

# ARTÍCULOS



## BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

**DISEÑO PRELIMINAR DE UN DISPOSITIVO  
DEFLAGRADOR-DESPOLETADOR DE  
UXOs A BASE DE UNA REACCIÓN DE ALTA  
TEMPERATURA PARA OPERACIONES EOD**

**MAY. PABLO OVALLE VÁSQUEZ**





# DISEÑO PRELIMINAR DE UN DISPOSITIVO DEFLAGRADOR- DESPOLETADOR DE UXOs A BASE DE UNA REACCIÓN DE ALTA TEMPERATURA PARA OPERACIONES EOD

MAY. Pablo Ovalle Vásquez<sup>1</sup>

**Resumen:** *el propósito de la presente investigación es ir en apoyo de las operaciones EOD<sup>2</sup> a nivel institucional, mediante el diseño de un prototipo que permita obtener una deflagración al momento de neutralizar un artefacto explosivo en áreas pobladas o que presenten riesgos de daños colaterales, disminuyendo los posibles efectos negativos causados por la detonación de la carga principal. Su elaboración se desarrolló a través de la ingeniería de sistemas, con la que se pudo determinar el tipo de reacción química adecuada mediante pruebas, así como las mediciones de transferencia de calor que permitieron seleccionar el material aislante para la construcción del contenedor. Finalmente, se validaron las pruebas sobre un artefacto explosivo a escala (inerte), lo que permitió determinar la capacidad de perforación en metal y deflagración de explosivo, dando así solución al problema planteado.*

**Palabras clave:** *deflagración, aluminotermia, exotérmica, reacción de alta temperatura.*

**Abstract:** *the purpose of the present investigation is to support the EOD operations at institutional level, through the design of a prototype that allows to obtain a deflagration at the moment of neutralizing an explosive device in populated areas or that present risks of collateral damage, diminishing the damages or negative effects by a detonation of the main load. Its elaboration was developed through systems engineering methodology, to define the proper chemical reaction through tests, and also the results of the heat transfer in order to select the insulating material for the container's*

---

1 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Municiones, Propelentes y Explosivos.

2 EOD, del inglés explosive ordnance disposal.



*construction. Finally, the tests were validated on an explosive device an escalation (inert) that allows to determine the drilling capacity in the metal and the explosive deflagration, as well as the solution to the problem set out.*

**Keywords:** *deflagration, aluminothermy, exothermic, high temperature reaction.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En los actuales conflictos, operaciones de guerra y distintas a la guerra, la fuerza militar debe contar con unidades (EOD) que tengan la capacidad de neutralización o desactivación de munición sin detonar (UXO),<sup>3</sup> de artefactos improvisados (IEDs)<sup>4</sup> y de restos explosivos de guerra (ERW),<sup>5</sup> los cuales son encontrados en el terreno por el desarrollo de las operaciones de combate y de apoyo, y en los campos de instrucción activos y en receso, donde, producto de ejercicios de instrucción, entrenamientos, maniobras, accidentes o desastres naturales, quedan esparcidos sin su correspondiente levantamiento (Procedimientos EOD, Ejército de Chile, 2015).

En la actualidad, en nuestro país aún existen campos minados y predios de instrucciones cerrados, cedidos o vendidos, en los cuales, por diversas razones, han quedado olvidados en el tiempo distintos tipos de artefactos explosivos, que van desde minas antitanques o antipersonales hasta municiones de armamento mayor. Además de desconocerse su ubicación, los factores climáticos han provocado que estas piezas se desplacen en el terreno, por lo que han reaparecido, tiempo después, cercanas a lugares poblados o en zonas donde su detonación generaría un daño colateral tanto a personas, como a infraestructura.

## 2. DESARROLLO

Actualmente la fuerza militar, para lograr neutralizar un artefacto explosivo, utiliza cargas de “bajo orden”,<sup>6</sup> con el fin de mitigar los daños y efectos negativos al momento de la limpieza de áreas contaminadas por artefactos explosivos. Para ello, las unidades EOD de nuestro país utilizan la carga SM-EOD20, careciendo de otros medios que permitan lograr el bajo orden necesario para neutralizar un artefacto explosivo, lo cual se convierte en una proposición de estudio relevante para el desarrollo de la industria, para el Arma de Ingenieros y las unidades EOD de la Institución.

---

3 UXO: del inglés *unexploded ordnance*.

4 IED: sigla del inglés, artefacto explosivo improvisado.

5 ERW: municiones explosivas que quedan después de que un conflicto ha terminado.

6 Bajo orden: neutralizar un explosivo sin el riesgo de que detone.



Cabe mencionar que cada tipo de munición plantea diferentes desafíos para detección y neutralización. Históricamente, los militares no han rastreado dónde aterrizan los proyectiles de artillería después de que una pieza ha sido disparada. Actualmente, algunas municiones son seguidas, pero se debe transformar en un requisito monitorear todo tipo de munición y dónde estas caen (Macdonald, 2001).

## 2.1. *Low ordnance* (bajo orden)

Se aplican con medios de neutralización que busquen una deflagración del explosivo contenido en el interior de la munición, lográndose lo que muestra la Figura N° 1: una separación de sus componentes y deflagración del explosivo.



Figura N° 1: "Neutralización en "Low Order"".

Fuente: Procedimientos EOD, Ejército de Chile, 2015.

Dentro de los métodos y procedimientos de bajo orden, existen técnicas como la separación mecánica, la cual busca distanciar, generalmente, la espoleta del cuerpo de la munición, para lo cual se emplean medios mecánicos, que golpeen la munición en forma violenta. El problema de este procedimiento radica en que existe una transferencia de energía cinética, la cual, al ser generada de manera violenta, es capaz de producir la detonación. Otra técnicas o métodos de bajo orden son la disruptiva y manual, las que dependerán, al igual que la anterior, del estado en que se encuentre el artefacto explosivo.

Para neutralizar un artefacto explosivo (a través del bajo orden), la Institución utiliza la carga SM-EOD20, la cual se muestra en Figura N° 2.



## 2.2. Carga de bajo orden SM-EOD 20

Las empresas ATK (USA) y RUAG (Suiza) producen la familia SM-EOD<sup>7</sup> como sistemas de eliminación de artefactos explosivos, la cual considera todos los tipos de minas y artefactos explosivos sin detonar, demostrando un alto grado de precisión. Las cargas explosivas SM-EOD20 constan de RDX<sup>8</sup> como explosivo principal, además de cera y grafito. Estas se pueden iniciar de forma eléctrica o pirotécnica (estopín N° 8 o equivalente), pero no se pueden iniciar con el cordón de detonación o tubo de choque. El sistema SM-EOD se ofrece con una gama de accesorios de montaje, ya que se pueden utilizar en prácticamente todos los tipos de terreno y bajo cualquier condición atmosférica e, inclusive, bajo el agua.

Estas cargas SM-EOD fueron desarrolladas, fabricadas y calificadas de acuerdo con los estándares MIL<sup>9</sup> y OTAN<sup>10</sup> (Institute for Defense Analyses, 2005).



