y la menor generación de gases nocivos.



Calor total de la explosión liberado (Qe) = 3 900 kJ/kg = 931 kcal/kg

Una variación en el porcentaje de petróleo desequilibra el balance:

➤ Con exceso de petróleo (más de 5,7%), la energía decae y se genera exceso de monóxido de carbono (CO):



Calor total de la explosión liberado (Qe) = 3 400 kJ/kg = 812 kcal/kg



Figura N° 11. Agentes de Voladura del tipo Nitrocarbonitrato “ANFO”: Superfam DOS y Examon de los fabricantes Famesa Explosivos S.A.C. y Exsa S.A., respectivamente.

En los Anexos se presenta la Ficha Técnica de Seguridad (Material Safety Data Sheet – MSDS) del Agente de Voladura del tipo Nitrocarbonitrato “ANFO”: Examon P de la empresa EXSA S. A., el cual nos brinda información técnica, peligros y riesgos del explosivo, así como la forma correcta de manipulación, almacenamiento, transporte y las acciones que hay que tomar en casos de emergencia.

B. Emulsiones.- Una emulsión es una mezcla compacta de dos líquidos que no se disuelven uno a otro con una fase líquida uniformemente dispersa a través de la segunda fase; consisten en dispersiones de soluciones acuosas de oxidantes en un medio oleoso, o emulsión de “*agua en aceite*” tal como se ilustra en la Figura N° 12, es precisamente esta estructura única, y el elevado porcentaje de oxidante en relación al combustible, lo que le da a los explosivos en emulsión sus características especiales. Comprenden dos tipos:

Emulsiones explosivas (sensibilizadas), y

Emulsiones no explosivas (no sensibilizadas o emulsión matriz).

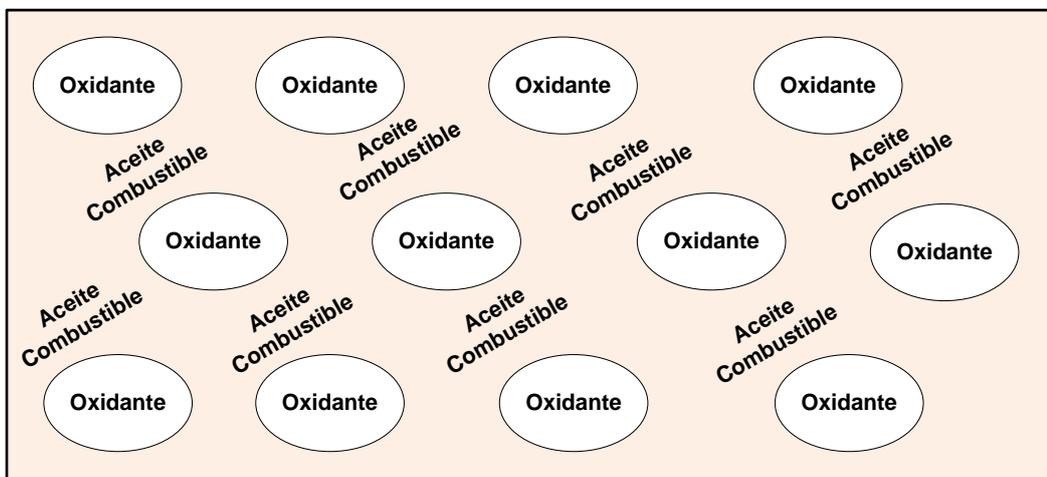


Figura N° 12. Oxidante rodeado de aceite combustible.

B.1. Emulsión Sensibilizados (explosivos).- Las emulsiones explosivas son de tipo “agua en aceite”, componiéndose de dos fases líquidas, una continua, básicamente constituida por una mezcla de hidrocarburos (fase oleosa) y otra dispersa (fase acuosa), que son microgotas de una solución acuosa de sales oxidantes, con el nitrato de amonio como principal componente.

Es importante en su fabricación la elección del agente tenso activo emulsificador y la dispersión ultra fina de la solución acuosa a temperaturas relativamente altas. Por su naturaleza aerófila se hace necesario emplear microburbujas de aire en microesferas de vidrio, como regulador de densidad y de la sensibilidad al iniciador (eventualmente perlita o compuestos gasificantes).

Los componentes de las emulsiones sensibilizadas o explosivas más comunes, se muestra en la Tabla Nº 02, y en la Figura Nº 13 se presenta dos productos de Emulsiones Explosivas de dos fabricantes nacionales.

Tabla Nº 02. Componentes de la Emulsión Sensibilizada.

FASE ACUOSA (SOLUCIÓN OXIDANTE)	FASE OLEOSA (SOLUCIÓN COMBUSTIBLE)	SENSIBILIZADOR
1. Nitrato de Amonio. 2. Nitrato de Sodio. 3. TioUrea. 4. Agua.	1. Aceite Mineral. 2. Cera Microcristalina. 3. Parafina. 4. Emulsificante.	1. Microesferas de vidrio. 2. Aluminio en polvo como energizante. 3. Nitrito de Sodio como gasificante.



Figura Nº 13. Emulsiones explosivas encartuchadas: Emulnor y Emulex de los fabricantes Famesa Explosivos S.A.C. y Exsa S.A., respectivamente.

B.2. Emulsión Matriz (no explosivas).- Llamado también “*Solución Acuosa de Nitrato*”, consiste en gotitas sub-microscópicas de una solución oxidante (fase acuosa) en una matriz continua de combustible (fase oleosa) como por ejemplo: Petróleo diesel o aceite mineral. El Emulsificante, agente de superficie, constituye un elemento esencial de la emulsión pues brindan estabilidad a la mezcla, carecen de un elemento sensibilizador en su composición por lo que no detonan al ser iniciados con un cebo reforzador de alta presión; la sensibilización, por lo general, se produce mediante el empleo de microesferas o saturación por gases químicos.

Una ventaja importante es su facilidad de mezcla con el Anfo para formar Anfo pesado, y su aplicación está dirigida a taladros con agua de mediano a gran diámetro en tajos abiertos, o perforados en roca muy competente; además constituye la base para la elaboración de productos subsecuentes.

Los componentes de la emulsión matriz no explosiva más comunes, se muestra en la Tabla N° 03.

Tabla N° 03. Componentes de la Emulsión Matriz.

FASE ACUOSA (SOLUCIÓN OXIDANTE)	FASE OLEOSA (SOLUCIÓN COMBUSTIBLE)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Nitrato de Amonio. 2. Nitrato de Sodio. 3. TioUrea. 4. Agua. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Petróleo Diesel sin aditivo. 2. Aceite Mineral. 3. Emulsificante.

La viscosidad de las emulsiones puede ser graduada desde una emulsión líquida similar a una leche de magnesia hasta una viscosidad semejante a una margarina, lo que permite su carga al taladro tanto en forma encartuchada como a granel mecanizada, por bombeo directo al fondo del mismo para desplazar al agua.

A mediados de la década de los 90, los productos en emulsión estaban ya en condiciones de igualar muchas de las características de rendimiento de las dinamitas de diámetro pequeño, por lo que mercado de las emulsiones continúa expandiéndose. En la Figura N° 14 se muestra el diagrama de flujo del proceso de fabricación de la Emulsión Matriz no explosiva.

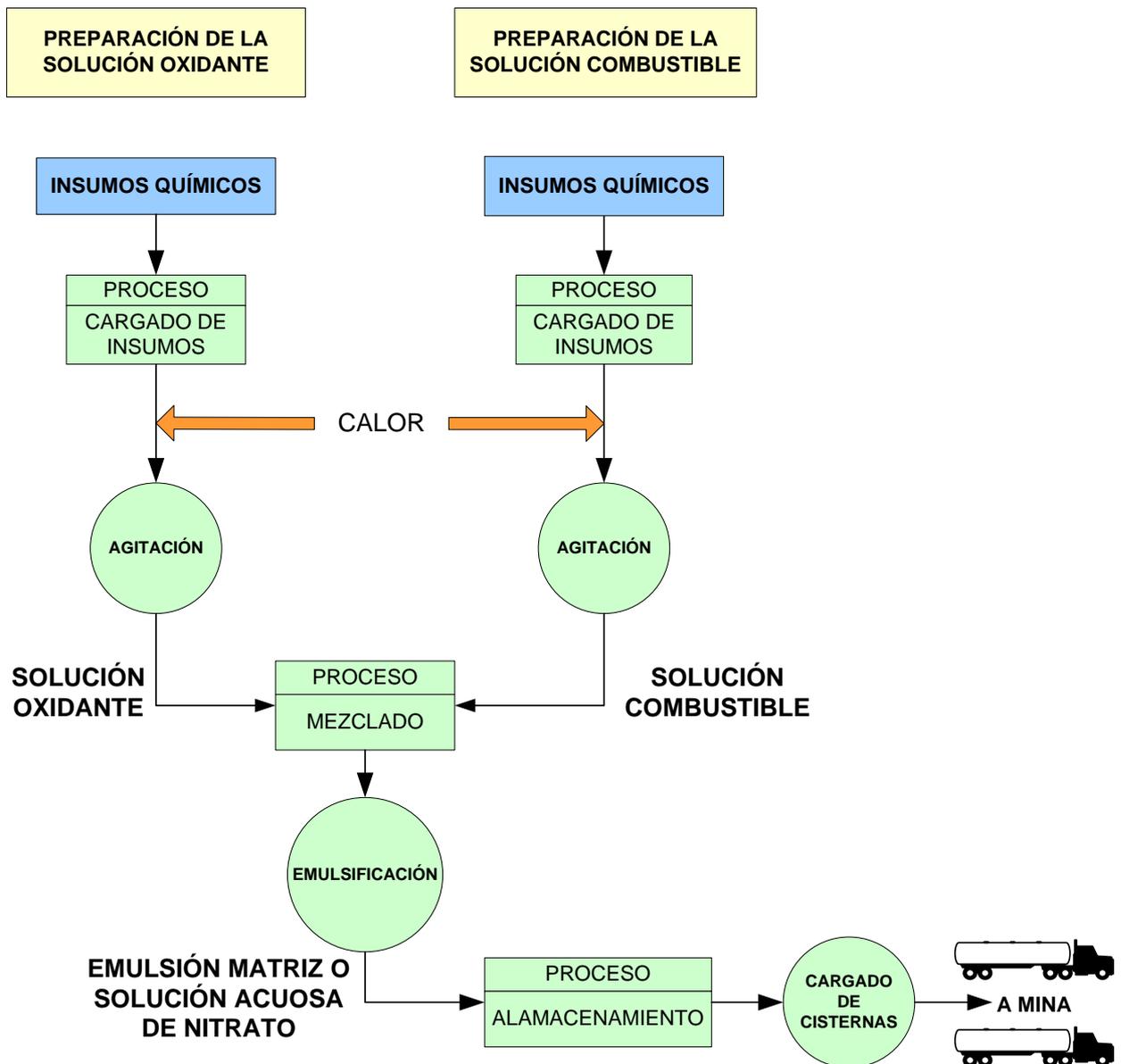


Figura N° 14. Proceso de Fabricación de la Emulsión Matriz no explosiva o Solución Acuosa de Nitrato.

