



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

**Fabricación aditiva en unidades de desactivación de
explosivos**

Autor

D. Álvaro López-Bustos de las Heras

Director/es

Director académico: D. Marcos Pueo Arteta

Director militar: Cap. D. Rafael Ucendo Escudero

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2019

**PÁGINA
INTENCIONADAMENTE
EN BLANCO**

Al Caballero Alférez Cadete D. Rodrigo Ivorra Briso.

Al Caballero Alférez Cadete D. Miguel Sánchez Blanca.

A la Dama Alférez Cadete Dña. Berta Casans Gabasa.

**PÁGINA
INTENCIONADAMENTE
EN BLANCO**

RESUMEN:

Gracias a la creciente incorporación de la tecnología de fabricación aditiva en el ámbito empresarial e industrial, se ha planteado la disyuntiva de si debe ser integrada como material en dotación para unidades de las Fuerzas Armadas. Trabajos como, *Impresión 3D como sistema logístico alternativo en Operaciones*, del Teniente D. Jose María Blanco Borrego están sentando las bases para estudios similares en otras unidades.

Este Trabajo de Fin de Grado pretende hacer un estudio de las capacidades que la fabricación aditiva puede ofrecer a las unidades de desactivación de explosivos. Se hace un pequeño estudio sobre la fabricación de repuestos de los materiales con los que constan estas unidades, centrándose en el equipo robot "TEODOR". Así como la fabricación de réplicas de minas para la formación del personal. Por otra parte, se contempla la replicación de minas para su uso en instrucción y adiestramiento. Esta memoria también recoge la realización de modelos digitales y la capacidad de análisis que otorgan los programas de diseño asistido por ordenador a la hora de tomar decisiones sobre cómo fabricar piezas mediante impresión 3D en función de para qué vayan a ser destinadas.

Para concluir, aunque la fabricación aditiva en el ámbito de defensa tiene mucho rango de mejora, se ha observado que es útil no solo para fabricar repuestos de manera urgente para solventar un problema de forma temporal hasta que se suministre el repuesto original, sino también para fabricar todo tipo de pequeños objetos con la finalidad de mejorar las prestaciones de los originales.

Palabras clave: Fabricación aditiva, impresión 3D, unidad de desactivación de explosivos, zapadores, ejército.

**PÁGINA
INTENCIONADAMENTE
EN BLANCO**

ABSTRACT:

Thanks to the increasing incorporation of the technology of additive manufacturing in the business and industrial field, the question of whether it should be integrated as material in the provision for units of the Armed Forces has been raised. Studies such as *“3D Printing as an alternative logistic system in Operations”* from Lt. Mr. Jose María Blanco Borrego are settling the basis for similar projects in other units.

This project aims to study the capabilities that additive manufacturing can offer to the explosives deactivation units. A small study is made on the manufacture of spare parts of the materials with which these units consist, focusing on the "TEODOR" robot equipment. Also the manufacture of mines with training purposes. This report also includes the realization of digital models and the analysis capacity that computer-aided design programs grant when making decisions about how to manufacture parts using 3D printing depending on what they are going to be used for.

To conclude, although additive manufacturing in the defense sector has still a lot of improvement to develop, it has been observed that not only it is useful for manufacturing spare parts urgently to solve problems temporarily until the original spare part is supplied, but also to manufacture all kinds of small objects in order to improve the performance of the originals.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, explosive deactivation unit, combat engineers, army.

**PÁGINA
INTENCIONADAMENTE
EN BLANCO**

LISTA DE CONTENIDO

LISTA DE CONTENIDO	9
LISTADO DE ILUSTRACIONES	10
LISTADO DE TABLAS	11
LISTADO DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVO Y ALCANCE	14
3. ESTADO DE LA CUESTIÓN	15
4. UNIDADES DE DESACTIVACIÓN DE EXPLOSIVOS EN EL ET	17
4.1. Conceptos generales	17
4.2. Cometidos	19
4.3. Necesidades	20
5. ROBOT DE DESACTIVACIÓN DE EXPLOSIVOS “TEODOR”	22
5.1. Conceptos generales	22
5.2. Aplicación de la fabricación aditiva	24
5.2.1. Eslabón del tren de rodaje	25
5.2.2. Otras posibilidades	27
6. ARTEFACTOS EXPLOSIVOS	29
6.1. Análisis de minas en ZO	29
6.2. Aplicación de la fabricación aditiva	31
6.2.1. Mina M14	32
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	36
7.1. Conclusiones	36
7.2. Líneas futuras	37
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
8.1. Bibliografía	39
8.2. Internet	41
9. ANEXOS	43
9.1. ANEXO A. Tecnologías de impresión 3D según ISO 17296-2	43
9.2. ANEXO B. Las FAS en operaciones internacionales.	53