### Dimensiones

Diámetro exterior	24 mm
Largo	55 mm

### Peso

Por carga	72 g incluye trípode
Por paquete	1.500 g

### Explosivo

Por carga	11,5 g
-----------	--------

### Desempeño

En acero de blindaje	hasta 55 mm de penetración hasta 6 mm de diámetro
----------------------	------------------------------------------------------

Rango de funcionamiento	-35 °C a 63 °C
Bajo el agua	50 m

Radio de seguridad	50 m solo para la carga
--------------------	-------------------------

Figura N° 2: "Especificaciones técnicas de la carga SM-EOD20".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

- 
- 7 SM-EOD, acrónimo de la compañía. Schweizerische Munitionsunternehmung company (SM). Tipo de carga explosiva con efecto Monroe.
  - 8 La ciclotrimetilentrinitramina (RDX) es un explosivo nitroamina utilizado ampliamente en aplicaciones militares e industriales.
  - 9 Estándar MIL, del inglés *military estándar*.
  - 10 Organización del Tratado del Atlántico Norte.



El gráfico de la Figura N° 3 muestra el poder de perforación en mm (eje Y) y la separación del objetivo o *standoff* en mm (eje X) en condiciones ideales como lo muestra la línea verde, mientras que la línea azul representa la capacidad de perforación bajo el agua.

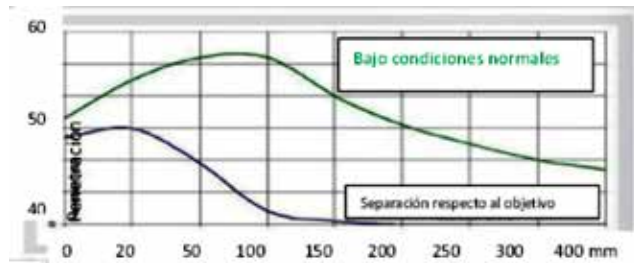


Figura N° 3: "Poder de penetración en láminas de acero, bajo condiciones ideales y no ideales".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DEFLAGRADORES USADOS EN EL MUNDO

El principio de todo sistema deflagrador es entregar una temperatura elevada que permita perforar el contenedor del explosivo, ya sea metálico o plástico, para, finalmente, alcanzar el explosivo y producir su combustión (deflagración), logrando un compartimiento vacío. Cabe indicar que el riesgo de detonación siempre estará presente, sea cual sea el método a emplear. En el caso de la deflagración, es importante destacar que, de llegar a producirse una detonación, el proyectil ya se encontraría perforado, es decir, perdería su confinamiento y cuando la temperatura alcance la carga del mecanismo de iniciación, el explosivo principal ya habrá perdido gran parte de su masa. Lo anterior favorece la disminución de los daños colaterales generado por una detonación por vías normales del explosivo.

A continuación se muestra la Tabla N° 1 con diversos sistemas deflagradores, los que buscan perforar el contenedor y llegar al explosivo principal para producir la deflagración de este y entregar un compartimiento metálico vacío.

N°	SISTEMA	DISPOSITIVO	COMPUESTO QUÍMICO	ENVASE
1	FireAnt	Bengala	Mezcla pirotécnica metálica	Tubo de cartón
2	Hyperheat Mine Flare	Bengala	Mezcla pirotécnica metálica	Tubo de cartón fenólico
3	Propellant Torch System	Antorcha	Mezcla de propelente metálico	Tubo de cartón fenólico
4	Pyropak	Líquido caliente	Mezcla de termita recubierta	Bolsa de polipropileno
5	Pyro-Torch System	Antorcha	Metal reactivo intermetálico	Tubo de cartón fenólico
6	Thiokol Demining Flare	Bengala	Mezcla de propelente metálico	Tubo de cartón fenólico

Tabla N° 1: "Sistemas deflagradores".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.



### 3.1. *FireAnt*

Es un dispositivo de deflagración que contiene 80 g de una mezcla pirotécnica (aluminio, nitrato de bario y cloruro de polivinilo [PVC]) encerrada en una caja de cartón. Es cilíndrico, la carcasa mide 9,33 pulgadas (23,70 cm) de largo y tiene un diámetro de 1,53 pulgadas (3,89 cm). Con un tiempo de duración de 23-24 segundos, la llama de la bengala alcanza los 1.500 °C (2.732 °F). *FireAnt* se enciende con un iniciador eléctrico incorporado y puede penetrar placas de acero de hasta 1/16 pulg. (1.5 mm) de espesor. Los *FireAnt* se comportan bien contra el plástico y las cajas metálicas delgadas de una mina antipersonal (AP) y minas antitanques (AT). El sistema debe colocarse entre 0.6 pulg. (1.5 cm) y 1.2 pulg. (3 cm) de la mina como se muestra en la Figura N° 4.



Figura N° 4: "FireAnt® contra VS-50 mina antipersonal (izquierda) y TMRP-6 mina antitanque (derecha)".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

### 3.2. *Hyperheat Mine Flare*

*Hyperheat Mine Flare* es un dispositivo de bengala autónomo utilizado para minas terrestres mediante un proceso de incineración *in situ* logrando la neutralización. Este dispositivo de deflagración puede colocarse en el suelo o verticalmente montado con el extremo de la antorcha cerca del objetivo, como se muestra en la Figura N° 5. La ignición de la llama se inicia por una conexión eléctrica activada de forma remota mediante un dispositivo que le proporcione baja corriente, lo que permite una distancia segura de trabajo. Cada *Hyperheat Mine Flare* tiene una imprimación<sup>11</sup> incorporada y un iniciador eléctrico.

---

<sup>11</sup> Imprimación corresponde a una capa de sellante aplicada al dispositivo con la finalidad de aislarlo de la humedad ambiente.





Figura N° 5: "Hyperheat Mine Flare contra T-AB-1 antipersonal (izquierda) y mina antitanque (derecha)".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

### 3.3. Propellant Torch System

El sistema *Propellant Torch System* fue diseñado y desarrollado en Applied Research Associates Inc., y consiste en una formulación de propelente en una carcasa resistente al calor. Una vez encendido, un chorro de producto caliente sale de la boquilla de la antorcha y penetra la carcasa de la mina, lo que inicia una combustión autosuficiente y de bajo orden en la carga explosiva principal de la mina. Existen dos tipos de configuraciones de antorchas para neutralizar minas de carcasa fina y dura. La antorcha para minas de carcasa delgada se designa como PT-3 y la antorcha para minas de carcasa dura se designa como PT-12. La antorcha se coloca en un punto de separación y ángulo apropiados con relación al objetivo, conforme se muestra en Figura N° 6, luego se enciende usando un dispositivo de ignición en la abertura de la antorcha. El dispositivo de ignición consiste en un iniciador eléctrico conectado a un fusible de fósforo insertado en la boquilla de la antorcha. Cuando la antorcha está en un ángulo descendente, se debe tener cuidado para asegurar que la unión rápida no caiga fuera. Este sistema ha demostrado ser efectivo en pruebas preliminares contra artefactos reales (minas y bombas de carcasa metálica) y minas sustitutas revestidas en madera, plástico o hasta 0,5 pulgadas (12,7 mm) de acero.



Figura N° 6: "PT-3 contra mina antitanques SPM-1 y TM-46".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.



### 3.4. *Pyropak*

El sistema *Pyropak* consiste en una carga de termita de 400 g empaquetada en un material de polipropileno, según se muestra en Figura N° 7, el cual se derrite durante la reacción inicial en pequeñas gotas sólidas sin quemar que exponen el polvo de la termita al objetivo.