C. Anfo Aluminizado.- Es la mezcla de un Anfo con porcentajes distintos de aluminio. El aluminio contribuye en aumentarle energía al Anfo. Este producto es favorable cuando se hacen trabajos de voladura en terrenos de alta dureza. La reacción química que se desarrolla en la detonación del explosivo es la siguiente:



Calor total de la explosión liberado (Qe) = 6 800 kJ/kg = 1 624 kcal/kg

Como se puede apreciar en la Figura N° 15, un porcentaje mayor al 25% originará un decrecimiento energético del Anfo aluminizado. La reacción del aluminio durante la detonación da a lugar a la formación de óxidos en estado sólido y no productos gaseosos, es por eso que el volumen de gas que se generan con un Anfo aluminizado es menor.

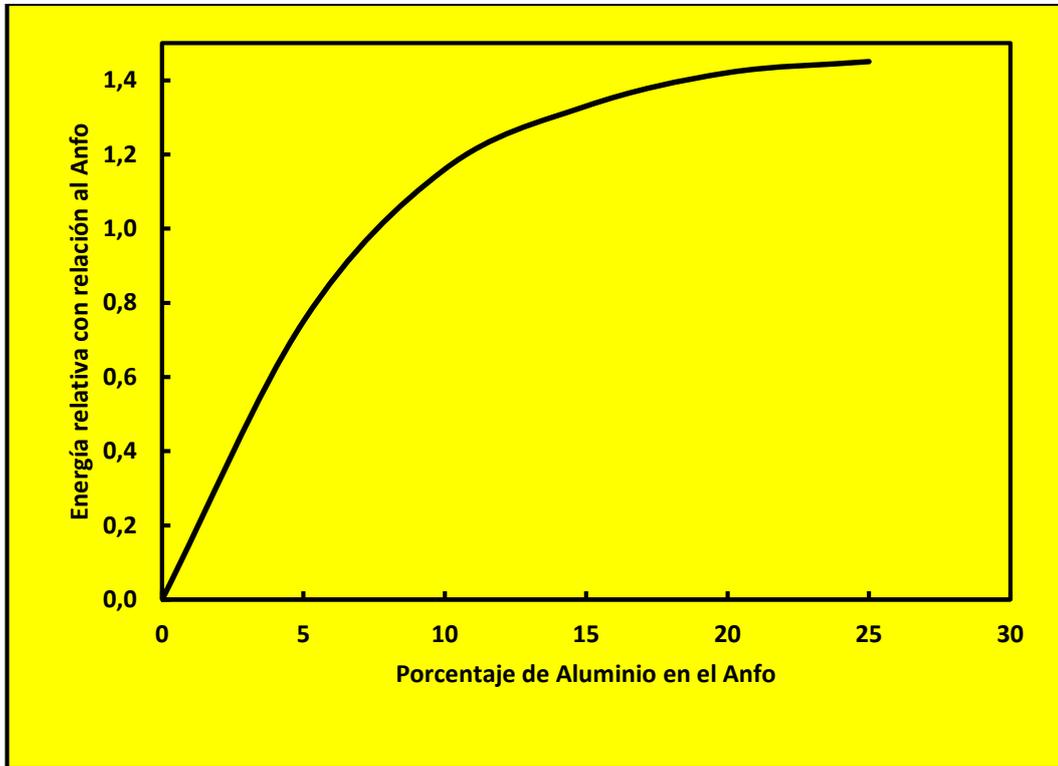


Figura N° 15. Efecto del Aluminio sobre la energía desarrollada con respecto a una misma cantidad de Anfo.

El calor de formación de los óxidos de aluminio es muy alto (aproximadamente 16 260 kJ/kg) y es aprovechado para elevar la temperatura de los gases producidos por la explosión. Este aumento de temperatura reduce el volumen de gases pero éstos, al estar a mayor temperatura, facilitan el trabajo de voladura de rocas.

La adición de aluminio facilita el desarrollo de una mayor cantidad de trabajo potencial para una misma cantidad de explosivo, logrando con ello, ampliar la malla de perforación (burden y espaciamiento); además, contribuye a obtener una mejor fragmentación de roca volada. Estas influencias por el incremento de la adición de Aluminio al Anfo se observa en la Figura 16.

La granulometría y la pureza del aluminio en la mezcla de Anfo aluminizado son muy importante. Casi el 100% del aluminio debe estar entre las mallas N° 20 y 150; mientras que la pureza de ésta debe estar por encima del 94%.

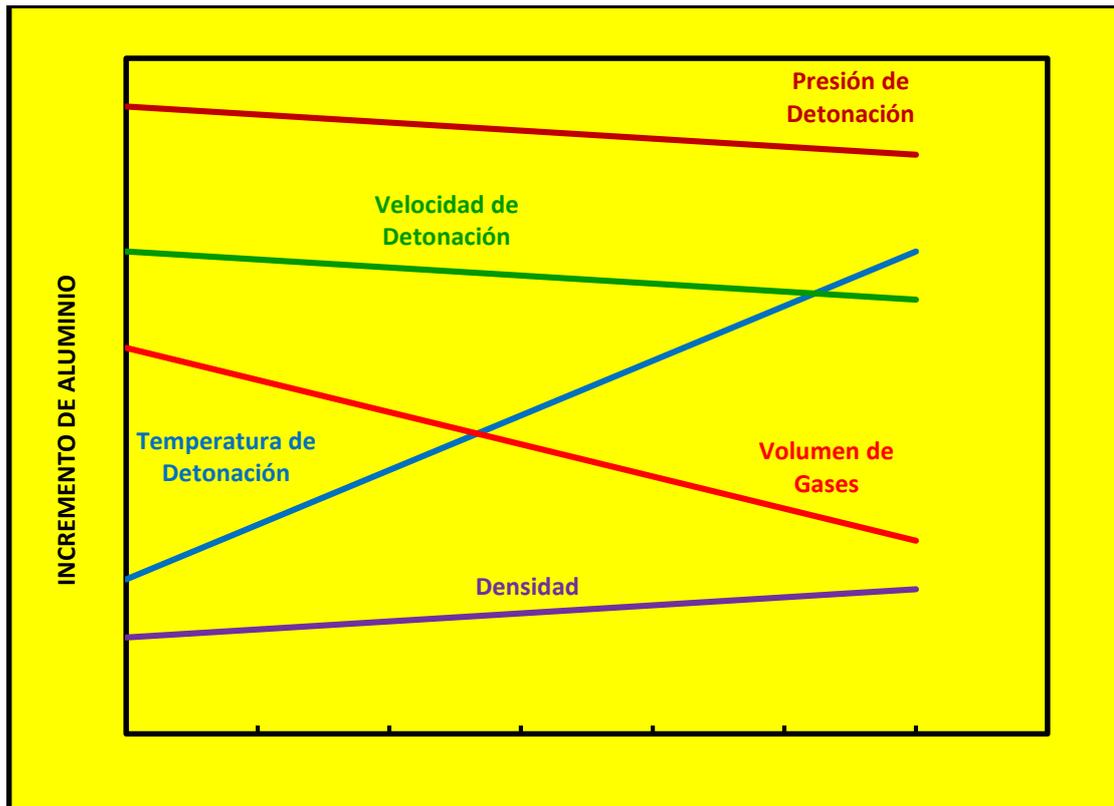


Figura N° 16. La influencia del incremento de la adición de Aluminio al Anfo sobre ideales: velocidad de detonación, presión de detonación, temperatura de detonación, volumen de gases producidos y densidad.

D. Anfo Pesado.- Es una mezcla de Anfo con Emulsión Matriz en porcentajes variables. La emulsión puede estar sensibilizada o no. Las proporciones de emulsión en la mezcla con Anfo está en el rango de 1 a 99%, aunque la mayoría de las mezclas se encuentran dentro del rango de 20:80 a 80:20 de *Emulsión:Anfo*. Las mezclas que contienen menos del 50% de emulsión se denominan Anfo Pesado (*Heavy Anfo*). En algunos casos, la emulsión es mezclada con nitrato de amonio puro en lugar de Anfo, pero dicha emulsión debe contener el aceite combustible suficiente como para mantener el equilibrio de oxígeno en la mezcla. La emulsión actúa en la mezcla como una matriz energética.

La mezcla de Anfo y Emulsión puede ser preparada en una Planta de elaboración o en la misma labor de voladura a través de los llamados camiones fábrica, en la Figura N° 17 se muestra un camión fábrica de la empresa Famesa Explosivos, que reciben previamente la emulsión matriz transportada por camiones cisterna de la Figura N° 18, hasta los silos o depósitos de almacenamiento como se observa en la Figura N° 19 o a dicho camión. Estos camiones pueden preparar las mezclas de emulsión matriz, nitrato de amonio y petróleo en las proporciones adecuadas a las condiciones de trabajo.



Figura N° 17. Camión fábrica de la empresa Famesa Explosivos S.A.C. para el mezclado de Emulsión Matriz, Nitrato de Amonio y Petróleo.



Figura N° 18. Camión cisterna de la empresa Exsa S.A. recibiendo de la Planta de Producción la Emulsión no explosiva para su transporte hacia la mina.



Figura N° 19. Silos o depósitos de almacenamiento de Emulsión Matriz instalados en la mina.

Tres son los propósitos principales que nos llevan a realizar esta mezcla explosiva:

- Aumentar la densidad del Anfo e incrementar la energía dentro del taladro.
- Proporcionar al Anfo mayor resistencia al agua.
- Reducir los costos de voladura en las operaciones mineras.

Estas características las podemos visualizar en la siguiente Figura 20.

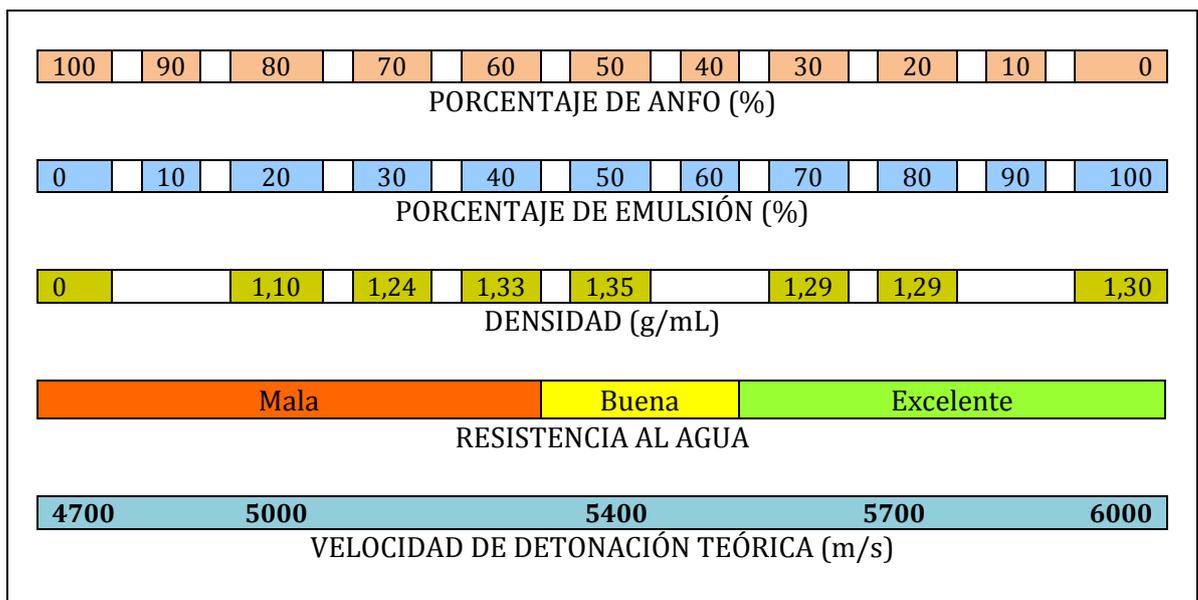


Figura N° 20. Características de carga y resistencia al agua de diferentes tipos de Anfo Pesado.