9.3. ANEXO C. Clasificación de las minas en Irak y Líbano	55
9.4. ANEXO D. Mina M14. Proceso de digitalización.	56

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Distintivo EOD.	17
Ilustración 2: Sondeador a la izquierda y Vallon VMR3G a la derecha.	20
Ilustración 3: Robot "TEODOR".	22
Ilustración 4: Estación de control del "TEODOR".	23
Ilustración 5: Repuestos de 1º escalón.	24
Ilustración 6: Eslabón del tren de rodaje a la izquierda y su modelo digital a la derecha.	25
Ilustración 7: Eslabón del tren de rodaje en negro y modelos impresos en rosa.	26
Ilustración 8: Diseño de acople para la orejeta frontal.	27
Ilustración 9: Diseño del acople con una estructura de madera arriba y orejeta frontal del TEODOR abajo.	27
Ilustración 10: Diseño del accesorio para la pinza a la izquierda y pinza del TEODOR a la derecha.	28
Ilustración 11: Minas C/C TM 46 y TM 62.	30
Ilustración 12: Sección mina C/P M14.	30
Ilustración 13: Réplica de la mina M14 impresa en ABS.	31
Ilustración 14: Croquis explicativo de como neutralizar una M14.	32
Ilustración 15: La modificación de la deformación total en mm en modelo digital hueco.	33
Ilustración 16: Deformación total en mm en modelo digital sólido.	34
Ilustración 17: Superficie más solicitada del modelo digital hueco.	34
Ilustración 18: Sección más solicitada del modelo digital sólido.	35
Ilustración 19: Proceso BJ.	43
Ilustración 20: Proceso MJ.	44
Ilustración 21: Proceso SLA.	45
Ilustración 22: Proceso DLP.	46
Ilustración 23: Proceso FDM.	47
Ilustración 24: Proceso SLM.	48
Ilustración 25: Proceso EBM.	49

Ilustración 26: Proceso SLS.	50
Ilustración 27: Proceso LOM.	51
Ilustración 28: Proceso DED.	52
Ilustración 29: Media sección acotada de la M14.	56
Ilustración 30: Sólido de revolución.	56
Ilustración 31: Modelo digital de la M14.	57

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Minas más frecuentes según su uso y ubicación.	29
Tabla 2: Minas según su uso y ubicación.	55

LISTADO DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

BJ	Binder Jetting (Inyección de aglutinante)
C/C	Contra Carro
C/P	Contra Personal
DED	Directed Energy Deposition (Deposición de energía dirigida)
DLP	Digital Light Processing (Procesado Digital de Luz)
EBM	Electron Beam Melting (Fundido por Haz de Electrones)
EOD	Explosive Ordnance Disposal (artificieros)
ET	Ejército de Tierra
EUFOR	European Union Force (Fuerza de la UE)
EUNAVFOR	European Union Naval Force (Fuerza Naval de la UE)
EUTM	European Union Training Mission (Misión de Entrenamiento de la UE)
FA	Fabricación Aditiva
FAS	Fuerzas Armadas de España
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelado por Deposición Fundida)
IED	Improvised Explosive Device (Artefacto Explosivo Improvisado)
ISO	International Standards Organisation (Organización Internacional de Estandarización)
LOM	Laminated Object Manufacturing (Manufactura de Objetos Laminados)
MADOC	Mando de Adiestramiento y Doctrina
MJ	Material Jetting (Inyección de Material)
ONU	Organización de Naciones Unidas
PBF	Powder Bed Fusion (Fusión de Lecho de Polvo)
PPT	Pliego de Prescripciones Técnicas
SLA	Stereolithography (Estereolitografía)
SLM	Selective Laser Melting (Fundido Selectivo por Láser)
SLS	Selective Laser Sintering (Sinterizado Selectivo por Láser)
TEODOR	Telerob Explosive Ordnance Disposal and Observation Robot (Robot de Eliminación de Municiones, de Artefactos Explosivos y Observación de Telerob)
TFG	Trabajo de Fin de Grado
UE	Unión Europea
UV	Ultravioleta
UXO	Unexploded Ordnance (Artefactos sin Explosionar)
ZO	Zona de Operaciones

1.INTRODUCCIÓN

Hoy en día, podemos observar como la tecnología de Fabricación Aditiva (FA) está adquiriendo una gran importancia en nuestra sociedad gracias a su amplio abanico de aplicaciones. Encontramos desde una impresora doméstica de extrusión de termoplásticos de gama baja hasta una impresora industrial de fundido de polvo metálico por haz de electrones. Estas impresoras son utilizadas por todo tipo de usuarios gracias a la multiplicidad de usos. Estas, permiten cubrir ciertas necesidades diarias de una persona, un hogar, una empresa o incluso de un ejército, como, por ejemplo, imprimir prótesis de bajo coste (Enabling the future, 2019), sustituir escayolas por férulas hechas a medida (Codina, E, 2018), o reparar “in-situ” alguna parte dañada del equipo de una unidad de marines desplegada en zona de combate (DefenseTech, 2017).