La carga de la termita, generalmente, se coloca directamente en la parte superior del objetivo o donde el material del contenedor es el más delgado y está en el punto más alejado del tren detonador, como se muestra en Figura N° 7.

La razón para esto es que el líquido fundido de termita alcanza una temperatura superior a 3.000 °C (5,432 °F), tiene una acción descendente y se quemará más rápido a través de las partes más delgadas del contenedor del explosivo. Luego, la termita alcanza al explosivo y este se quemará a su propio ritmo a una temperatura de 2.000-2.500 °C (3.632-4.532 °F). Para cuando la quema llega al tren de detonación, una gran proporción del explosivo ya ha sido destruido. Si el detonador se inicia, entonces el resultado de la explosión será mucho menor de lo que hubiera sido con la masa explosiva total.

Este compuesto se considera muy seguro, debido a que para iniciarse requerirá una temperatura de la llama de 800-1.200 °C (1.472-2.192°F) o superior y un tiempo de contacto de al menos 3 segundos.



Figura N° 7: “*Pyropak* usada contra T-AB-1 mina antipersonal (izquierda) y mina TMRP-6 antitanque (derecha)”.

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

### 3.5. *Pyro-Torch System*

General Sciences, Inc. (GSI) desarrolló una antorcha intermetálica<sup>12</sup> llamada *Pyro-Torch*, un sistema que se diseñó en un principio para cortar barras de acero, placas

---

12 Un compuesto intermetálico es la combinación que resulta de mezclas homogéneas de dos o más metales fundidos.



y tubos. Ahora se está investigando para su uso contra minas terrestres de diversas configuraciones, incluidas las minas AP<sup>13</sup> plásticas y termoplásticas, grandes minas AT<sup>14</sup> metálicas y de paredes gruesas.

El Sistema *Pyro-Torch* consiste en material energético intermetálico propiedad de GSI en forma de cartucho, el cual es capaz de derretir barras de 0,5 pulgadas (1,27 cm) y planchas de acero en 3-4 segundos. El dispositivo se enciende usando un encendedor *squib* (eléctrico sin llama) y produce una llama intermetálica líquida a alta temperatura capaz de quemarse a través del metal. Para neutralizar minas, el dispositivo del Sistema *Pyro-Torch* se coloca al lado de la mina y se enciende conforme se muestra en Figura N° 8. El cartucho contiene 300 g de material reactivo y se quema durante 10-15 segundos. Una vez que este penetra la mina, quema el material explosivo.



Figura N° 8: "Sistema *Pyro-Torch* contra mina antitanque TM-46".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

### 3.6. *Thiokol Demining Flare*

El *Thiokol Demining Flare* es un sistema de deflagración de minas creado a partir de excedentes de combustible de cohete. Es un propelente sólido fabricado por Thiokol para el programa *Space Shuttle*.

Como se muestra en la Figura N° 9, *Thiokol Demining Flare* se instala al costado de la mina para luego ser iniciado y proceder a neutralizar las minas quemando rápidamente a través de la carcasa y encendiendo el explosivo principal sin causar una detonación. La temperatura promedio de su llama es superior a 1.927 °C (3.500 °F), con un tiempo de duración de aproximadamente 70 segundos.

---

13 Mina AP se refiere a mina antipersonal.

14 Mina AT se refiere a mina antitanque.



Figura N° 9: "Thiokol Demining Flare contra mina antitanque TMRP-6".

Fuente: Institute for Defense Analyses, 2005.

## 4. TIPO DE REACCIÓN USADA EN LOS SISTEMAS DEFLAGRADORES

La química usada en los diferentes sistemas deflagradores vistos anteriormente corresponde a reacciones de óxido, más conocida como Redox,<sup>15</sup> lo que nos da una base de dónde partir para comenzar a evaluar distintos compuestos dependiendo del resultado que se quiera lograr.

### 4.1. Declaración de la solución

Una vez identificado el problema y analizados los distintos métodos usados en otras partes del mundo, se consideró un estudio para desarrollar un sistema de neutralización que permitiera entregar alta temperatura de manera rápida, que fuera capaz de perforar el contenedor metálico de un artefacto explosivo para, así, alcanzar el explosivo principal y lograr la deflagración de este. De esta forma, permite evitar o disminuir al máximo la generación de daño colateral producido por una detonación, buscando obtener, como resultado, una limpieza rápida y eficiente, sin la generación de una onda expansiva, la cual finalmente es la responsable de los daños causados en las cercanías de una UXO.

Para esto se analizaron diferentes compuestos en cuanto a sus potenciales de oxidación, en forma teórica y mediante pruebas de laboratorio, de manera tal de lograr determinar una reacción química de óxido-reducción capaz de liberar una elevada entrega de energía calorífica en un periodo muy corto de tiempo, alcanzando temperaturas sobre los 2.000 °C que le permitan perforar el contenedor del explosivo, ya sea

---

15 Esta es una reacción que se produce con la pérdida formal de electrones de un átomo y su ganancia por otro átomo. Como la ganancia de electrones recibe el nombre de reducción y la pérdida de electrones es una oxidación, el proceso completo se conoce como reacción Redox (Shriver *et al.*, 1997).





plástico o metálico, cuyo espesor deberá ser determinado de acuerdo a experiencias de laboratorio y pruebas posteriores, lo anterior para definir la máxima capacidad de perforación en metal.

## 4.2. Espesores de artefactos explosivos

Para poder determinar el tipo de material y espesor al que se enfrentaría la reacción, se trabajó en conjunto con la escuela de ingenieros CEDDEX,<sup>16</sup> donde se procedió a tomar medidas de espesor de diferentes municiones y granadas de mortero, así como proyectiles en el predio de Tejas Verdes, conforme se muestra en las Figuras N° 10 a 13.



Figura N° 10: "Munición 106 mm antiblindaje".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 11: "Munición 106 mm HESH".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 12: "Granada de mortero 120 mm".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 13: "Granada de mortero 120 mm".

Fuente: archivo del autor.

16 CEDDEX, Centro de Entrenamiento de Desminado y Destrucción de Explosivos de la Escuela de Ingenieros del Ejército de Chile.



Con la recopilación de datos anteriores, se pudo determinar el rango de espesor de las distintas municiones, las cuales fluctúan entre los 4,47 mm y 12 mm, espesor que deberá ser capaz de perforar la reacción química. Por otra parte, el espesor de las minas AT va desde los 3 a los 4 mm.

A partir de los datos obtenidos mediante las distintas mediciones efectuadas en la Escuela de Ingenieros, se confeccionó la Tabla N° 2, en la que se indica el tipo de artefacto explosivo y su respectivo espesor.

DISPOSITIVO	ESPESOR DE PARED
Granada de mortero 120 FAMA E	12 mm
Munición antiblindaje 106 mm	8,31 mm
Proyectil 106 mm HESH	4,47 mm
Granada de mortero 60 mm	6 mm
Granada de mortero 81	8 mm
Mina AT PRB M3 (plástico)	4 mm
Mina AT M-15	3 mm

Tabla N° 2: "Espesores de dispositivos explosivos".

Fuente: elaboración propia.