En algunos casos se le añade al Anfo pesado un porcentaje de aluminio, lo que le dará, en algunos casos, mayor potencia.

Cuando el porcentaje de emulsión aumenta a más de 40%, la potencia relativa empieza a disminuir; esto se debe a la separación que se produce de las partículas de Anfo en dicha mezcla, dificultando la formación eficiente de puntos calientes en el momento de la detonación.

2.4. Características de los Agentes de Voladuras.- Se describe a continuación algunas características respecto del Anfo y las Emulsiones:

A. Velocidad de Detonación.- La velocidad de detonación de un explosivo (**VOD**, por sus siglas en inglés, *Velocity Of Detonation*), es la velocidad a la que la onda de detonación se desplaza a través del explosivo. La velocidad de detonación es el principal componente de la energía de choque y responsable del rompimiento de la roca, y es una variable importante que se emplea para calcular la presión de detonación de un explosivo. La VOD se mide en pies por segundo (p/s) o metros por segundo (m/s).

- La velocidad de detonación del Anfo depende del diámetro del taladro y del grado de confinamiento con el cual este se dispara. La VOD del Anfo aumenta a medida que el diámetro del taladro aumenta. El tipo de confinamiento que rodea al Anfo afecta de manera importante la VOD, así como su habilidad para sostener la detonación de diámetros pequeños.
- Es un hecho comprobado que, a menor tamaño de la partícula de los ingredientes de un explosivo, mayor será su velocidad de detonación. Puesto que el tamaño de las gotitas de las emulsiones es tan fino, la VOD de los explosivos en emulsión es muy alta, cercana a la velocidad teórica. La VOD disminuye hasta cierto punto a medida que el diámetro de la carga también disminuye, o a medida que se agregan sólidos tales como aluminio o prills de nitrato de amonio.

B. Tamaño de las partículas.- El tamaño de las partículas es una característica muy importante que definen el desempeño del explosivo; en lo que concierne al Anfo nos referimos al tamaño del prill y en el caso de las Emulsiones, al tamaño de las gotitas del oxidante.

- El tamaño de los prills de nitrato de amonio (la granulometría) influye en la densidad del explosivo; cuando la granulometría del Anfo se reduce a menos de malla 100, su densidad a granel pasa a ser 0,6 g/cm³, lo que significa que si se quiere conseguir una densidad normal entre 0,80 y 0,85 g/mL para alcanzar unas buenas características de detonación será preciso compactarlo.
- Debido a la necesidad de contar con un balance de oxígeno cercano a cero, los explosivos en emulsión requieren que el volumen de oxidante sea mucho mayor al volumen de aceite, la proporción es aproximadamente 9 a 1. Ya que el volumen relativo del aceite es muy inferior al del oxidante, éste se debe esparcir en una capa

muy delgada con el fin de cubrir todas las gotitas de oxidante. El tamaño de las gotitas es sumamente pequeño y, debido a la proporción oxidante/aceite, éstas adquieren una estructura compleja de poliedros. Las gotitas, por lo general, se encuentran en el rango de 0,2 – 10 micrones de diámetro, ó aproximadamente 1/40 a 1/2000 del tamaño de un grano de sal de mesa.

El tamaño extremadamente pequeño de la partícula de las gotitas del agente oxidante en las emulsiones, da como resultado un contacto mucho más cercano entre el oxidante y el combustible del que se encuentra en cualquier otro explosivo de dos componentes, dos resultados lógicos de esta unión cercana son una velocidad de detonación alta y un diámetro crítico pequeño, esta característica parece ser los responsables de la mayor eficiencia y mejores propiedades de detonación de estos productos.

C. Densidad.- La densidad del explosivo o la densidad de empaquetamiento cuando un explosivo se coloca dentro de un taladro es una de las propiedades más importantes. La densidad determina la sensibilidad, la velocidad de detonación y el diámetro de carga. La densidad, algunas veces denominada gravedad específica, se define como el peso por unidad de volumen y normalmente se expresa en términos de gramos por centímetro cúbico (g/cm^3), o de “*gravedad específica adimensional*”.

- Conforme la densidad del Anfo aumenta, entonces la velocidad de detonación (VOD) se eleva, pero es más difícil conseguir la iniciación. Por encima de una densidad de $1,2 \text{ g/cm}^3$, el Anfo se vuelve inerte no pudiendo ser detonado. La densidad del Anfo puede variar entre 0,80 y 0,85 g/mL y depende de la densidad y el tamaño del prill del nitrato de amonio empleado en la mezcla.
- Debido a que las emulsiones tienen un tamaño de partícula muy pequeño y son una mezcla extremadamente compacta de aceite combustible y oxidante, sólo se necesita añadir un agente de reducción de densidad para que detonen. No es necesario emplear altos explosivos o sensibilizadores químicos para impartir sensibilidad. La densidad se puede reducir mediante aire atrapado durante el mezclado, gas generado químicamente, perlita, plástico expandido, microesferas fenólicas o de vidrio vacías, e incluso prills de nitrato de amonio.

Diferentes agentes reductores de densidad se emplean por razones diferentes, pero las más comunes son las microesferas de vidrio, aunque la gasificación química está adquiriendo popularidad últimamente. Por lo general, mientras menor es la densidad de un explosivo en emulsión, más sensible se vuelve éste.

D. Energía.- La energía teórica o calculada de un explosivo es la diferencia entre el calor de formación de los productos de la explosión y el calor de formación de los ingredientes del explosivo. Esta energía, conocida como el calor de la explosión, “*Q*”, representa la energía termal total liberada por la reacción química en la detonación e

incluye el calor retenido por los productos de la detonación después de la expansión a la presión atmosférica.

➤ La energía del Anfo puede ser medida o considerada de dos formas:

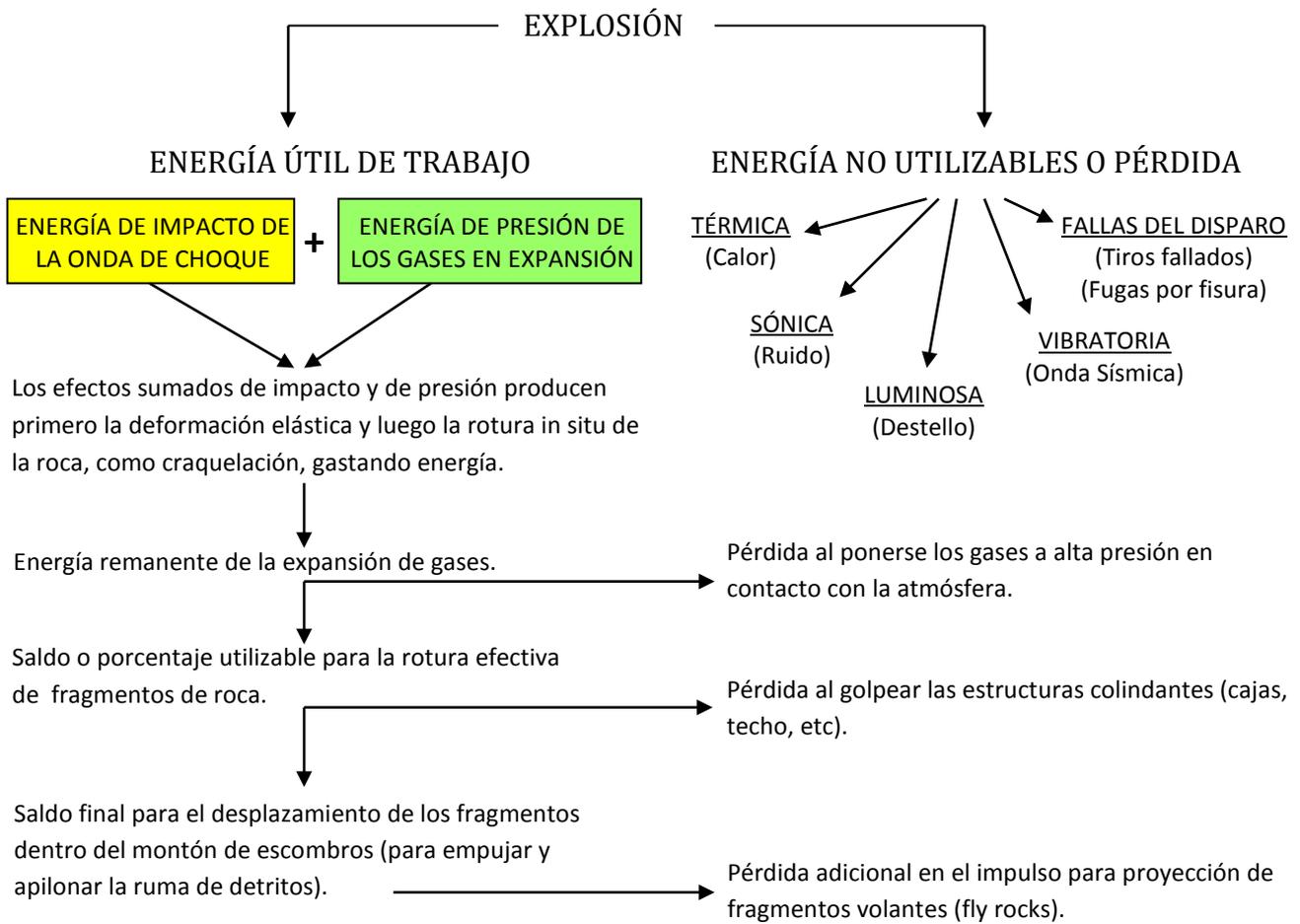
Potencia absoluta por peso (RWS).- RWS son sus iniciales en inglés (*relative weight strength*). Es la máxima energía teórica del Anfo y se basa en la reacción de los ingredientes (materias primas) de su composición. La energía por unidad de peso expresada en calorías o joules por gramo (cal/g o J/g) para un Anfo elaborado con 94% de nitrato de amonio y 6% de petróleo es 3 730 J/g ó 890,90 cal/g.

Potencia absoluta por volumen (RBS).- RBS son sus iniciales en inglés (*relative bulk strength*). Es la energía del Anfo por unidad de volumen expresado en calorías por centímetro cúbico (cal/cm³). La potencia absoluta por volumen del Anfo es igual a la potencia absoluta por peso, multiplicado por la densidad del Anfo. Esta potencia es igual a 3 170 J/cm³ ($3\ 730 \times 0,85 = 3\ 170$).

➤ La adición de Aluminio o Anfo a un explosivo en emulsión puede utilizarse con el fin de aumentar su energía (cal/g). El Aluminio no aumenta significativamente la sensibilidad de las emulsiones, de modo que se puede emplear un aluminio mucho más grueso y menos costoso en lugar del aluminio fino, y caro, que se emplea para alcanzar la sensibilidad en algunos hirogeles. En teoría, un incremento de 5% de aluminio aumentará la energía de la emulsión en aproximadamente un 25 a 35%. Un incremento de 10% de aluminio aumenta la energía en un 40 a 60%. Un incremento mayor al 10% de aluminio puede resultar inconveniente, desde le punto de vista del costo.