Además de proporcionar soluciones específicas para cada situación, las impresoras 3D han permitido el crecimiento en la industria de inyección de plásticos de lo que se conoce como “small batch production”, un tipo de producción en lotes pequeños (normalmente menos de 500 unidades). Este método antes de la aparición de la tecnología de FA era prácticamente inviable económicamente dado el alto coste que suponen los moldes de inyección convencionales frente a los creados con impresoras 3D.

Así pues, esta tecnología llamada a revolucionar la logística ofrece un servicio global de diseño, impresión y fabricación con numerosas aplicaciones para el sector de la defensa. Al hablar de logística en el sector de la defensa, uno de los pilares críticos es el abastecimiento de repuestos ya que de ello depende que se pueda seguir haciendo uso de los sistemas de armas para cumplir la misión.

En línea con lo anterior, otro factor importante en la logística es el tamaño del stock a mantener, es decir, el nivel o dotación. Tanto el stock desplazado a Zona de Operaciones (ZO) como el que se debe mantener en territorio nacional, ya que un almacén “disminuido”, sobre todo en los bienes menos críticos, significa una baja huella logística que facilitará los procesos de logística inversa y medioambiental.

Es por esto, que la dotación de este tipo de impresoras a las unidades del Ejército de Tierra (ET) podría suponer una reducción en la huella logística mejorando la eficacia y la eficiencia de la cadena logística, además de convertirse en una herramienta de investigación de nuevas capacidades en el ámbito de la defensa (Blanco Borrego, J. M, 2017).

2.OBJETIVO Y ALCANCE

El origen de este trabajo es una propuesta del Batallón de Zapadores X de la Brigada “Guzmán el Bueno” X, por considerarse el mismo, una cuestión de potencial importancia en el ámbito que nos atañe.

El objetivo principal de esta memoria es hacer un estudio de las posibles aplicaciones que ofrece la FA dentro de las unidades de desactivación de explosivos (unidades EOD), para así poder constatar si las máquinas de impresión 3D tienen o no cabida en las mismas.

Para ello se van a realizar las siguientes tareas:

- Estudiar el equipo y las herramientas que utilizan las unidades EOD, con el fin de determinar la viabilidad de la fabricación de repuestos y accesorios con tecnología de impresión 3D.
- Analizar los artefactos explosivos que se encuentran las Fuerzas Armadas (FAS) en operaciones internacionales (Líbano e Iraq) para determinar las posibles aplicaciones que podría tener la FA en la lucha contra los mismos.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La impresión 3D es el proceso por el que se crean objetos mediante la adición de material con la información tridimensional recogida en un archivo digital, caracterizándose por añadir material en capas para crear el objeto, en vez de sustraerlo como los métodos tradicionales. En los últimos años, la impresión 3D ha experimentado un exponencial aumento de sus capacidades en cuanto a materiales y métodos de fabricación, desde la adhesión sucesiva de láminas de papel hasta la fundición de metales mediante haz de electrones (Bournias Varotsis, A, 2019).

Respecto a la FA en el ámbito de defensa, se puede afirmar que esta se ha consolidado como una importante línea de investigación en los ejércitos de todo el mundo, sobre todo en aquellos que disponen de una capacidad mayor, en cuanto a recursos (tecnológicos y económicos) se refiere. En Estados Unidos la empresa Raytheon ha sido capaz de fabricar mediante la impresión 3D, el 80% de un misil de diseño propio (Impresoras3D.com, 2019). También se ha realizado un proyecto acerca de un detector químico de explosivos el cual utiliza una “nariz de perro” impresa en 3D. Esta aprovecha el sistema de olfateo de los perros para incrementar la capacidad detectora en un factor de 18 frente a detectores comerciales tradicionales (Staymates, 2016).

El uso de la misma a alto nivel, ha llevado al Cuerpo de Marines de Estados Unidos a diseñar una máquina capaz de fabricar barracones con mortero aditivamente (Díez Cámara, O, 2018). De la misma forma ha conducido a “E&E Associates” a investigar la posibilidad de crear una impresora 3D para la Armada estadounidense cuyo material de impresión sea material explosivo, con el fin de fabricar de esta forma, artefactos explosivos en función de la necesidad requerida (Lucía, C, 2018).

En cuanto al uso de la misma en niveles tácticos, los marines estadounidenses han llevado a varias zonas de combate, pequeños drones de reconocimiento que están fabricados de forma aditiva, como el “Nibbler”. Este es capaz de ser fabricado por impresoras 3D de bajo coste en tiempos relativamente cortos respecto al tiempo de suministro logístico normal para un medio de este tipo (Erwin, S, 2017).