## 5. REQUISITOS FUNCIONALES

Los requisitos funcionales para el prototipo se basaron en los procedimientos de neutralización por deflagración, especificados en la "General disposal methods for EOD",<sup>17</sup> la cual muestra y estipula los diferentes métodos y procedimientos para la neutralización de un artefacto explosivo.

De las seis opciones principales para la eliminación de UXOs, la presente investigación se enfocó en las técnicas de bajo orden (técnicas por corte o deflagración), específicamente, la técnica mediante un proceso de deflagración, ya que en esta no existe una transferencia de energía cinética desde el prototipo hacia el artefacto explosivo a neutralizar, lo que conlleva evitar al máximo la detonación, buscando quemar el explosivo principal a fin de evitar un daño colateral en las cercanías de la población civil o en alguna infraestructura.

---

<sup>17</sup> General Disposal Methods for EOD (en español, métodos generales de eliminación), disposiciones que regulan los métodos y maneras de neutralización de un artefacto explosivo.



## 5.1. Requisitos de la reacción

Los siguientes son los procedimientos y métodos de los cuales se ha hecho uso, tanto para trabajos de manera teórica como para los llevados a laboratorio, y, de esta manera, comprobar de forma empírica sus efectos.

### 5.1.1. Entalpía de reacción

La entalpía de una reacción química donde es el calor absorbido o desprendido en dicha reacción cuando esta transcurre a presión constante, es decir:

Cálculo de Entalpía de Reacción ( $\Delta H_r$ )<sup>18, 19, 20</sup>

$$\Delta H_r = \sum \Delta H_f^0 (\text{productos}) - \sum \Delta H_f^0 (\text{materias energéticas})$$
$$\Delta H = Q_p$$

### 5.1.2. Poder de perforación

Se entenderá por el poder o capacidad de la reacción química a utilizar en función de su capacidad de atravesar una placa metálica de un determinado espesor.

### 5.1.3. Estabilidad química

Según lo norma de la RAI,<sup>21</sup> la estabilidad termodinámica ocurre cuando un sistema está en su estado más bajo de energía o en equilibrio químico con su ambiente.

## 6. ENTORNO DE TRABAJO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Esta investigación trabajó, en primera instancia, en un ambiente de laboratorio proporcionado por la ACAPOMIL, donde se analizaron diferentes elementos para formar reacciones químicas de acuerdo con sus diferencias entre sus potenciales de oxidación y entalpías de reacción, a fin de determinar, de manera teórica y práctica, que, para que esta óxido-reducción ocurriera, se necesitaba un combustible y un agente oxidante, es decir, un reductor y un oxidante que cumpliera con lo siguiente:

---

18  $\Delta H_f^0$ , abreviación para entalpía (calor) de formación estándar (J/mol).

19  $\Delta H$ , abreviación para entalpía (calor) de reacción (J/mol).

20  $Q_p$ , calor transferido a presión constante.

21 RAI, Real Academia de Ingeniería.



- elementos que, al ser mezclados, no reaccionen entre sí de manera espontánea;
- que permitan sobrepasar la temperatura de fusión hierro en estado puro, ya que, con esto, se simulan las peores condiciones para un contenedor de cualquier explosivo, debido a que la temperatura de fusión del hierro es superior a la de cualquier acero; y que
- los materiales o reactivos a ocupar se encuentren en el comercio nacional y puedan ser adquiridos por el investigador y la industria posteriormente para el desarrollo de las pruebas.

Derivado de lo anterior, se usó como combustible el aluminio microparticulado, debido a su abundancia, facilidad de empleo, seguridad de almacenaje y transporte, además de que presenta una capa de pasivación que lo hace inerte al medio, así como por su potencial de oxidación. Una vez determinado el combustible o agente reductor, se determinó el agente oxidante, para lo cual se evaluaron, de manera teórica, a través de sus diferencias de potenciales de oxidación, así como de sus entalpías de reacción, elementos tales como el óxido cúprico, óxido de magnesio, óxido de hierro III y IV.

## 6.1. Reactivos y afinidad electroquímica

Para generar una reacción de alta temperatura, se analizaron y determinaron reactivos de manera teórica que permitieran generar una óxido-reducción mediante sus diferencias de potenciales de oxidación. Esta óxido-reducción tenía que ser capaz de generar una temperatura tal, que permitiera sobrepasar el punto de fusión del acero, para, de esta forma, perforar el contenedor de un explosivo y producir su posterior deflagración.

## 6.2. Formulación de la reacción de óxido-reducción

Esta es una reacción que se produce con la pérdida formal de electrones de un átomo y su ganancia por otro átomo. Como la ganancia de electrones recibe el nombre de reducción y la pérdida de electrones es una oxidación, el proceso completo se conoce como reacción Redox (Shriver, 1997).

Dentro de las reacciones Redox existe un grupo importante de oxidantes, estos son los óxidos metálicos con los metales llamados reacciones térmicas. La producción de energía de esta reacción dependerá de los calores de formación de los óxidos ( $\Delta H$ ). Por lo tanto, el calor de la reacción ( $\Delta H^-$ ) es la diferencia del calor de formación de estos (Murray, 1989).



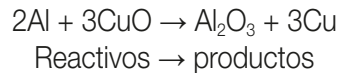


Luego, mediante análisis teórico y, posteriormente, mediante la ejecución de trabajos en pruebas de laboratorio, se determinaron, de manera empírica, los elementos químicos a utilizar en la reacción. Lo anterior condujo a tres posibles reacciones, de las cuales se desprenden sus entalpías de reacción de acuerdo a lo siguiente (Orbovic, 2011):

Cálculo de Entalpía de Reacción ( $\Delta H_r$ )<sup>22, 23</sup>

$$\Delta H_r = \sum \Delta H_f^0(\text{productos}) - \sum \Delta H_f^0(\text{materias energéticas})$$
$$\Delta H = Q_p$$

### 6.2.1. Reacción entre aluminio y óxido de hierro II



Entalpías

Al	=	0 kJ/mol
CuO	=	-157,30 kJ/mol
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	-1675,70 kJ/mol
Cu	=	0 kJ/mol

Peso atómico

Al	=	26,98 g/mol
Cu	=	63,54 g/mol
O	=	16 g/mol

- Entalpía  
 $0 \text{ kJ/mol} + 1 \text{ mol} \times (-1675,70 \text{ kJ/mol}) - 3 \text{ mol} \times (-157,30 \text{ kJ/mol}) - 0 \text{ kJ/mol} = -1203,8 \text{ kJ}$
- Cálculo de la masa (a través de su peso atómico)  
 $2 \text{ mol} \times 26,98 \text{ g/mol} + 3 \text{ mol} \times 63,54 \text{ g/mol} + 3 \text{ mol} \times 16 \text{ g/mol} = 292,58 \text{ g}$
- Entalpía de reacción  
 $\Delta H_r = -1203,8 \text{ kJ}$  por 292,6 g de compuesto (-4,114 kJ/g)

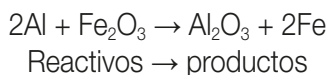
---

22  $\Delta H$ , abreviación para entalpía (calor) de reacción (J/mol).

23  $Q_p$ , calor transferido a presión constante.