El Anfo añadido a las emulsiones puede aumentar la energía de éstas en un 5% por cada 10% de incremento que se agregue. El Anfo también tiene la ventaja adicional de generar solo productos de detonación gaseosos lográndose, por lo tanto, también un aumento en el volumen de gas. Esto último por lo general conduce a un mejor levantamiento de roca que se este rompiendo. La proporción de la cantidad de energía liberada en relación a la energía termoquímica calculada es la medida de la eficiencia del explosivo.

Pero no toda la energía suministrada por un explosivo se transforma en trabajo útil, ya que tienen lugar algunas pérdidas, como vemos en la siguiente Figura 21.



NOTA: La rápida caída de presión de detonación en la voladura se debe tanto al aumento continuo de volumen de la cavidad inicial, como al enfriamiento de los gases. Por tanto, es condición prioritaria ubicar y confinar adecuadamente la carga explosiva, iniciarla con fuerza y retener el proceso de detonación dentro del taladro el mayor tiempo posible, para utilizar el máximo de energía en el trabajo.

Figura N° 21. Distribución de la Energía Potencial de un Explosivo en la Voladura.

E. Presión de Detonación.- La presión de detonación es un indicador significativo de la capacidad de fragmentación que posee un explosivo.

Esta presión es la producida en la zona de reacción del explosivo expresada en megapascales (MPa). Es función de la densidad y del cuadrado de la velocidad de detonación, así:

$$PD = \rho_e \times (VOD)^2 \times 250 \times 10^{-6}$$

Donde:

- PD : presión de detonación (en MPa)
- ρ_e : densidad del explosivo (en g/mL)
- VOD : velocidad de detonación (en m/s)

- Por ejemplo para un Anfo que es producido con una mezcla de 94% de nitrato de amonio y 6% de petróleo, se tiene:

$$\rho_e : 0,85 \text{ g/mL}$$

$$\text{VOD} : 3\,700 \text{ m/s}$$

$$\text{PD} = (0,85) \times (3\,700)^2 \times 250 \times 10^{-6}$$

$$\text{PD} = 2\,910 \text{ MPa}$$

La presión de detonación del cebo debe ser como mínimo igual a la presión de detonación del ANFO pero, para obtener mejores resultados, se debe emplear el material con mayor presión de detonación disponible. Esto garantiza un desempeño eficiente al lograr que el Anfo alcance su velocidad estable a una distancia mínima desde el punto de vista de iniciación. Las composiciones de altos explosivos fundidos, tales como la pentolita y las composiciones tipo "B", han demostrado ser cebos efectivos para Anfo. La eficiencia del cebo para iniciar el Anfo mejora cuando su diámetro se aproxima al diámetro del taladro.

- Puesto que las emulsiones tienen una velocidad de detonación alta y una densidad razonable, también tienen una presión de detonación relativamente alta. Como resultado de esto, las emulsiones son particularmente apropiadas para mejorar la fragmentación en roca masiva dura, romper fondos de roca dura, y para su empleo como booster en mezclas de Anfo y otros agentes de voladura, por ejemplo, la presión de detonación para una emulsión explosiva cuya densidad es 1,13 g/mL y una velocidad de detonación de 5 800 m/s es de:

$$\text{PD} = (1,13) \times (5\,800)^2 \times 250 \times 10^{-6}$$

$$\text{PD} = 9\,503 \text{ MPa}$$

F. Resistencia al agua.- La capacidad de resistencia al agua de un explosivo se puede definir en líneas generales como la habilidad de un producto para aguantar la penetración del agua, o la desensibilización del mismo por efecto de ésta. En términos más específicos, la resistencia al agua se explica usualmente como el número de horas que un producto puede estar sumergido en agua estática y aún pueda detonar con certeza. La eficiencia de muchos explosivos que han sido penetrados por agua se deteriora ligeramente al comienzo, pero después de una exposición prolongada o cuando se trata de grandes cantidades de agua, pueden desensibilizarse hasta un punto en el que ya no detonarán.

- Los taladros que contienen humedad no deben cargarse con Anfo descubierto. El agua disuelve rápidamente los prills de nitrato de amonio por su naturaleza higroscópica y esta característica es adoptada por el Anfo, la delgada capa de aceite combustible y el recubrimiento protector (*anticaking*) ofrece muy poca protección, dando como resultado la desensibilización del Anfo. Este efecto desensibilizante del agua ha quedado demostrado en muchas voladuras deficientes, donde se empleó Anfo en taladros con agua sin emulsión o protección externa suficientes.

Experiencias de campo han demostrado que los resultados buenos y constantes sólo se pueden obtener cuando el Anfo descubierto se utiliza únicamente en taladros secos.

- Las emulsiones de “*agua en aceite*” tienen una fase oleosa continua, no soluble en agua, y son extremadamente resistentes a ésta. La resistencia al agua de estos productos no depende de la integridad de su envoltura. Las emulsiones son una opción cuando se encuentran taladros con agua, debido a que tendrán un mejor desempeño después de permanecer bajo el agua durante semanas o incluso meses.

Hoy en día las mezclas explosivas de Anfo y Emulsión tienen un rango de resistencia al agua. Estos varían, desde poca resistencia para las mezclas con porcentaje bajo (30% Emulsión:70% Anfo), a muy buena resistencia para las mezclas con porcentaje alto (80% Emulsión:20% Anfo). A una proporción de 40:60 de Emulsión:Anfo, la mezcla es esencialmente impermeable, y a medida que se agrega más emulsión, la mezcla se vuelve más líquida hasta que, al alcanzar una proporción de 60:40 de Emulsión:Anfo, ésta es fácil de bombear. Cuando más de un 45% de emulsión se agrega a una mezcla, es necesario mejorar la sensibilidad de la preparación agregando una sustancia de control de densidad. Sin embargo, a pesar de esta resistencia inherente al agua, algunas condiciones de campo severas pueden desensibilizar estos productos.

G. Categoría de humos.- La detonación de todo explosivo comercial produce polvo, vapor de agua (H₂O), nitrógeno (N₂), óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), óxidos de carbono (CO ó CO₂) y eventualmente gases sulfurosos (H₂S, SO₃ ó AlO₂) si contienen azufre o aluminio. Entre los gases inocuos generados hay siempre cierto porcentaje de productos irritantes tóxicos ó letales llamados en conjunto “*humos*”, como el monóxido de carbono (CO) y el bióxido de nitrógeno (NO₂).

La naturaleza y cantidad total de gases venenosos y humo, varían según el tipo de explosivo del que se trate.

- Para el caso del Anfo, mientras esté cargando en taladros secos, sea iniciado adecuadamente y tenga un buen confinamiento, los humos así producidos no serán tóxicos. Los agentes explosivos como el Anfo eventualmente son más tóxicos que las dinamitas y emulsiones, porque generan mayor proporción de óxidos de nitrógeno. Como referencia adicional, el Buró de Minas ruso estima que la toxicidad del NO₂ puede ser hasta 6,5 veces mayor que la del CO a una concentración molar dada.

Por ejemplo, la preparación o aplicación inadecuadas del Anfo pueden producir cantidades indeseables de gases tóxicos, principalmente óxido de nitrógeno y monóxido de carbono. Las voladuras en las que el Anfo produce grandes volúmenes de humo de un color rojizo o marrón-anaranjado, usualmente óxidos de nitrógeno (NO_x), pueden indicar que el producto carecía de suficiente aceite combustible como se observa en la Figura N^o 22; sin embargo, la sensibilidad marginal, un terreno suave o una liberación prematura del confinamiento, un cebado inadecuado y la presencia de agua en el taladro son todos factores que garantizan el aumento en la

generación de NO_x . Para complicar aún más la investigación de los problemas ocasionados por los humos, está el hecho de que, teóricamente, un contenido excesivo de aceite combustible debería dar como resultado la producción de monóxido de carbono, pero en realidad la reducida sensibilidad de dichas mezclas puede más bien resultar en la liberación de NO_x .

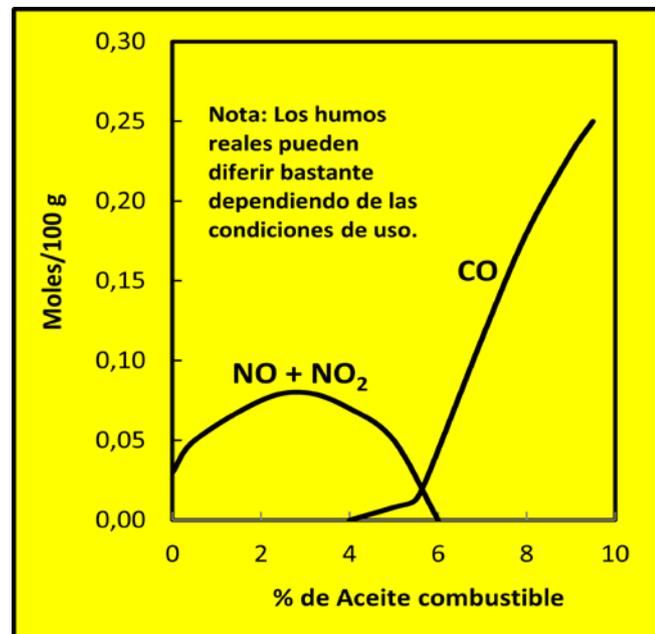


Figura N° 22. Humos teóricos producidos por diferentes tipos de Anfos elaborados con diferentes porcentajes de Aceite Combustible.

- La detonación de explosivos en emulsión puede producir significativamente menos humo que el Anfo, e incluso menos que la dinamita. En la industria de los explosivos los gases tóxicos se conocen como “humos” (gases venenosos, CO y NO_x). Estos “humos” no deben confundirse con el humo común y corriente, el mismo que se compone mayormente de vapor (vapor de agua), dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2) y de los productos sólidos provenientes de la combustión o detonación, mezclados con aire éstos son, en el sentido común del término, no tóxicos. A pesar de que el humo común y corriente no es tóxico, una exposición excesiva a éste, especialmente al producido por la dinamita, puede ocasionar severos dolores de cabeza y debe evitarse. Dicho dolor de cabeza (cefalea) puede ser el resultado de la presencia de partículas pequeñas de nitroglicerina/nitroglicol contenidas en el humo, que no reaccionaron o que reaccionaron sólo parcialmente. Los humos también pueden variar de acuerdo con las condiciones de uso. Cualquier cosa que tienda a enfriar los gases rápidamente aumenta la formación de óxidos de nitrógeno.

En voladuras abiertas, los humos usualmente constituyen poca preocupación si se pueden dispersar rápidamente por el movimiento del aire, pero en las operaciones subterráneas el tipo y cantidad del explosivo, las condiciones de voladura, la ventilación y otros factores deben tomarse en consideración.