En cuanto a este tema, el Ministerio de Defensa de España ha llevado a cabo diversos proyectos al respecto desde el año 2014 (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2019). En primer lugar, investigadores del Centro Universitario de la Defensa Zaragoza junto con investigadores del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de UNIZAR, han planteado las bases de los

siguientes proyectos con el artículo Tecnologías de impresión 3D para su uso logístico en operaciones (Jiménez Pacheco, R, 2014). Posteriormente, avanzando en esta línea de investigación, el grupo de investigadores ha colaborado con la Agrupación de Apoyo Logístico 41 de Zaragoza para el diseño, fabricación y estudio de resultados de algunas piezas de repuesto (Cajal Hernando, C, 2015). Por último en los años 2016 y 2017 se ha logrado un gran progreso en la investigación, incluyendo en la “XXX Campaña Antártica” una impresora 3D usada para el mantenimiento y mejora de las instalaciones y equipos de la Base Antártica española “Gabriel de Castilla” (Vicente Oliva, S, 2016), (Pueo Arteta, M, 2017).

Actualmente, el impulso principal en la introducción de la FA en el ET lo está llevando a cabo la Agrupación de Apoyo Logístico 41, la cual ha diseñado un módulo proyectable¹ de impresión 3D contenido en un contenedor de 20 pies, con el mismo se es capaz de diseñar y elaborar diferentes repuestos de diversa índole (Ejército de Tierra (1), 2017). Así mismo, en la Brigada de Infantería Ligera Aerotransportable “Galicia” VI, se ha desarrollado un TFG sobre el uso de impresoras 3D a nivel táctico con el fin de poder llevar a cabo la fabricación de piezas que mejoren la acoplabilidad de accesorios al fusil de asalto HK G36E (de dotación en el ET) (Núñez Sánchez, F, 2018).

Por último, el TFG del Teniente de Artillería D. José María Blanco Borrego, titulado “Impresión 3D como sistema logístico alternativo en Operaciones” elaborado el año 2017 estudiaba la posibilidad de fabricación de ciertos repuestos para el sistema misil “HAWK” mediante un sistema de FA concluyendo que si se dotara este tipo de tecnología al sistema logístico tradicional de las FAS se conseguiría una reducción del tiempo de entrega de repuestos, aumentando en consecuencia la operatividad de sus unidades (Blanco Borrego, J. M, 2017).

¹ Proyectable se refiere a un módulo con dimensiones estándar (como el contenedor de 20 pies) que facilita su transporte a ZO.

4.UNIDADES DE DESACTIVACIÓN DE EXPLOSIVOS EN EL ET

4.1. Conceptos generales

Las unidades EOD del ET son unidades de ingenieros cuya estructura orgánica está compuesta, principalmente, personal de la especialidad fundamental de ingenieros, titulado como EOD²/EOR³ (Ejército de Tierra (2), 2005).



Ilustración 1: Distintivo EOD.

Fuente: Ejército de Tierra (3), 2019.

Estas están encuadradas en las unidades de apoyo de los Batallones y Regimientos de zapadores e ingenieros. Estas unidades son de gran relevancia puesto que están encargadas del reconocimiento, neutralización, investigación y desactivación de municiones, tanto en territorio nacional como en ZO, y artefactos explosivos improvisados (IED). Esto se debe a que este tipo de cometidos deben ser realizados por personal con la aptitud EOR y/o EOD. La capacitación EOD en España está basada en las siguientes aptitudes (Ejército de Tierra (4), 2011):

- La desactivación de municiones convencionales (CM D).
- La desactivación de IEDs (IEDD).
- La desactivación de municiones y artefactos explosivos improvisados, bien sean biológicos, químicos o radiológicos.
- El reconocimiento de municiones e IEDs (EOR).

² EOD: Personal encargado de la neutralización o desactivación de artefactos explosivos.

³ EOR: Personal encargado del reconocimiento de artefactos explosivos.

El desarrollo de las operaciones en las que ha estado presente España en los últimos años ha puesto de manifiesto la importancia de las unidades EOD en la lucha contra artefactos explosivos⁴ a la hora de realizar un despliegue en el exterior, cumpliendo los compromisos recogidos en la legislación vigente en cuanto a restricciones de uso y destrucción de ciertos artefactos se refiere (Ejército de Tierra (4), 2011):

- Ley 33/1998, de 5 de octubre, de *Prohibición de minas antipersonal y armas de efecto similar* (BOD núm. 197 de 8 de octubre de 1998).
- Ratificación de la *Convención sobre la prohibición del empleo, almacenamiento, producción y transferencia de minas antipersonal y sobre su destrucción*, firmada el 3 de diciembre de 1997 (BOD núm. 52 de 17 de marzo de 1999).
- Ratificación del *Protocolo II (Anexo a la Convención sobre prohibiciones o restricciones de ciertas armas convencionales que puedan considerarse excesivamente nocivas o de efectos indiscriminados, sobre prohibiciones o restricciones del empleo de minas, armas trampa y otros artefactos)*, según fue enmendado el 3 de mayo de 1996 (BOD núm. 221 de 12 de noviembre de 1998).
- Ratificación del *Protocolo V (Anexo a la Convención sobre Restos Explosivos de Guerra (REW))*, firmada el 9 de febrero de 2008 (BOE núm. 57 de 7 de marzo de 2007).
- Ratificación del *Tratado de Oslo sobre la Prohibición de bombas de racimo* (17 de junio de 2009).