### 6.2.2. Reacción entre aluminio y óxido de hierro III



Entalpías

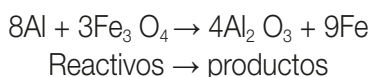
Al	=	0 kJ/mol
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	- 824,20 kJ/mol
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	-1675,70 kJ/mol
Fe	=	0 kJ/mol

Peso atómico

Al	=	26,98 g/mol
Fe	=	55,847 g/mol
O	=	16 g/mol

- Entalpía  
 $0 \text{ kJ/mol} + 1 \text{ mol} \times (-1675,70 \text{ kJ/mol}) - 1 \text{ mol} \times (-824,20 \text{ kJ/mol}) - 0 \text{ kJ/mol} = -851,5 \text{ kJ}$
- Cálculo de masa (a través de su peso atómico)  
 $2 \text{ mol} \times 26,98 \text{ g/mol} + 2 \text{ mol} \times 55,847 \text{ g/mol} + 3 \text{ mol} \times 16 \text{ g/mol} = 213,65 \text{ g}$
- Entalpía de reacción  
 $\Delta H_r = -851,5 \text{ kJ}$  por 213,65 g de compuesto (-3,985 kJ/g)

### 6.2.3. Reacción entre aluminio y óxido de hierro IV



Entalpías

Al	=	0 kJ/mol
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	=	-1118,4 kJ/mol
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	-1675,70 kJ/mol
Fe	=	0 kJ/mol

Peso atómico

Al	=	26,98 g/mol
Fe	=	55,847 g/mol
O	=	16 g/mol



- Entalpía  
 $0 \text{ kJ/mol} + 4 \text{ mol} \times (-1675,70 \text{ kJ/mol}) - 3 \text{ mol} \times (-1118,4 \text{ kJ/mol}) - 0 \text{ kJ/mol} = -3347,60 \text{ kJ}$
- Peso atómico  
 $8 \text{ mol} \times 26,98 \text{ g/mol} + 9 \text{ mol} \times 55,847 \text{ g/mol} + 12 \times 16 \text{ g/mol} = 910,46 \text{ g}$
- Entalpía de reacción  
 $\Delta H = -3347,60 \text{ kJ}$  por 910,46 g de compuesto (-3,677 kJ/gr)

Cabe considerar que la Ley de Hess establece que la entalpía de formación de los elementos en estado normal es nula.

Una vez obtenidos los datos de manera teórica, se procedió a llevar las reacciones a ensayos de laboratorio a fin de comprobar de manera empírica el poder calorífico en cuanto a su capacidad de generar una reacción exotérmica y determinar qué reacción era la más adecuada para continuar con el estudio.

## 7. ENSAYO EXPERIMENTAL

El objetivo de los siguientes ensayos fue determinar, a través de un método experimental, qué reacción poseía una mayor capacidad de generar liberación de energía calorífica (temperatura). Para esto, se procedió a masar pequeñas muestras, siempre en su correspondiente equilibrio estequiométrico, a fin de obtener el máximo rendimiento de la reacción.

De esta forma, se llevaron muestras de 6 g de los compuestos antes mencionados a un crisol de hierro fundido donde se inició la reacción a fin de verificar si:

- Sucede la reacción liberando energía calorífica.
- Es capaz de calentar el crisol.
- Es sostenida y no violenta (explosiva).

### 7.1. Aluminio y óxido de cobre II ( $2\text{Al} + 3\text{CuO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Cu}$ )

Los resultados obtenidos son negativos, ya que, si bien la reacción ocurre, esta es demasiado violenta, generando una sublimación<sup>24</sup> inmediata del compuesto una vez iniciada (Figura N° 14). Esto ocasionó que no hubiera una transferencia térmica desde la

---

<sup>24</sup> Cambio directo de estado sólido a gas, sin pasar por fase líquida.



reacción hacia el crisol, por lo que no existió una evidencia física de la energía calorífica entregada por esta, conforme se muestra en Figura N° 15.



Figura N° 14: "Inicio de la reacción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 15: "Resultado de la reacción".

Fuente: archivo del autor.

## 7.2. Aluminio y óxido de hierro III ( $2\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}$ )

Los resultados obtenidos son positivos, ya que la reacción ocurre y es sostenida por un periodo (Figura N° 16), lo cual permitió una transferencia térmica desde el compuesto hacia las paredes del contenedor, el que adquirió un color entre blanco y amarillo (Figura N° 17).



Figura N° 16: "Inicio de la reacción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 17: "Resultado de la reacción".

Fuente: archivo del autor.

## 7.3. Aluminio y óxido de hierro IV ( $8\text{Al} + 3\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 4\text{Al}_2\text{O}_3 + 9\text{Fe}$ )

Los resultados obtenidos son positivos, puesto que la reacción ocurre y es sostenida por un periodo, lo que permitió una transferencia térmica desde el compuesto hacia las paredes del contenedor, el cual adquirió un color entre amarillo pálido y anaranjado (Figuras N° 18 y 19).



Figura N° 18: "Inicio de la reacción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 19: "Resultado de la reacción".

Fuente: archivo del autor.

## 8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De los resultados obtenidos usando ambos tipos de óxido de hierro (III y IV) como agente oxidante y aluminio como reductor (combustible), se puede apreciar, utilizando la guía de temperatura para forjado y templado, que, mediante estas dos reacciones, la temperatura alcanzada fluctuó entre los 1.200 °C para el óxido de hierro III y 980 °C para el óxido de hierro IV, considerando que se utilizó 6 g de óxido de hierro III y 6,44 g de óxido de hierro IV para realizar la prueba.

Con los resultados obtenidos anteriormente, se determinó realizar pruebas de laboratorio con probetas de 150 g de compuesto, utilizando las reacciones de óxido hierro III y IV al ser estas las de mayor liberación de energía y las más estables durante la reacción, con la finalidad de determinar cuál de estas reacciones será la de mayor liberación de energía y capaz de perforar las probetas metálicas.

### 8.1. Primera prueba de perforación

El objetivo de la presente prueba fue determinar, de manera experimental, si la reacción química era capaz de perforar metal, para lo cual se diseñó un contenedor cilíndrico metálico conforme se detalla en la descripción de las pruebas.

#### 8.1.1. Descripción de la prueba

Probeta con aluminio y óxido de hierro IV ( $8Al + 3Fe_3O_4 \rightarrow 4Al_2O_3 + 9Fe$ ) con 152 g de compuesto, bajo relación estequiométrica.

Para realizar la prueba, se confeccionaron contenedores cilíndricos de hierro de 200 mm (largo) x 60 mm (diámetro) y una base de 5 mm de espesor como se muestra en la Figura N° 22. Con esto listo, se procedió al masado de 152 g de compuesto, como se muestra en las Figuras N° 20 y 21, y posterior iniciación de la reacción (Figura N°



23), de lo que se obtuvo como resultado una reacción de alta temperatura y capaz de calentar el metal, llevándolo casi hasta su punto de fusión, no siendo capaz de lograr la perforación de la base, conforme se muestra en las Figuras N° 24 y 25.

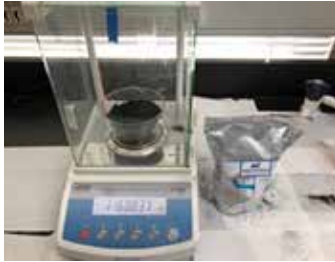


Figura N° 20: "Masado de óxido de hierro IV".

Fuente: archivo del autor.