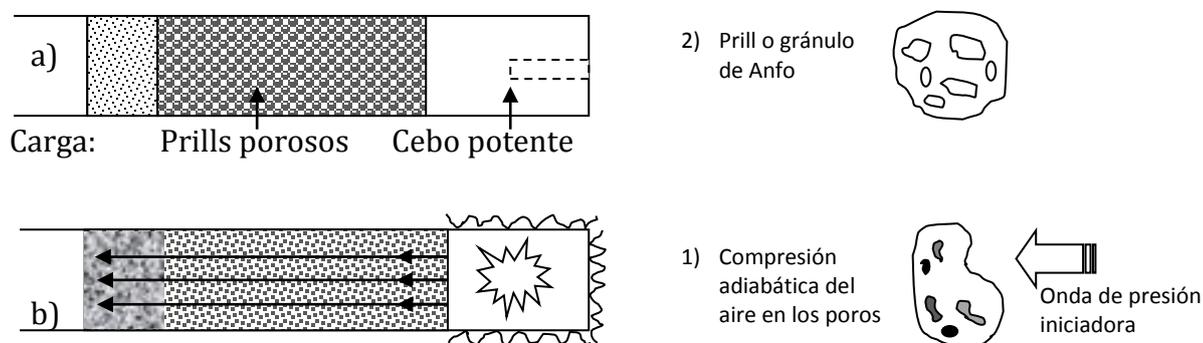
H. Iniciación.- El término “*sensibilidad*” indica la absoluta o relativa facilidad con la que un explosivo puede ser inducido para reaccionar químicamente; en otros lugares prefieren el término “*susceptibilidad*” para describir lo mismo. El estímulo al que se expone el explosivo debe incluirse en cualquier referencia a la sensibilidad, ya sea que se trate de una onda de choque, impacto de baja velocidad, fricción, descarga electrostática, u otra fuente de energía. La sensibilidad de iniciación de la onda de choque de un explosivo es la facilidad con la que este puede ser inducido para detonar. La sensibilidad de iniciación de la onda de choque de un explosivo dado depende de la intensidad o del tamaño de la carga de iniciación. Algunos explosivos pueden iniciarse solo con un detonador, mientras que los agentes de voladura (Anfo y Emulsión) requieren de un booster más grande.

- Los nitrocarbonitratos granulares como el Anfo convencional, Anfo aluminizado por su condición de agentes de voladura no sensibles requieren de un cebo potente y de masa suficiente para iniciarse debidamente en su régimen de detonación. Es importante que la velocidad de detonación del cebo siempre sea mayor que la del Anfo, por lo que se recomienda emplear cebos de alto explosivo, cuyas velocidades de detonación pueden ir de 3 500 a 7 000 m/s.

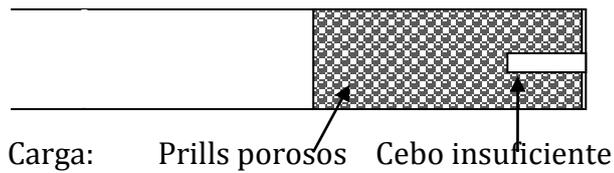
El elemento sensibilizador es estos nitrocarbonitratos es el aire contenido en los poros de los prills del nitrato de amonio. El mecanismo de iniciación ocurre cuando la onda de choque creada por el cebo llega con enorme presión y velocidad hasta los poros, comprimiendo adiabáticamente al aire contenido en ellos y calentándolo hasta inflamarlo, originando puntos calientes o “*hot spots*”. Estos puntos calientes en contacto con el nitrato de amonio (componente oxidante) y con el petróleo (componente combustible) los inflaman, dando lugar a un proceso de combustión violenta.

En la Figura 23 se presenta el esquema del mecanismo de iniciación del Anfo.

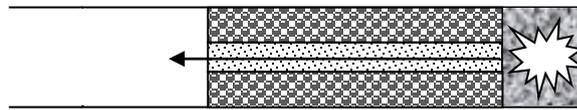
TALADROS DE VOLADURA CON ANFO



Resultado: Detonación, abundantes puntos calientes simultáneos.



3) Aire se inflama y detona a los prills en cadena



DETALLE DE LA FORMACIÓN DE PUNTOS CALIENTES EN LOS POROS DEL NITRATO GRANULAR.

Resultado: Deflagración, pocos puntos calientes, velocidad transiente y más gases tóxicos, nitrosos en especial.

Figura Nº 23. Mecanismo de iniciación del Anfo y Nitrocarbonitratos.

- Las emulsiones contienen un elemento sensibilizador propio como las microesferas que garantizan la iniciación inmediata del explosivo, directamente en su régimen de velocidad de detonación.

El aire contenido en las microesferas al ser violentamente comprimido (adiabáticamente) por la presión de la onda de choque iniciadora, se inflama, produciendo un efecto denominado de puntos calientes “*hot spots*”, que hacen detonar a la emulsión (equivaliendo a la nitroglicerina de las dinamitas).

Existen numerosas medidas de sensibilidad relacionadas a la facilidad de iniciación, incluyendo la sensibilidad al detonador, las pruebas de caída, pruebas de bala, de fricción, u otras. Una de las pruebas de sensibilidad que se emplea con mayor frecuencia es la prueba de sensibilidad al detonador. Esta prueba, con frecuencia denominada la “*Prueba de Sensibilidad al Detonador o Fulminante*”, no sólo sirve para caracterizar la facilidad de iniciación de un explosivo mediante un detonador estándar, sino que también se usa para clasificar los productos desde el punto de vista de su seguridad en las operaciones de almacenaje, transporte, y uso.

La prueba de sensibilidad al detonador o fulminante Nº 8 es la que se usa de forma estándar en la industria de los explosivos. Un detonador de prueba Nº 8 se define específicamente como aquel que contiene dos gramos de una mezcla de 80% de fulminato de mercurio y 20% de clorato de potasio, o cualquier detonador de igual fuerza.

I. Efecto de la Temperatura.- Dependiendo del tipo de explosivo empleado, los cambios en la temperatura inicial tienen un efecto en la velocidad de detonación. Un descenso en la temperatura reducirá la sensibilidad de cualquier explosivo. Esto se debe a que la energía requerida para elevar la temperatura al nivel en donde sucede la reacción rápida es mayor.

- En los explosivos que son sólidos porosos como el Anfo a temperaturas normales, y que contienen poco o nada de líquido, resultan muy poco afectados con las temperaturas bajas normales que se dan en las operaciones de voladura comercial (-16 °C a 32,1 °C). Esto se debe a que tales explosivos contienen muchos espacios vacíos que actúan como puntos de calor intenso para mantener la reacción cuando son golpeados por la onda de detonación.
- La velocidad de detonación de explosivos menos sensibles que contienen líquidos en determina cantidad como las emulsiones, resultan más afectadas por la temperatura; sin embargo, se pueden diseñar fórmulas para minimizar este efecto en aplicaciones prácticas.

J. Inflamabilidad.- Esta propiedad se refiere a la facilidad con la que un explosivo o agente de voladura se puede encender por calor. La mayoría de las dinamitas se encienden rápidamente y se queman de manera violenta. Esta combustión se puede transformar en una detonación si la misma se realiza en un espacio confinado.

Las emulsiones son más difíciles de inflamar que la dinamita y, en muchos casos, debe aplicarse una fuente externa o llama constante para mantener la combustión en un espacio abierto. Sin embargo, después de que la mayor parte de agua se evapora por efecto de dicha fuente de llama externa, estos productos pueden mantener la combustión sin confinamiento.

Los productos de nitrato de amonio y las emulsiones tienen una menor tendencia que la dinamita a convertir la combustión en una detonación.

CAPITULO III. CONTROL DE CALIDAD DEL NITRATO DE AMONIO TÉCNICO

Los explosivos están conformados por tres elementos: oxidante, combustible y sensibilizador, y es interesante observar en la Tabla N° 04 que el “**Nitrato de Amonio**” es el oxidante común en los cuatro grupos, en diferentes estados (en gránulos, molido o en solución) combinándose eventualmente con otros nitratos o sales, mientras que el sensibilizador puede ser un alto explosivo molecular como la nitroglicerina, un polvo metálico, aminas o el aire contenido en los poros de los gránulos de nitrato o en las microesferas de vidrio, que al ser comprimido adiabáticamente por la onda de choque del iniciador se inflama y genera puntos calientes (hot spots) que producen la detonación del explosivo.

Tabla N° 04. Explosivos Comerciales – Componentes principales.

TIPO	OXIDANTES	COMBUSTIBLES	SENSIBILIZADOR
DINAMITAS	<u>Sólidos</u> Nitrato de Amonio y otras sales.	<u>Sólidos</u> Materias absorbentes, pulpa de madera, celulosa.	<u>Líquido</u> Nitroglicerina y otros.
ANFO Y OTROS NITROCARBONITRATOS GRANULARES	<u>Sólidos</u> Nitrato de Amonio granulado.	<u>Sólido/Líquido</u> Petróleo diesel, carbón, aluminio y otros aceites.	<u>Aire</u> Poros vacíos de aire en los prills de nitrato de amonio.
HIDROGELES SLURRY (dispersión de aceite en agua)	<u>Sólido/Líquido</u> Nitrato de Amonio y otras sales (soluciones salinas).	<u>Sólido/Líquido</u> Petróleo, aluminio, sensibilizantes orgánicos, gomas.	<u>Sólido/Líquido</u> Nitrato de mono-metil amina, mononitrato de etileno glicol, aluminio en polvo y otros gasificantes.
EMULSIONES (dispersión de agua en aceite)	<u>Líquido</u> Soluciones de Nitrato de Amonio y otras sales.	<u>Líquido</u> Petróleo, aceites, emulsificantes, parafinas.	<u>Gasificantes</u> Aire contenido en microesferas de vidrio y otros gasificantes.

3.1. Caracterización del Nitrato de Amonio Técnico como insumo para Explosivos

A. Nitrato de Amonio Grado Anfo (prill poroso)

Las características que debe cumplir el nitrato de amonio prill poroso usado como componente para la elaboración del agente de voladura llamado Anfo, son las siguientes:

- El Nitrato de Amonio Grado Anfo debe tener un contenido mínimo de 34,5% de Nitrógeno total, equivalente a 98,5% de NH_4NO_3 .
- Debe tener como máximo 0,30% de Humedad, otros fabricantes especifican 0,50% máximo.

- Los prills que más se adecuan a los agentes de voladura tienen una Densidad de partícula (picnométrica) de 1,3 g/mL a 1,5 g/mL; y una Densidad aparente sin compactar (Densidad pour) entre 0,65 g/mL y 0,85 g/mL inclusive.
- El Nitrato se presenta en forma de gránulos esféricos (prills) porosos libre de materias extrañas, que permiten absorber y retener el aceite combustible de manera uniforme y cercana, y mejoran la sensibilidad al actuar como generadores de “puntos calientes” de alta temperatura o puntos de iniciación en la detonación. En la Figura N° 24 se puede observar la estructura microporosa y microcristalina obtenida por Microscopía electrónica del prill de Nitrato de Amonio Grado Anfo de la empresa chilena Enaex.