Para la realización de su trabajo, las unidades EOD cuentan con un material muy diverso dividido en bloques en función de su uso:

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| • Investigación | • Protección |
| • Remoción ⁵ | • Parque ⁶ |
| • Detección | • Ataque ⁷ |
| • Iluminación | |

⁴ Incluidos los materiales explosivos (p. ej. minas C/P) prohibidos por los tratados internacionales que España ha ratificado.

⁵ Material empleado para la retirada de la amenaza explosiva a una distancia de seguridad.

⁶ Material de apoyo general (p. ej. Un pico, una pala, una maza, sacos terreros...).

⁷ Material de ataque a los artefactos explosivos.

4.2. Cometidos

Las capacidades que proporcionan las unidades EOD y EOR son el reconocimiento y desactivación o neutralización de municiones e IEDs, así como la recogida de evidencias de IED para identificar posibles redes de fabricación de artefactos (Ejército de Tierra (4), 2011).

Las misiones de los ingenieros se clasifican como misiones de apoyo al combate⁸ y misiones de apoyo general de ingenieros⁹. Los cometidos de las unidades EOD/EOR están encuadrados dentro de las misiones de apoyo general, aunque en función de la situación, las unidades EOD pueden realizar misiones de apoyo al combate, generalmente en apoyo a la movilidad¹⁰ de otras unidades.

La misión EOD es proporcionar las capacidades operativas de la desactivación o neutralización mediante la resolución de un incidente EOD que afecte al funcionamiento de las unidades u organismos a los que apoye (movilidad de las unidades, desorganización de las comunicaciones, degradación de la moral, paralización de bases aéreas...) (Ejército de Tierra (4), 2011).

Para llevar a cabo esta misión, las unidades EOD deben estar capacitadas e instruidas para cumplir con los siguientes cometidos:

- Labor preventiva, es decir, acciones encaminadas a prevenir los riesgos derivados de la existencia o posible existencia de artefactos explosivos improvisados (IED,s) y de municiones.
- El proceso de desactivación o neutralización, para la eliminación de municiones y de IED,s.
- El análisis de efectos o estudio, con fines periciales y de inteligencia, de los resultados y restos de las explosiones producidas por municiones o IED,s.

⁸ Apoyo al combate es el conjunto de cometidos orientados a complementar los cometidos de las unidades de maniobra.

⁹ Apoyo general de ingenieros es el conjunto de cometidos orientados a mejorar el entorno en el que el resto de unidades desarrollan sus trabajos.

¹⁰ Apoyo a la movilidad es el conjunto de cometidos orientados a facilitar la movilidad de las unidades de maniobra.

4.3. Necesidades

La heterogeneidad de los cometidos que se asignan a las unidades EOD exige del empleo de una organización flexible y una elevada coordinación técnica por parte de los equipos, del ingenio del personal a la hora de aplicar sus conocimientos y de materiales diversos. Sin embargo, los materiales de protección y desactivación no aseguran la eliminación total de los riesgos derivados de los explosivos. Es por esto por lo que se definen unos principios de seguridad¹¹, de los que cabe destacar la cualificación y la instrucción que reciben los EOD debido a ellos, que se basan en que el personal debe tener los conocimientos técnicos necesarios (certificados) y debe aplicarlos en un entorno de seguridad (instrucción) para corregir errores y evitar estos en una situación real (Ejército de Tierra (4), 2011).

De esto último, se puede deducir que para aumentar la seguridad se pueden hacer dos aproximaciones básicas:

- Mejorar los materiales: puesto que es mucho más rápido y seguro hacer una limpieza de área con un detector de minas dual VALLON VMR3G que con un bastón sondeador. Un sondeador es una aguja de unos 30 cm de largo que se emplea pinchando en el terreno de forma metódica sobre un área con la finalidad de determinar la presencia de artefactos explosivos o no en esa zona (ver ilustración 2).



Ilustración 2: Sondeador a la izquierda y Vallon VMR3G a la derecha.

Fuente: Vallon, 2019.

¹¹ Que tampoco eliminan totalmente los riesgos, no obstante están diseñados para reducirlos.

- Mejorar las tácticas, técnicas y procedimientos: a partir de la experiencia nacional e internacional se realizan informes de los que aprender sobre errores cometidos.

Acorde con la visión de la Brigada 2035¹² que busca integrar nuevas tecnologías civiles y militares (Ejército de Tierra (5), 2018), la opción más versátil y que mejor se adapta a las necesidades del ET es la de invertir en material. En particular, el robot EOD es la herramienta que permite solventar incidentes IED, sin que el operador EOD se adentre en la zona de exclusión¹³. Por tanto, cuantas más capacidades tenga, mayor será el número de situaciones en las que se podrá usar.

Para ello, se plantea usar la impresión 3D para la fabricación de accesorios de los equipos de desactivación de explosivos actuales permitiendo aumentar las capacidades de los mismos. Debido a la versatilidad de la FA sería posible adaptar los equipos a las diferentes situaciones que se plantean en cualquier teatro de operaciones en los que se vean involucrados.