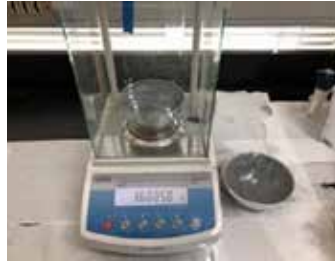


Figura N° 21: "Masado de polvo de aluminio".

Fuente: archivo del autor.

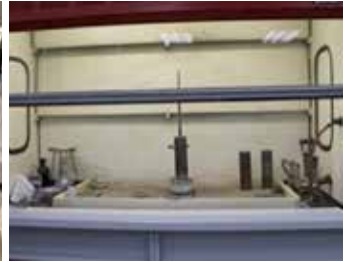


Figura N° 22: "Prueba sobre probeta cilíndrica de base de 5 mm de espesor (hierro)".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 23: "Reacción de óxido-reducción".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 24: "Calor transferido hacia la base".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 25: "Deslaminaciones sufridas por la probeta".

Fuente: archivo del autor.

## 8.2. Segunda prueba de perforación

Probeta con aluminio y óxido de hierro III ( $2Al + Fe_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe$ ) 142,5 g de compuesto, bajo relación estequiométrica.

El objetivo de la presente prueba fue determinar, de manera experimental, si la reacción química fue capaz de perforar metal, para lo cual se diseñó un contenedor cilíndrico metálico conforme se detalla a continuación.

### 8.2.1. Descripción de la prueba

Para llevarla a cabo, se confeccionaron contenedores cilíndricos de hierro de 200 mm (largo) x 60 mm (diámetro) y una base de 5 mm de espesor. Luego se procedió al



masado de 142,5 g (Figuras N° 26 y 27) de compuesto y posterior iniciación de la reacción (Figura N° 28), de lo que se obtuvo como resultado una reacción de alta temperatura, la cual, debido a su alto poder calorífico y rápida transferencia de calor, logró perforar la base de 5 mm de hierro (Figuras N° 29 y 30).

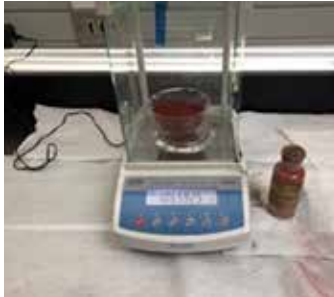


Figura N° 26: “Masado de óxido de hierro III”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 27: “Masado de polvo de aluminio”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 28: “Probeta metálica de 5 mm de espesor”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 29: “Perforación de la probeta en su base y medición de temperatura”.

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 30: “Vista de la base perforada”.

Fuente: archivo del autor.

### 8.3. Medición de temperatura alcanzada por la reacción

Dentro de las interrogantes que surgieron luego de realizadas las experiencias de laboratorio, se encontró al medir la temperatura alcanzada por la reacción en su fase líquida. Si bien se tenía un estimativo, considerando que el óxido de hierro funde a los 1.565 °C, se sabía que estaba por sobre esta temperatura.

Para responder la incógnita anterior, se procedió a medir la temperatura mediante un sensor IR<sup>25</sup> y su función “data log”<sup>26</sup> en el laboratorio de la ACAPOMIL, el cual

<sup>25</sup> IR, sigla del inglés, en español: infrarrojo (radiación del espectro luminoso).

<sup>26</sup> Data log, en español: registro de datos.





arrojó una tabla de datos, con los que se confeccionó el gráfico que se muestra en la Figura N° 31.

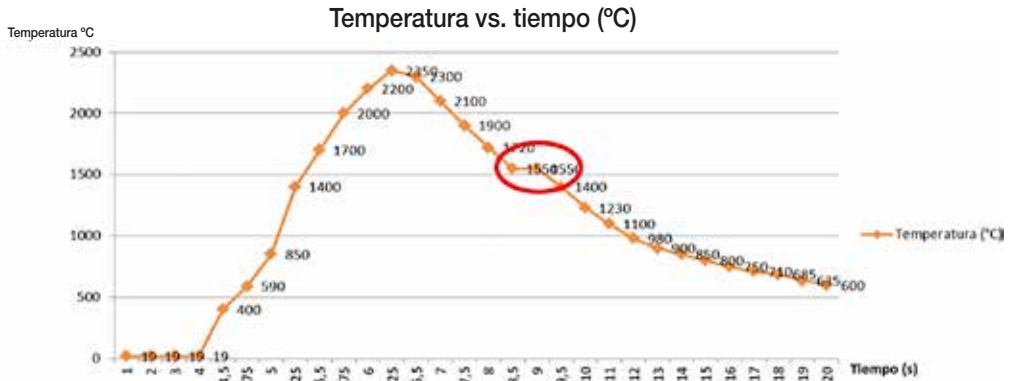


Figura N° 31: “Gráfico de temperatura versus tiempo”.

Fuente: elaboración propia.

En el gráfico anterior se puede evidenciar la máxima temperatura alcanzada por la reacción en su fase líquida y el tiempo que esta demora. También se puede apreciar el cambio de fase líquido-sólido, ya que, a la temperatura de 1.550 °C, se aprecia una línea horizontal que se mantiene constante por un periodo (encerrada en rojo, Figura N° 31), lo que indica el cambio de fase de la composición.

## 8.4. Construcción del crisol de prueba

Para medir la resistencia térmica y los daños que pueda causar la reacción, debido a su alta temperatura, se llevó a cabo la construcción de dos contenedores tipo crisol, el primero de cemento refractario y el segundo con cemento normal (cuyas propiedades se muestran en Tabla N° 3). A estos se les vació 200 g de compuesto. Posteriormente, se inició la reacción, como se muestra en las Figuras N° 32 y 33. Una vez terminada la reacción, se procedió a medir la temperatura externa e interna alcanzada por los crisoles (Figuras N° 34 a 37). Luego, se procedió a comparar ambos aislantes, lo que queda reflejado en la Tabla N° 4.

N°	TIPO DE CEMENTO	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
1	Cemento refractario Llama	0,15 W/(m °C)
2	Cemento normal de construcción (Melón)	0,8 W/(m °C)

Tabla N° 3: “Propiedades de materiales aislantes”.

Fuente: Serway y Jewett, 2004.





Figura N° 32: "Prueba realizada a ambos crisoles".  
Fuente: archivo del autor.

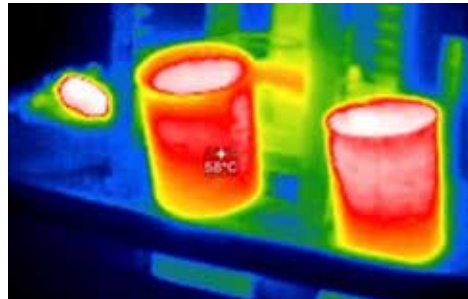


Figura N° 33: "Imagen térmica de ambos crisoles".  
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 34: "Temperatura exterior del crisol de cemento refractario".  
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 35: "Temperatura exterior del crisol de cemento normal".  
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 36: "Temperatura dentro del crisol con aislante refractario, luego de ocurrida la reacción".  
Fuente: archivo del autor.



Figura N° 37: "Temperatura del crisol con aislante normal, luego de ocurrida la reacción".  
Fuente: archivo del autor.