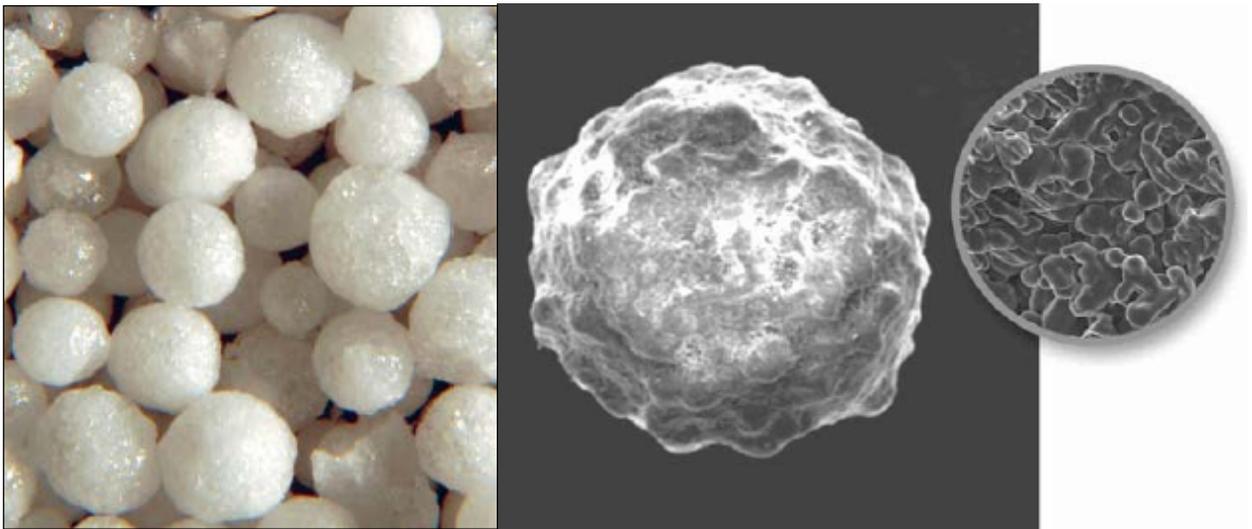


Figura N° 24. Al lado izquierdo se tiene los prill blanco de Nitrato de Amonio Grado Anfo de la empresa chilena Enaex, y al lado derecho se observa el detalle de la cristalización y gránulo entero obtenida por Microscopía Electrónica en el Laboratorio de Metalurgia de la Universidad de Santiago de Chile.

- La Granulometría debe ser uniforme, y el tamaño del prill generalmente tiene un diámetro de 1 a 2 mm que se caracterizan por tener baja densidad.
- Los Prills deben ser lo suficientemente resistentes a la acción mecánica del manipuleo para evitar la generación de finos, propiedad llamada Friabilidad, caracterizado por el Índice de Fragilidad, que mide la facilidad de los prills para desmenuzarse.
- Debe tener una capacidad de Absorción de Petróleo diesel N° 2, mínima de 6% en peso.
- Debe tener una Retención de Petróleo diesel N° 2 máxima en tiempo, algunos especifican que después de 7 días transcurridos de preparado la mezcla, debe retener como mínimo 5,5% en peso.
- El contenido de Material orgánico, expresado como carbono, no debe ser mayor al 0,2%.
- Debe tener un Agente antiaglomerante para recubrir los prills con el fin de evitar la formación de grumos y la absorción de humedad. Usualmente, un buen prill de

voladura tiene menos de 1,0% de revestimiento antiaglomerante, en algunos casos se tolera como máximo 1,2% de antiaglomerante u otros de distinta naturaleza.

Agentes activos líquidos de superficie (agentes de superficie) y kaolin o talco fino (malla inferior a 325) recubren el prill para dispersar la humedad del ambiente y dar una fluidez para el manipuleo a granel. Esto retarda la tendencia del prill a acumular humedad en su superficie, minimizando por tanto su endurecimiento. En algunos casos, el solo empleo del agente de superficie ha demostrado ser un efectivo revestimiento antiaglomerante (*anticaking*). Por otro lado, cantidades excesivas de talco o kaolin producirían: la disminución de la sensibilidad del Anfo debido a la naturaleza inerte de dichos materiales; e interferencia en la distribución del aceite, lo cual afectará el desempeño del Anfo.

Actualmente en el Perú, el Comité Técnico de Normalización de Explosivos y Accesorios de Voladura, elaboró las siguientes Normas Técnicas que establecen los requisitos que debe cumplir el Nitrato de Amonio Grado Anfo como componente en el agente de voladura ANFO, y los métodos de ensayos para la determinación de sus características:

- NTP 311.278:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Requisitos.
- NTP 311.279-1:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la pureza y el nitrógeno total.
- NTP 311.279-2:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la humedad.
- NTP 311.279-3:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la granulometría.
- NTP 311.279-4:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la densidad aparente.
- NTP 311.279-5:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la absorción de petróleo.
- NTP 311.279-6:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la retención de petróleo.

En los Anexos se presentan los Certificado de Análisis y Ficha Técnica del Nitrato de Amonio Grado Anfo (prill poroso), así como fotos de la presentación de los embalajes, forma y color de los prills.

B. Nitrato de Amonio Técnico (prill compacto)

Las características que debe cumplir el nitrato de amonio técnico, prill compacto, usado en los explosivos como componente para la elaboración del agente de voladura llamado Emulsión, son las siguientes:

- El Nitrato de Amonio Técnico debe tener un contenido mínimo de 98,5% de NH_4NO_3 (determinado como nitrógeno total).
- El Nitrato se presenta en forma de gránulos esféricos (prills) compactos libre de materias extrañas o impurezas. En la Figura N° 25 se presenta los prill de Nitrato de Amonio Técnico de la empresa rusa JSC "AZOT" Berezniki.



Figura N° 25. Vista donde se observa los prill blanco de Nitrato de Amonio Técnico de la empresa rusa JSC "AZOT" Berezniki.

- Debe tener un contenido máximo 0,50% de Humedad.
- Los prills de nitrato de amonio técnico tienen Densidades de partícula cercanas a la densidad del nitrato de amonio sólido (ligeramente arriba de 1,72 g/mL), y son menos sensibles a la detonación.
- Debe tener un contenido máximo de 0,30% de Materias insolubles en agua.
- Debe tener un contenido máximo de 0,10% de Cloruros o 0,15% expresado como Cloruro de Amonio.
- Debe tener un contenido máximo de 0,15% de Sulfatos o 0,21% expresado como Sulfato de Amonio.
- El contenido de Material orgánico, expresado como carbono, no debe ser mayor al 0,2%.
- Puede contener Agentes antiaglomerantes que deben ser especificados por el fabricante, cantidades excesivas de ciertos agentes de superficie pueden afectar la estabilidad del Emulsificante en las emulsiones de voladura. Esto, a su vez, puede afectar el desempeño de las mezclas de Anfo/Emulsión.

Actualmente en el Perú, el Comité Técnico de Normalización de Explosivos y Accesorios de Voladura, elaboró las siguientes Normas Técnicas que establecen los requisitos que debe cumplir el Nitrato de Amonio Técnico para uso en explosivos como componente en el agente de voladura EMULSIÓN, y los métodos de ensayos para la determinación de sus características:

- NTP 311.288:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio técnico. Requisitos.
- NTP 311.279-1:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la pureza y el nitrógeno total.
- NTP 311.279-2:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio grado ANFO. Método de ensayo para determinar la humedad.
- NTP 311.350-1:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio técnico. Método de ensayo para determinar las materias insolubles en agua.
- NTP 311.350-2:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio técnico. Método de ensayo para determinar los cloruros.
- NTP 311.350-3:2006 EXPLOSIVOS Y ACCESORIOS DE VOLADURA. Nitrato de amonio técnico. Método de ensayo para determinar los sulfatos.

En los Anexos se presentan los Certificado de Análisis y Ficha Técnica del Nitrato de Amonio Técnico (prill compacto), así como fotos de la presentación de los embalajes, forma y color de los prills.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Akhavan J.: "*The Chemistry of Explosives*", Second Edition, The Royal Society of Chemistry, United Kingdom, 2005.
2. Cook J. R.: "*The Chemistry and Characteristics of Explosive Materials*", First Edition, Vantage Press Inc., New York, 2001.
3. Explosivos S. A. – EXSA.: "*Manual Práctico de Voladura – La línea más completa para Voladura*", Cuarta Edición, Lima, Perú.
4. Explosivos S. A. – EXSA.: "*Boletín Técnico – División Explosivos*", Edición N° 24, Publicación de EXSA S. A., Lima, Perú.
5. Industrial Cachimayo S. A. C. – INCASAC.: "*Boletín Técnico – Nitrato de Amonio Grado ANFO INCASAC*", Publicación de INCASAC, Cusco, Perú.
6. Hydro Chemicals.: "*Boletín Técnico – Ammonium Nitrates*".
7. Dean J. L., Sociedad Internacional de Ingenieros de Explosivos.: "*Manual del Especialista en Voladura*", 17a Edición, International Society of Explosives Engineers, Clevelan, Ohio, USA, 2008.
8. Davis T. L.: "*The Chemistry of Powder and Explosives*", Institute of Technology of Research and Development National Fireworks, Inc., Norwell, Massachusetts, 7 March, 1943.
9. Chaiken R. F., Cook E. B., and Ruhe T. C.: "*Toxic Fumes from Explosives: Ammonium Nitrate – Fuel Oil Mixtures*", Report of Investigations 7867 – Pittsburgh Mining and Safety Research Center, Pittsburgh, Pa., Bureau of Mines – United States Department of the Interior, 1974.
10. Watson R. W., Hay J. E., and Becker K. R.: "*Sensitivity of Some Ammonium Nitrate – Based Explosive Compositions*", Report of Investigations 7840 – Pittsburgh Mining and Safety Research Center, Pittsburgh, Pa., Bureau of Mines – United States Department of the Interior, 1974.
11. "*Explosives and Rock Blasting – Ammonium Nitrate Blasting Agents*", USA.
12. Malash G. F. and Hashem H. M.: "*Improving the properties of Ammonium Nitrate fertilizer using additives*", Faculty of Engineering Alexandria University, Egypt, Alexandria Engineering Journal, Vol. 44, No. 4, 685-693, July 2005.

ANEXOS

1. Certificado de Análisis de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.
2. Certificado de Análisis de Nitrato de Amonio prill Grado Técnico ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.
3. Ficha Técnica de Nitrato de Amonio prill naranja Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.
4. Ficha Técnica de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo chileno de la empresa ENAEX S. A.
5. Ficha Técnica de Nitrato de Amonio prill Grado Técnico peruano de la empresa YURA S. A. – CACHIMAYO.
6. Ficha Técnica de Seguridad (Material Safety Data Sheet – MSDS) del Nitrato de Amonio de la empresa peruana EXSA S. A.
7. Ficha Técnica de Seguridad (Material Safety Data Shett – MSDS) del Agente de Voladura del tipo Nitrocarbonitrato "ANFO": Examon P de la empresa EXSA S. A.
8. Fotos de Nitrato de Amonio prill naranja Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.
9. Foto de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.
10. Foto de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo chileno de la empresa ENAEX S. A.
11. Foto de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo francés de la empresa GRANDE PAROISSE S. A.
12. Foto de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo peruano de la empresa YURA S. A. – CACHIMAYO.
13. Foto de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo croata de la empresa YARA FRANCE.
14. Foto de Nitrato de Amonio prill Grado Técnico ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.

1. Certificado de Análisis de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.

Inspectorate (Suisse) S.A.
 Rte de Cossonay 28b, P.O. Box 172
 1008 Prilly, Switzerland
 T: +41 (0)21 623 62 30
 F: +41 (0)21 623 67 00
 E: info@inspectorate.ch
 www.inspectorate.com



CERTIFICATE OF QUALITY

J62196

This is to certify that, at the request of Messrs. Ameropa Duengemittel GmbH, we have performed the quality inspection of the under-mentioned goods:

Description of goods	NITRATO DE AMONIO POROSO GRADO ANFO
Vessel	PIETARI GREAT
Port of loading	ST. PETERSBURG, RUSSIA
Time of inspection	8TH – 10TH NOVEMBER, 2006
Port of discharge	IQUIQUE, CHILE
Loaded quantity as per B/L	1518 BIG BAGS
No. 202 dated 12.11.2006	GROSS WEIGHT 1522,554 MT
	NET WEIGHT 1518,000 MT

RESULTS OF CHEMICAL ANALYSIS

The sampling and chemical analysis were performed according to the requirements and the following results were obtained:

	Specifications	Actual results
Fraction of total mass of nitrate and ammonium nitrogen in terms of NH ₄ NO ₃ in dry substance	98 pct. min	98,6 pct
Moisture content (drying method)	0,5 pct. max	0,50 pct
PH water solution with 10 pct. of mass share of AN	4,5 pct. min	5,5 pct
Fuel oil absorption	10 pct min	11,2 pct
Fuel oil segregation	5,6 pct min	7,4 pct
Poured weight	0,76-0,84 gr/cm ³ max	0,78 pct
Granulometry 1-3 mm	90 pct min	98,81 pct
Appearance	White Colour	White Colour

Results of analysis based on the composite sample.