¹² La Brigada 2035 es la visión que tiene el Jefe de Estado Mayor del ET sobre cómo ha de ser el ET en el año 2035.

¹³ Una zona de exclusión relativa a un incidente EOD, es la zona en la que solo permanecerá el personal EOD responsable de la resolución de dicho incidente (esto es la zona más cercana al UXO, en consecuencia, la más peligrosa).

5.ROBOT DE DESACTIVACIÓN DE EXPLOSIVOS “TEODOR”

5.1. Conceptos generales

El robot de desactivación de explosivos “TEODOR” (ver ilustración 3) es la herramienta utilizada para actividades de reconocimiento, remoción y desactivación de artefactos explosivos de dotación en el ET. Hay diferentes tipos de robot de desactivación, normalmente caracterizados por su tamaño, autonomía y alcance. Actualmente el ET está dotado de este robot (adquirido en el año 2012 a “MIGERTRON SEGURIDAD, S.L.”) por la movilidad que le otorga el tren de rodaje de cadenas, hasta las dos horas de autonomía con las baterías y por la posibilidad de manejarlo a distancia sin la necesidad de un cable. Este tipo de medios se utilizan para sustituir a los operadores EOD en situaciones peligrosas que se puedan resolver mediante las capacidades del robot como pueden ser la apertura de puertas y ventanas, el movimiento de obstáculos, la investigación de los objetos sospechosos con los diferentes medios de detección del robot o la neutralización de artefactos explosivos con medios disruptores¹⁴.



Ilustración 3: Robot “TEODOR”.

Fuente: Posibilidad de empleo de robots por las PU,s de combate en escenarios urbanos (Ejército de Tierra (6), 2008).

¹⁴ Los disruptores de agua son armas de ataque que utilizan una masa de agua para separar las partes de un artefacto explosivo sin que este detone.

Sus características principales son (Ejército de Tierra (7), 2012):

- Tren de rodaje eléctrico de cadenas compuesto por eslabones de metal que incluyen una superficie de contacto de goma para mejor agarre al terreno.
- Brazo manipulador de 7 grados de libertad, articulaciones giratorias con embrague eléctrico de seguridad (para proteger la articulación de sobre-esfuerzos) y una capacidad de arrastre de 20 kg a una distancia máxima de 2,75 m de altura y 1,20 m a ras de suelo.
- Sistema de observación formado por 4 cámaras: principal de observación, de conducción frontal, de conducción trasera y la situada en el brazo manipulador.
- Arma de ataque rifle tipo “Benelli”, herramientas diversas como taladradora, pulidora, cortadora para chapa y soportes para sistemas de Rayos X y Aquaset.
- Estación de control remota mediante radiofrecuencia (ver ilustración 4), con una distancia de control de 80m en interiores de edificios. Además dispone de un sistema de cable que permite transferir datos y energía con el robot.
- Baterías recargables (NiCd) que no requieren de mantenimiento, dos para el vehículo de 12 V, 85 Ah y una para la estación de control de 12 V, 7 Ah. Este sistema de baterías proporciona al material una autonomía de dos horas de funcionamiento continuo.



Ilustración 4: Estación de control del "TEODOR".

Fuente: elaboración propia.

Por último, la empresa está obligada por contrato a suministrar las piezas de repuesto necesarias durante 10 años después de la recepción del material¹⁵, esto significa que a partir del año 2022, el equipo “TEODOR” podría no tener garantizado el suministro de repuestos, abriendo la posibilidad a la administración de adquirir un nuevo equipo robot EOD o prolongando la vida del “TEODOR” con la subasta pública del suministro de repuestos (Ejército de Tierra (7), 2012).

¹⁵ Especificado en requisito logístico nº 37 del PPT “Adquisición de equipos de robot para desactivación de explosivos con medios de ataque”.

5.2. Aplicación de la fabricación aditiva

La aplicación de la FA en la logística del robot “TEODOR” iría enfocada a fabricar los repuestos del mismo, siendo los de 1º Escalón los más críticos por ser los que tiene que sustituir el mismo operador. De izquierda a derecha (ver ilustración 5) los repuestos de 1º Escalón del TEODOR son los siguientes:

- Pinza de repuesto con sensor de presión.
- Eslabón con cuerpo metálico y envoltorio de goma.
- Embrague eléctrico de seguridad.
- Conector eléctrico.
- Caja de fusibles.
- Caja de pasadores de seguridad.

Estando la mayoría compuestos de partes eléctricas (menos el eslabón y los pasadores de seguridad), las principales piezas susceptibles de fabricar mediante impresión 3D serían los eslabones del tren de rodaje, los pasadores y nuevos accesorios que se quieran diseñar para aumentar las capacidades del robot.



Ilustración 5: Repuestos de 1º escalón.

Fuente: elaboración propia.