Nº	TIPO DE CEMENTO	PRUEBA EFECTUADA	TEMPERATURA (°C) EXT. MEDIDA LUEGO DE 1 MIN.
1	Cemento refractario Llaima	200 g de compuesto	33,9 °C
2	Cemento normal (Melón)	200 g de compuesto	86,8 °C

Tabla N° 4: "Resultados obtenidos".

Fuente: elaboración propia.

Como conclusión, se determinó utilizar el refractario Llaima como material aislante, dado que es el que menos presenta pérdida de calor hacia el exterior, lo que permite un mejor desempeño de la reacción.

## 8.5. Planos preliminares

El diseño preliminar se basó en las experiencias realizadas y los datos obtenidos en laboratorio, con los cuales se llegó a dos evaluaciones de prototipos. El primero de ellos mediante el uso de la fase líquida de la reacción química vertida sobre la UXO y, el segundo, usando los gases producidos por la combustión dirigidos hacia el artefacto a deflagrar. Para poder realizar esto, se trabajó con expertos de la planta de I2D de FAMAE.

El diseño de detalle se trabajó mediante diseño computacional (software inventor), junto a la gerencia de I2D de FAMAE (Figura N° 38).

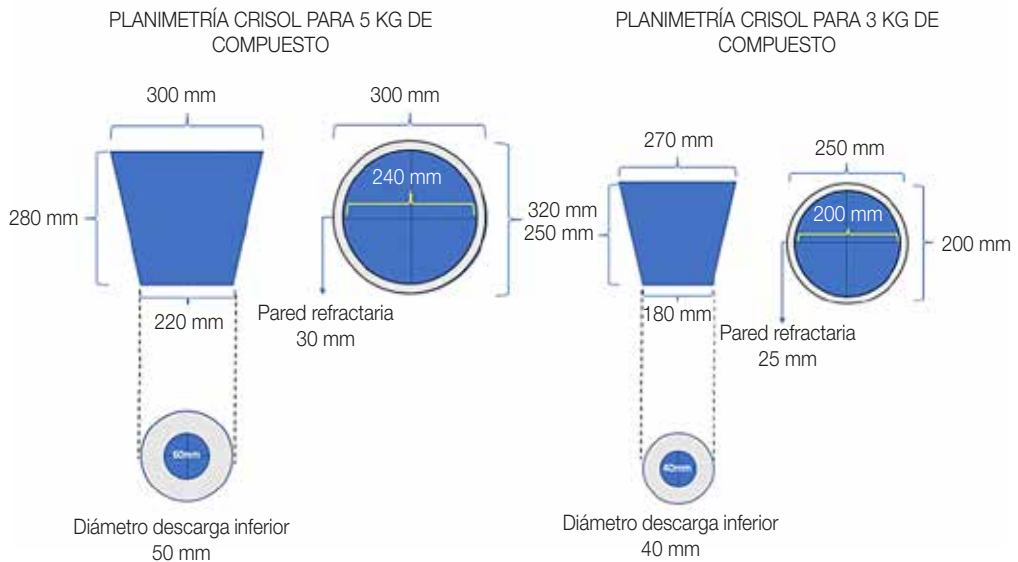


Figura N° 38: "Planimetría de detalle crisol 3 y 5 kg respectivamente".

Fuente: elaboración propia.



## 9. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Para validar la solución, se llevaron a cabo pruebas que determinaron el poder de perforación en placas metálicas y deflagración de explosivo, mediante un plan y protocolo de pruebas.

### 9.1. Perforación de placas

Para medir la capacidad de perforación en metal, se diseñó una torre de placas metálicas (placas de hierro de 2 mm, punto de fusión de 1.600 °C) (Figura N° 39), sobre la cual se instaló el crisol con compuesto a fin de dar inicio a la reacción. Esta, a su vez, por gravedad decantó sobre las placas y comenzó a perforarlas. Entre placa y placa se colocó explosivo (pentolita), proporcionado por FAMA E, a fin de comprobar, de manera empírica, si este deflagraba o detonaba producto de la elevada temperatura de la reacción. Es importante destacar que se escogió este tipo de placas por ser el único espesor disponible en el mercado en ese momento.

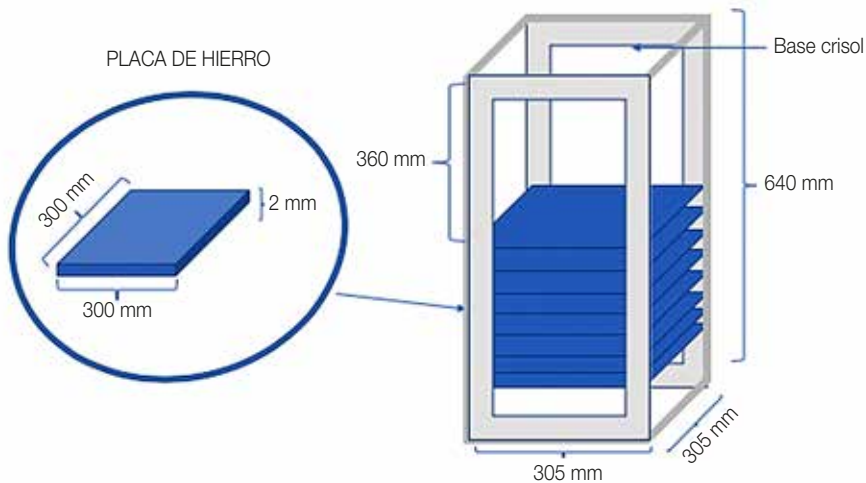


Figura N° 39: "Torre de perforación de placas".

Fuente: elaboración propia.

### 9.2. Perforación del cilindro

Para simular una UXO de geometría cilíndrica de 6 mm de espesor (Figura N° 40), se utilizó un cilindro al cual, mediante una válvula, se le introdujo aire comprimido a una presión a 35 psi (241 kPa), con la finalidad de asemejar en parte la presión producida por la deflagración interna del explosivo principal al momento de sus cambios de fases de sólido → líquido → vapor.

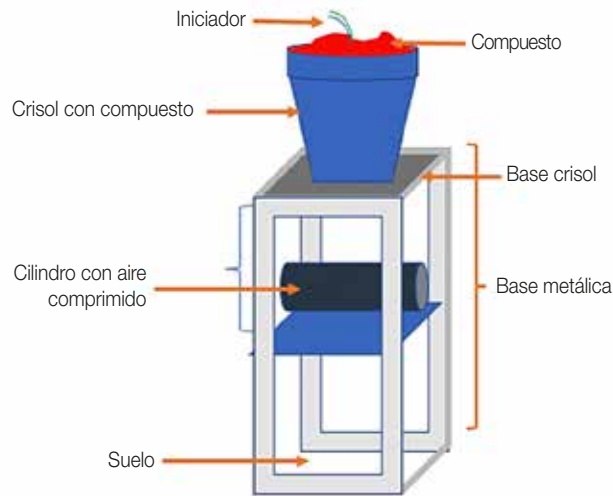


Figura N° 40: "Diagrama de la prueba de perforación de un cilindro metálico de 6 mm de espesor".

Fuente: elaboración propia.