F7365

Dated: 12th November, 2006
 For and on behalf of
 INSPECTORATE (SUISSE) S.A.
 ISSA C.S. NO 4

2. Certificado de Análisis de Nitrato de Amonio prill Grado Técnico ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.

Inspectorate (Suisse) S.A.
Rte de Cossonay 28b, P.O. Box 172
1008 Prilly, Switzerland

T: +41 (0)21 623 62 30
F: +41 (0)21 623 67 00
E: info@inspectorate.ch
www.inspectorate.com



CERTIFICATE OF QUALITY

J62196

This is to certify that, at the request of Messrs. Ameropa Duengemittel GmbH, we have performed the quality inspection of the under-mentioned goods:

Description of goods	NITRATO DE AMONIO TECNICO
Vessel	PIETARI GREAT
Port of loading	ST. PETERSBURG, RUSSIA
Time of inspection	10TH – 12TH NOVEMBER, 2006
Port of discharge	IQUIQUE, CHILE
Loaded quantity as per B/L No. 201 dated 12.11.2006	4663 BIG BAGS GROSS WEIGHT 2338,216 MT NET WEIGHT 2331,500 MT

RESULTS OF CHEMICAL ANALYSIS

The sampling and chemical analysis were performed according to the requirements and the following results were obtained:

	Specifications	Actual results	Method GOST
Fraction of total mass of nitrate and ammonium nitrogen in terms of NH ₄ NO ₃ in dry substance	34,4 pct. min	34,5 pct	GOST 2-85
Fraction of total mass of additives Mg(NO ₃) ₂ in terms of MgO	0,3-0,4 pct.	0,33 pct	GOST 2-85 it.4.7
Moisture (drying method)	0,3 pct. max	0,29 pct	GOST 2-85 GOST 20851.4-75 it.1
Static strength of granules	0,8 kg/grain. min	1,5 kg/grain	GOST 21560.2-82
Granulometry 1-4 mm	95 pct. min	99,32 pct	GOST 21560.1-82
Colour	White	White	

Results of analysis based on the composite sample.

F7362

Dated: 12th November, 2006
For and on behalf of
INSPECTORATE (SUISSE) S.A.
ISSA C.S. NO 4

3. Ficha Técnica de Nitrato de Amonio prill naranja Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.



BEREZNIKI® NITRATO DE AMONIO GRADO ANFO

Nitrato de Amonio Grado ANFO BEREZNIKI®, de manufactura rusa, que viene a ser el componente base para preparar explosivos y agentes de voladura, en especial el ANFO.



DATOS TÉCNICOS	
PUREZA	98 % MÍNIMO
HUMEDAD	0.5 % MÁXIMO
INSOLUBLES EN AGUA	0.8 MÁXIMO
DENSIDAD APARENTE PROMEDIO	0.76 g/cm ³ +/- 0.04
ABSORCIÓN DE PETRÓLEO	8 % MÍNIMO
GRANULOMETRÍA (De 1 mm a 3 mm)	90 % MÍNIMO

USOS

El principal uso del Nitrato de Amonio BEREZNIKI® es la fabricación de ANFO, que es un agente de voladura de bajo costo, especialmente utilizado para minería subterránea y voladuras de superficie. Se recomienda utilizarlo en zonas con buena ventilación y en taladros exentos de la presencia de agua.

PRESENTACIÓN

El Nitrato de Amonio BEREZNIKI® se entrega en sacos de 500 Kg, con una bolsa interior de polietileno y otra exterior de polipropileno.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. sólo se responsabiliza por lo expresamente indicado en esta ficha técnica y en ningún caso por daños, pérdidas o cualquier contingencia derivada del uso de los productos. El uso de explosivos está regulado en cada país por leyes propias. De otro lado, **FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.** se reserva el derecho de introducir en sus productos las modificaciones que estime conveniente, sin previo aviso.

4. Ficha Técnica de Nitrato de Amonio prill Grado Anfo chileno de la empresa ENAEX S. A.



FICHA TÉCNICA DE PRODUCTOS NAIA - 2003

PRILLEX®

NITRATO DE AMONIO GRADO EXPLOSIVO

El Nitrato de Amonio Grado Explosivo PRILLEX® es la materia prima principal en la fabricación de explosivos y agentes de tronadura de alta calidad, en especial, de Anfo para Pequeño Diámetro. Es fabricado por Enaex en la mayor y más moderna planta de Sudamérica, caracterizándose por su baja densidad y alta absorción de petróleo, que le confieren un bajo diámetro crítico y óptimas sensibilidad y velocidad de detonación.

CARACTERÍSTICAS

Pureza	(% NH ₄ NO ₃)	98,5 mínimo
Contenido de Nitrógeno	(%)	34,5 mínimo
Humedad	(%)	0,2 máximo
pH		4,5 - 6,0
Insolubles en Agua	(%)	0,5 máximo
Fragilidad (du Pont TL-53)	(%)	35 máximo
Densidad Vaciado ("pour")	(g/cc)	0,71 ± 0,03
Densidad Compactado ("bulk")	(g/cc)	0,74 ± 0,03
Densidad de Partícula (picnométrica)	(g/cc)	1,41 ± 0,06
Velocidad de detonación	(m/s)	1.700 - 2.300 (1)
	(m/s)	3.000 - 3.900 (2)
	(m/s)	3.900 - 4.300 (3)
Absorción de Petróleo (F.O. #2)	(%)	12 mínimo
Granulometría	sobre 2 mm (%)	15 máximo
	bajo 1 mm (%)	5 máximo

Clasificación Internacional :
 CLASE 5.1 Número UN = 1942
 Grupo III.
 Page = 5122

Símbolo de Transporte :



(1) Medido como Anfo normal, no confinado, en 3" iniciado con un Tronex Plus de 1"x 8".

(2) Medido como Anfo normal, confinado en fierro de 4 1/2" Ø, iniciado con un APD 450.

(3) Medido como Anfo normal, confinado en fierro de 6" Ø, iniciado con un APD 450.

USOS

El principal uso del Nitrato de Amonio PRILLEX es la fabricación de ANFO, que es un agente de tronadura de bajo costo, especialmente recomendado para minería subterránea y tronaduras de superficie de pequeño diámetro. Se recomienda utilizarlo en zonas con buena ventilación y sin presencia de agua en las perforaciones.

PRESENTACIÓN

El Nitrato de Amonio PRILLEX se entrega en sacos de 50 kg, de tejido de polipropileno con bolsa interior de polietileno. Puede despacharse también en maxisacos de 1 tonelada o a granel, a pedido.

ADVERTENCIA

Enaex S.A. sólo se responsabiliza por lo expresamente indicado en este catálogo, y no será en ningún caso responsable por daños, pérdidas o cualquier contingencia derivada del uso de los productos, salvo aquellas expresamente indicadas por la legislación chilena vigente. El uso de explosivos está regulado en cada país por leyes propias. Enaex S.A. se reserva el derecho de introducir a sus productos todas aquellas modificaciones que estime conveniente, sin aviso previo.

5. Ficha Técnica de Nitrato de Amonio prill Grado Técnico peruano de la empresa YURA S. A. – CACHIMAYO.



INCASAC

NITRATO DE AMONIO TECNICO

HOJA TECNICA

CARACTERISTICAS	CANTIDAD	UNIDAD
ASPECTO FISICO	GRANULOS	BLANCOS
FORMULA		NH_4NO_3
NITRATO DE AMONIO MÍN.	99,50	%
NITROGENO TOTAL MÍN.	3,70	%
DENSIDAD MÍNIMA	0,77	Kg/l
HUMEDAD MÁXIMA	0,30	%
pH (10% de solución)	5,5 – 6,5	

- **El Nitrato de Amonio (NO_3NH_4) grado técnico;** es un sólido granulado compacto con tendencia a formar conglomeraciones por la falta de antiaglomerante, y es altamente higroscópico, miscible en agua llegando a formar una solución oxidante. En contacto con la piel y ojos es irritante, requiere lavado con abundante agua.
- Presentación en bolsas de 50 Kg, con liner (plástico interior) protector contra la humedad y los rayos solares.
- **INCASAC:**
 - **Planta:** Av. Agustín Gamarra No. 100 Cachimayo-Anta-Cuzco (+5184) 837109- 837107
 - **Ventas:** Av. Diez Canseco No. 127 Cercado-Arequipa (+5154)221006- 225000

CONTROL DE CALIDAD

6. Ficha Técnica de Seguridad (Material Safety Data Sheet – MSDS) del Nitrato de Amonio de la empresa peruana EXSA S. A.

Nitrato de Amonio®

SECCIÓN 1

Identificación de la Compañía y Producto

- Compañía : EXSA S.A.
- Dirección : Antigua Panamericana Sur km 38,5, Lurín - Lima 16
- Teléfono de emergencia: 01/ 315 7000 (Planta Lurín) ; 2544 - 2802 - 2255 (Anexos)
- Nombre del producto : NITRATO DE AMONIO
- N° O.N.U. : 1942
- N° CAS : 6484-52-2
- N° MSDS : E-001
- Edición : 03
- Emitido : 2008-07-01
- Preparado por : Gerente de Seguridad

SECCIÓN 2

Composición e Ingredientes

INGREDIENTES	N° CAS	PEL (OSHA)	TLV (ACGIH)
Nitrato de amonio	6484-52-2	No establecido	No establecido

SECCIÓN 3

Identificación de los Peligros

- Inhalación: El polvo de nitrato de amonio es irritante para las membranas mucosas del tracto respiratorio. La exposición excesiva puede tener como resultado la micción y la orina ácida, congestión grave de los pulmones, tos, respiración dificultosa, acidosis sistémica y metaglobinemia (hemoglobina anormal de la sangre).
- Ingestión: La ingestión de grandes cantidades puede causar vértigo, dolor abdominal, diarrea, convulsiones y en el peor de los casos formación de metaglobinemia y acidosis sistémicas.
- Contacto con la piel u ojos: El nitrato de amonio puede ser irritante para la piel y los ojos por contacto y puede causar quemaduras. Sin embargo no se le considera un grave irritante.

SECCIÓN 4

Procedimientos de Emergencia y Primeros Auxilios

- Inhalación: Trasladar a la víctima a un lugar donde haya aire fresco y mantenerla con calor e inmóvil. Si la respiración se hace dificultosa o si ha cesado,

administrar respiración artificial. Conseguir atención médica inmediatamente.

- Ingestión: Inducir al vómito, si la persona está consciente dar de beber agua; conseguir atención médica.
- Contacto con la piel u ojos: Lavar los ojos inmediatamente con agua durante al menos 15 minutos, levantando los párpados ocasionalmente. Quitar la ropa contaminada. Lavar las áreas afectadas del cuerpo con grandes cantidades de agua y jabón. Conseguir atención médica.