5.2.1. Eslabón del tren de rodaje

El eslabón consta de dos partes, una metálica que es la que se une mediante pasadores al resto de la cadena y otra de goma que es la encargada de adherirse al suelo para que el robot tenga tracción sobre el terreno y la cadena no deslice.

Al no disponer de ninguna documentación técnica que proporcionase las dimensiones del eslabón, se ha procedido a realizar la medición con un pie de rey, prestando especial atención a las zonas críticas (como las zonas de unión entre eslabones). Posteriormente se ha realizado un modelo digital con SolidWorks¹⁶ (ver ilustración 6), en el cual se han simplificado las formas de la parte de goma con la finalidad de reducir las estructuras de soporte¹⁷ a la hora de la impresión.

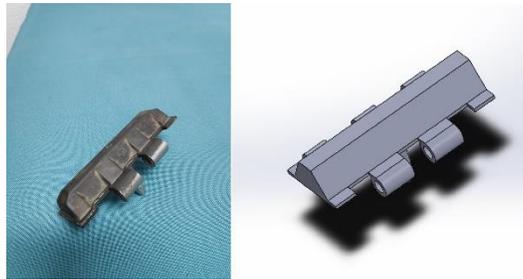


Ilustración 6: Eslabón del tren de rodaje a la izquierda y su modelo digital a la derecha.

Fuente: elaboración propia.

También se ha realizado una impresión del mismo (ver ilustración 7) con acrilonitrilo butadieno estireno¹⁸, mediante una impresora con las siguientes características:

- Impresora de bajo coste Geeetech A10 de extrusión de material.
- Precisión máxima de la impresión de 0,1 mm.
- Velocidad máxima de impresión de 180 mm/s.
- Diámetro de la boquilla de 0,4 mm.
- Máxima temperatura del extrusor y de la base de 250°C y 100°C respectivamente.

¹⁶ Un programa de diseño asistido por ordenador.

¹⁷ Las estructuras de soporte son parte de la impresión y se utilizan cuando una pieza tiene ángulos de salida mayores a 45° (generalmente) respecto de la vertical.

¹⁸ El acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un termoplástico duro, resistente a los impactos y a la abrasión.

Por otra parte, el proceso de impresión se ha llevado a cabo con los siguientes parámetros:

- Grosor de capa de 0,2 mm.
- Filamento de ABS de 1,75 mm de diámetro.
- Velocidad de impresión de 100 mm/s.
- Temperatura del extrusor y de la base de 215°C y 55°C respectivamente.
- Tiempo de impresión de 8 h.



Ilustración 7: Eslabón del tren de rodaje en negro y modelos impresos en rosa.

Fuente: elaboración propia.

Aunque no ha sido posible realizar una prueba de resistencia durante el desarrollo de este TFG, se ha podido llevar a cabo la validación geométrica del modelo impreso del eslabón (ver ilustración 7). En este caso las ventajas que ofrece la FA son:

- Se puede utilizar indistintamente en los diferentes procesos de FA (ver anexo A), con lo que esto conlleva. Un amplio espectro de materiales (resinas, plásticos o metales), pudiendo elegirse el material en función de las capacidades mecánicas y durabilidad mínimas requeridas para la pieza.
- Utilización de repuestos fabricados en plástico en sustitución de una pieza original metálica, durante una situación provisional hasta que se recibieran los repuestos definitivos.
- Modificación del modelo digital, pudiendo este ser fraccionado en varias partes para imprimirlas con materiales diferentes (p. ej. El cuerpo del eslabón en metal y la parte encargada de proporcionar agarre al “TEODOR” en plástico flexible).
- Modificación de la geometría de la pieza original para aumentar la resistencia de las partes más frágiles, para reducir su peso o para incluir nuevas prestaciones. Por ejemplo, añadir tacos a la superficie de contacto del eslabón con el suelo para mejorar su agarre en función del tipo de terreno).

5.2.2. Otras posibilidades

La FA abre un amplio abanico de opciones para mejorar, actualizar, rediseñar y optimizar los materiales de los que disponen las unidades EOD. Por ejemplo, en una entrevista con un operador del “TEODOR” del Centro Internacional de Desminado, se observó un problema en la resolución de incidentes IED a la hora de transportar la carga explosiva con el robot desde la zona segura hasta la zona de exclusión. Durante el trayecto, se depositaba la carga en la parte frontal del robot, resbalando de la misma en terrenos bacheados, ralentizando la operación de destrucción de la amenaza.

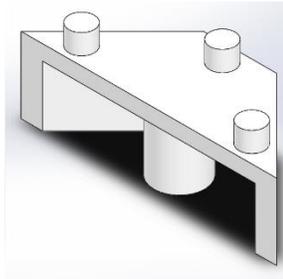


Ilustración 8: Diseño de acople para la orejeta frontal.

Fuente: elaboración propia.

Este problema se podría resolver diseñando un acople (ver ilustración 8) a la orejeta frontal de arrastre para acoplar una estructura (de madera por ejemplo) en la que depositar la carga sin riesgo de caída (ver ilustración 9).