### 9.2.1. Ejecución de las pruebas para crisol

Para ejecutar las pruebas, el trabajo se dividió en tres fases: el mezclado, homogenizado y masado de los reactivos; el llenado de los contenedores; y la introducción del explosivo (pentolita) entre las placas para activar los compuestos y medir su poder de perforación, junto con la deflagración del explosivo.

### 9.2.2. Primera fase

Mediante el uso de mezcladores automáticos, se procedió al homogenizado de los reactivos, como se muestra en las Figuras N° 41 a 43.



Figura N° 41: "Introducción de elementos reactivos en el mezclador".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 42: "Óxido de hierro III y aluminio en el mezclador".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 43: "Inicio del proceso de homogenizado mediante rotación automática del mezclador".

Fuente: archivo del autor.



### 9.2.3. Segunda fase

Con la mezcla ya masada anteriormente (Figura N° 44), se procedió a llenar el primer contenedor de la prueba, para lo cual se situó el crisol sobre la torre de placas y se procedió a su llenado (3 kg), de acuerdo con el protocolo de pruebas (Figura N° 45).



Figura N° 44: "Mezcla masada".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 45: "Llenado de crisol".

Fuente: archivo del autor.

### 9.2.4. Tercera Fase

En esta fase, se colocó la pentolita entre las placas (Figura N° 46) y el iniciador dentro del crisol (Figura N° 47), con lo que se dio inicio a la prueba desde la sala de control.



Figura N° 46: "Introducción de pentolita entre las placas".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 47: "Crisol con el sistema de ignición instalado".

Fuente: archivo del autor.

## 10. RESULTADO OBTENIDO

El resultado obtenido fue una combustión sostenida de 20 segundos, donde se obtuvo una reacción de alta temperatura, la cual, debido a sus compuestos, generó





hierro en estado líquido, el que, por medio de la gravedad, comenzó a descender, perforando 3 placas metálicas, de 2 mm cada una, situadas bajo él, y deflagrando el explosivo situado entre ellas. Lo anterior se pudo apreciar en las secuencias fotográficas de las Figuras N° 48 y 49.



Figura N° 48: “Secuencia fotográfica de la prueba de perforación, se aprecia como el hierro líquido perfora las placas y deflagra el explosivo”.

Fuente: elaboración propia.



Figura N° 49: “Daño causado por la reacción a las placas”.

Fuente: elaboración propia

## 11. PRUEBA DE VALIDACIÓN

Para validar el dispositivo deflagrador, se diseñó una prueba conforme a las siguientes fases.

### 11.1. Primera Fase

La primera fase consistió en el masado y homogenizado para un dispositivo de 3 kg de compuesto.



### 11.1.1. Segunda fase

En esta fase se introdujo aire comprimido a la UXO a escala (35 psi / 241kPa), para simular, en parte, la presión generada por los gases al momento de la deflagración del explosivo principal como se muestra en la Figura N° 50. Seguido de esto, se la situó debajo del crisol a una separación de 150 mm (Figura N° 51).



Figura N° 50: "UXO simulada de 5 mm de espesor".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 51: "UXO simulada situada bajo el crisol".

Fuente: archivo del autor.

## 11.2. Resultado de la prueba

El resultado de la prueba se consideró exitoso, ya que se logró una combustión sostenida y no explosiva, lo que permite la obtención de hierro líquido (Figura N° 52), el cual, producto de la fuerza de gravedad, cayó sobre la UXO a escala y lo perforó (Figura N° 53), lo que, finalmente, permitió validar la reacción y el dispositivo deflagrador de artefactos explosivos para UXOs de espesor de hasta 6 mm.



Figura N° 52: "Hierro líquido sobre la UXO a escala".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 53: "Daño causado a la UXO simulada".

Fuente: archivo del autor.



## 12. CONCLUSIONES

Durante el presente trabajo, se pudo evidenciar que existe una falta de capacidad institucional al no contar con un medio que permita realizar una deflagración sin detonación ni explosión. Lo anterior permitió el desarrollo de este trabajo en función de generar una reacción química de alta temperatura que permita perforar metal y deflagrar explosivo.

Gracias al aporte de la Escuela de Ingenieros del Ejército, se pudo determinar los requerimientos que el dispositivo debe cumplir. Por otra parte, se pudo medir de manera empírica los diferentes espesores de UXOs y, así, determinar el tipo de artefacto sobre el cual puede trabajar el dispositivo.

Además, se logró, de manera experimental, determinar una reacción química de óxido-reducción, la cual fue capaz de entregar una elevada temperatura que permitió fundir y perforar metal, quedando demostrado en las pruebas de perforación de placas metálicas.

A su vez, se pudo comprobar la teoría de los resultados obtenidos en laboratorio sobre la reacción, en cuanto a su capacidad de perforación y deflagración de explosivo, lo que quedó demostrado en las diferentes pruebas realizadas en terrenos de FAMA E.

Por otra parte, se considera que se debe seguir investigando para aprovechar los datos obtenidos durante la presente investigación, a partir de la cual se logra determinar las propiedades de los compuestos a utilizar, así como los diseños realizados, los que quedaron establecidos en los protocolos y planes de prueba efectuados. Todo lo anterior servirá para aportar a la Institución con un mecanismo más, el cual irá en directo apoyo a las unidades de ingenieros del Ejército. Lo anterior permitirá lograr un bajo orden al momento de neutralizar un artefacto explosivo en lugares donde exista la generación de un posible daño colateral producto de una detonación.

Por último, las pruebas realizadas tanto en el laboratorio de la Academia Politécnica Militar así como las efectuadas en FAMA E, sirvieron de base para diseñar el prototipo deflagrador de artefactos explosivos, para lo cual se hace necesario realizar pruebas sobre artefactos explosivos reales a fin de comprobar de manera veraz el real funcionamiento de la composición y desempeño del prototipo.

## BIBLIOGRAFÍA

Academia Politécnica Militar (2015). *Manual de Memorias, Tesis o Actividad Equivalente*. Santiago, Chile: Academia Politécnica Militar.





Comisión Nacional de Desarrollo Humanitario (2018). *Problemática de las minas A.P.* Recuperado de: <http://www.cnad.cl/sitio/educacion%20y%20prevencion/approb.htm>.

División Educación (2011). *Guía para la redacción de citas bibliográficas*. Santiago, Chile: División Educación.

Institute for Defense Analyses (2005). *Operational Evaluation Test of Mine Neutralization Systems*. Alexandria, Estados Unidos: Institute for Defense Analyses.

Shriver, D., Atkins, P. y Langford, C. (1997). *Química Inorgánica*. Barcelona, España: Reverté.

Serway, R. y Jewett, J. (2004). *Physics for scientists and engineers*. California, Estados Unidos: Thomson Brooks/Cole.

Macdonald, J. (1 de septiembre de 2001). *Assessing Sites Contaminated with Unexploded Ordnance: Statistical Modeling of Ordnance Spatial Distribution*. *Environmental Science & Technology*, 35(17), 372A-376A.

Murray, A. B. (1989). *Explosives, propellants & pyrotechnics*. Londres, Reino Unido: Brassey's.

Orbovic, N. B. (2011). *Explosivos propelentes y pirotecnia*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.

Ejército de Chile (2015). *Procedimientos EOD*. Santiago, Chile: Ejército de Chile.

Real Academia Española (2016). *Real Academia Española*. Recuperado de: <http://www.rae.es>