SECCIÓN 5

Procedimientos en Caso de Fuego y Explosión

No inflamable pero se considera oxidante

- Agente de extinción: Agua, evitar las espumas conteniendo estabilizadores orgánicos o emulsificantes.
- Peligros específicos: Si existe combustión sola o en conjunto con otros materiales, se pueden producir humos tóxicos con CO y NO_x debiendo usarse protección respiratoria. Este producto puede eventualmente explotar si se expone a dos de las siguientes tres condiciones: calor, alto confinamiento y contaminación.
- Cuidados especiales: En lo posible el agua empleada para extinción debe ser captada o canalizada para un tratamiento posterior.
- Protección especial: En caso de incendios es obligatorio usar equipo de aire autocontenido.

SECCIÓN 6

Procedimiento en Caso de Derrames o Fugas

- Precauciones con el medio ambiente: En contacto con la tierra, se espera que éste material se lixivie en el agua subterránea. En contacto con el agua se biodegrada rápidamente.
- Métodos de limpieza: Recoger en bolsas o sacos de polietileno. Los residuos que queden en el área del derrame se deben disolver con agua, mezclar y cubrir con tierra.
- Información general: Restringir el acceso al área. Mantener al personal sin protección en posición contraria a la dirección del viento de la zona de derrame. Eliminar las fuentes de ignición.

SECCIÓN 7

Manipulación y Almacenamiento

- Manipulación: Evitar generación excesiva de polvos, evitar cualquier contaminación con materiales combustibles, fuentes de calor.



ESPAÑOL

continúa...



- Almacenamiento: Almacenar en ambientes frescos y ventilados, alejado de combustibles, materiales orgánicos y materiales altamente oxidantes. No almacenar en áreas con temperaturas mayores a 54 °C (130 °F), preferiblemente en áreas frescas y ventiladas.

SECCIÓN 8

Control de Exposiciones/Protección Personal

- Ventilación : Normal
- Protección respiratoria : Usar mascarilla para polvo
- Protección de ojos : Utilizar gafas protectoras
- Protección para la piel : Guantes de protección

SECCIÓN 9

Propiedades Físicas y Químicas

- Estado físico : Sólido
- Apariencia : Esferas pequeñas blancas (Prills)
- Punto de inflamación : No aplicable
- T. de autoignición : No aplicable
- Propiedades explosivas : No
- Presión de vapor : No aplicable
- Solubilidad en agua : 1,870 kg/kg agua @ 20 °C
- T. de descomposición : 210 °C (410 °F)
- Punto de fusión (punto triple) : 169 °C
- Peligros de fuego o explosión : No

SECCIÓN 10

Estabilidad y Reactividad

- Estabilidad: El producto es estable a las condiciones de almacenamiento y manipuleo recomendadas.
- Materiales a evitar: Agentes reductores, polvos metálicos, fósforo, azufre, ácidos concentrados, sales de cobre, cloruros, hipocloritos, percloratos, cromatos, nitritos, permanganatos, álcalis fuertes materiales orgánicos o carbón (calientes).
- Productos de descomposición: NOx.

SECCIÓN 11

Información sobre Toxicidad

- LD50 (oral) : > 4820 mg/kg

SECCIÓN 12

Información Ecológica

- Movilización en el agua : Muy soluble en agua, en el agua el nitrato de amonio se disuelve rápidamente. El ion NO_3^- se transporta en el agua. El ion NH_4^+ es absorbido por el suelo.
- Ecotoxicidad: Baja toxicidad para la vida acuática.
- Persistencia/Degradabilidad: El ion nitrato es la forma predominante en la nutrición de las plantas.

SECCIÓN 13

Consideraciones para su Disposición

Dependiendo del grado y naturaleza de la contaminación, cuando el producto no se puede salvar por recuperación o reciclado, debe ser, manejada como basura peligrosa.

SECCIÓN 14

Información sobre Transporte

- DOT : Sustancia Oxidante Clase 5, División 5.1
- N° O.N.U. : 1942
- N° CAS : 6484-52-2

SECCIÓN 15

Información sobre Regulaciones

No aplicable

SECCIÓN 16

Otras Informaciones

Toda la información, dato o sugerencia manifiesta por EXSA S.A. respecto de sus productos, está basada en el mejor conocimiento de esta en el momento. EXSA S.A. no tiene influencia en el uso, proceso y aplicación de los mismos por parte de los compradores y consumidores.

EXSA S.A. no aceptará en ningún caso, responsabilidad alguna por los resultados obtenidos, ni por los inconvenientes, daños y perjuicios directos e indirectos, así como por las consecuencias resultantes del uso de los mismos. Por tales razones, los compradores y consumidores, asumen todos los riesgos, responsabilidades y obligaciones por pérdidas y daños derivados del manejo y uso de nuestros productos sin excepción alguna y serán los únicos responsables de los resultados obtenidos del almacenamiento, manipuleo o uso del producto así como del manejo de la información o las recomendaciones referentes al mismo, sea solo o en combinación con otras sustancias.

7. Ficha Técnica de Seguridad (Material Safety Data Sheet – MSDS) del Agente de Voladura del tipo Nitrocarbonitrato “ANFO”: Examon P de la empresa EXSA S. A.



SECCIÓN 1

Identificación de la Compañía y Producto

- Compañía : EXSA S.A.
- Dirección : Antigua Panamericana Sur km 38,5;
Lurín - Lima 16
- Teléfono de emergencia: 315 7000 (local)
01/315 7000 (nacional)
++ 51-1/315 7000 (internacional)
- Nombre del producto : EXAMON P SOLANFO
- Nombre Genérico : Agente de voladura tipo N-C-N
- N° O.N.U. : 0081
- N° Clase : 1.1D
- N° MSDS : E-109
- Edición : 04
- Emitido : 2008-07-01
- Preparado por : Gerencia de Seguridad

SECCIÓN 2

Composición e Ingredientes

INGREDIENTES	N° CAS	PEL (OSHA)	TLV (ACGIH)
Nitrato de amonio	6484-52-2	No establecido	No establecido
Petróleo	64741-59-9	No establecido	No establecido

CAS : Chemical Abstract Service
 PEL : Permissible Exposure Limit (Limite de Exposición Permissible)
 OSHA : Occupational Safety and Health Administration
 TLV : Threshold Limit Value (Valor Limite Tolerable)
 ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists

SECCIÓN 3

Identificación de los Peligros

Peligro para la salud de las personas

- Inhalación: No conocidas
- Contacto con la piel u ojos: Puede causar irritación.
- Ingestión: No conocidas
- Absorción por la piel: No hay evidencias
- Efectos de sobre exposición en periodos largos: No conocidas
- Efectos de sobre-exposición aguda puntual: No conocidas

SECCIÓN 4

Procedimientos de Emergencia y Primeros Auxilios

- Inhalación: No aplicable.
- Contacto con la piel u ojos: Lavar con agua.
- Ingestión : Si ocurriera, inducir al vómito. Si la persona se encuentra consciente dar de beber agua. Conseguir atención médica. Se sugiere sólo un lavado gástrico.

SECCIÓN 5

Procedimientos en Caso de Fuego y Explosión

Es inflamable

- Agente de extinción: Agua.
- Peligros específicos: Si existe combustión solo o en conjunto con otros materiales, se pueden producir humos tóxicos con CO y NO_x. Se debe utilizar protección respiratoria.
- Cuidados especiales: El agua empleada para extinción debe ser captada o canalizada en lo posible para un tratamiento posterior si se contamina con abundante hidrocarburo.

SECCIÓN 6

Procedimiento en Caso de Derrames o Fugas

- Precauciones con el medio ambiente: Evacuar el área contaminada. Evitar el ingreso del producto a los drenajes.
- Métodos de limpieza: Recoger el producto no contaminado y depositarlo en su envase original para su eliminación por voladura. El producto contaminado debe ser recogido en bolsas para su eliminación por voladura.

SECCIÓN 7

Manipulación y Almacenamiento

- Almacenamiento : Usar ambientes frescos y ventilados. No exponer al sol directamente.
- Manipulación : Evitar cualquier contaminación, fuente de calor o fuga.

SECCIÓN 8

Control de Exposiciones/Protección Personal

- Ventilación : Normal
- Guantes protectores : No aplicable
- Protección visual : Utilizar gafas protectoras



ESPAÑOL



continúa...

**SECCIÓN 9****Propiedades Físicas y Químicas**

- Estado físico : Esferas pequeñas (prills)
- Apariencia y olor : Color anaranjado, olor a hidrocarburo
- Densidad (a granel), g/cm³ : 0,75 - 0,83

SECCIÓN 10**Estabilidad y Reactividad**

- Estabilidad: El producto es estable a las condiciones de almacenamiento y manipuleo recomendadas.
- Productos de descomposición: Produce gases como óxidos de nitrógeno y carbono. Evitar respirar los humos de la quema o detonancia.

SECCIÓN 11**Información sobre Toxicidad**

- Niveles de toxicidad: No se han registrado datos

SECCIÓN 12**Información Ecológica**

- Persistencia y degradabilidad: No aplicable
- Precauciones con el medio ambiente: Evacuar el área contaminada.
Evitar el ingreso del producto en los drenajes.

SECCIÓN 13**Consideraciones para su Disposición**

- Desechos, residuos: Incineración controlada, bajo supervisión directa de personal calificado.
- Embalajes contaminados: Incineración controlada, bajo supervisión directa de personal calificado.

SECCIÓN 14**Información sobre Transporte**

- DOT : Agente de voladura tipo N-C-N
- N° O.N.U. : 0081
- N° Clase : 1.1 D

SECCIÓN 15**Información sobre Regulaciones**

- Normas internacionales aplicables : Ninguna
- Normas nacionales aplicables : Reglamento de control de explosivos de uso civil (D.S. 019-71/IN).
Reglamento de seguridad e higiene minera (D.S. 046-2001-EM).

SECCIÓN 16**Otras Informaciones**

Toda la información, dato o sugerencia manifiesta por EXSA S.A. respecto de sus productos, está basada en el mejor conocimiento de esta en el momento. EXSA S.A. no tiene influencia en el uso, proceso y aplicación de los mismos por parte de los compradores y consumidores.

EXSA S.A. no aceptará en ningún caso, responsabilidad alguna por los resultados obtenidos, ni por los inconvenientes, daños y perjuicios directos e indirectos, así como por las consecuencias resultantes del uso de los mismos. Por tales razones, los compradores y consumidores, asumen todos los riesgos, responsabilidades y obligaciones por pérdidas y daños derivados del manejo y uso de nuestros productos sin excepción alguna y serán los únicos responsables de los resultados obtenidos del almacenamiento, manipuleo o uso del producto así como del manejo de la información o las recomendaciones referentes al mismo, sea solo o en combinación con otras sustancias.

8. Nitrato de Amonio prill naranja Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.



9. Nitrato de Amonio prill Grado Anfo ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI.



10. Nitrato de Amonio prill Grado Anfo chileno de la empresa ENAEX S. A.



11. Nitrato de Amonio prill Grado Anfo francés de la empresa GRANDE PAROISSE S. A.



12. Nitrato de Amonio prill Grado Anfo peruano de la empresa YURA S. A. – CACHIMAYO.



13. Nitrato de Amonio prill Grado Anfo croata de la empresa YARA FRANCE.