Ilustración 9: Diseño del acople con una estructura de madera arriba y orejeta frontal del TEODOR abajo.

Fuente: elaboración propia.

Otra posible solución podría ser diseñar un accesorio para la pinza del robot con forma de gancho (ver ilustración 10) del cual colgar la carga durante el trayecto.

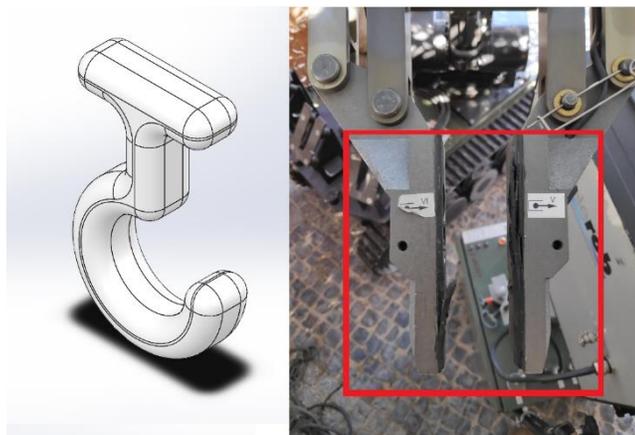


Ilustración 10: Diseño del accesorio para la pinza a la izquierda y pinza del TEODOR a la derecha.

Fuente: elaboración propia.

6.ARTEFACTOS EXPLOSIVOS

Debido a la gran variedad de artefactos explosivos existentes y de cara a la fabricación de uno de ellos para su uso en adiestramiento de personal civil y militar con la finalidad de que el personal instruido sea capaz de reconocer este tipo de artefactos más fácilmente y evitar posibles accidentes, se va a realizar un análisis de las minas encontradas en ZO. A pesar de que el estudio se realiza sobre minas (la información acerca de los IEDs es clasificada), es extensible al resto de artefactos explosivos.

6.1. Análisis de minas en ZO

De las operaciones internacionales en las que participan las FAS se han seleccionado la operación “Inherent Resolve” y “Libre Hidalgo”. Estas dos misiones son las dos con mayor número de personal desplegado del ET. Asimismo, sigue habiendo un gran número de artefactos explosivos en ambas zonas y por último, la unidad que ha propuesto este trabajo ha participado en ambas operaciones en diferentes rotaciones (ver anexo B).

Además, los nombres de las minas C/C y C/P encontradas en Irak y en el sur del Líbano se han extraído de las publicaciones “Iraq Landmine Identification Guide” (National Ground Intelligence Center, 2002) y de “Threat Factsheet No2” publicado por “Mine Action Coordination Centre of South Lebanon” (Mine action coordination centre Southern Lebanon, 2004).

		Minas			
		Contra Personal		Contra Carro	
		Irak	Líbano	Irak	Líbano
FABRICANTE	URSS	PMN		TM 46	TM 46
		PPM 2		TM 62	TM 62
	EEUU	M14	M14		M15
	ISRAEL		N4		
			N10		
Minas frecuentes en ambas ZO					
Minas frecuentes en una ZO					

Tabla 1: Minas más frecuentes según su uso y ubicación.

Fuente: elaboración propia.

Estas minas han sido clasificadas según dónde se encontraron (Irak o Líbano), su función (C/C o C/P) y según su país de producción. Una vez clasificadas (ver anexo C), un operador EOD del Batallón de Zapadores X, con experiencia en las operaciones IR y LH, determinó las minas que se encontraban con más frecuencia en ambas operaciones (ver tabla 1).



Ilustración 11: Minas C/C TM 46 y TM 62.

Fuente: National Ground Intelligence Center, 2002.

En esta tabla se puede observar “a priori” que las minas más interesantes para realizar una réplica mediante FA serían las minas C/C de producción soviética TM 46 y TM 62 (ver ilustración 11), además de la mina C/P M14 de producción estadounidense (ver ilustración 12).



Ilustración 12: Sección mina C/P M14.

Fuente: Center for Strategic Assessment and Forecasts, 2013.

En cuanto a los medios que se disponen para combatir o paliar los efectos de las minas, el ET cuenta con vehículos en dotación (p. ej. El vehículo Husky 2G) para evitar los artefactos explosivos en la medida de lo posible. Pero si no es posible evitarlos, cuentan con sistemas de seguridad para minimizar los daños en el personal (p. ej. El vehículo RG-31 Mk5E).

Por su parte, las organizaciones no gubernamentales y la población civil están más expuestas a los peligros de una mina C/P que ante una mina C/C. Esto es debido a que los platos de presión de las minas C/C suelen estar diseñados para iniciar el tren de fuego de la mina ante la acción de una fuerza de 150 kp sobre el plato de presión frente a 9-15 kp de una mina C/P (Estado Mayor del Ejército, 1994).

Por esto, replicar una mina C/P M14 es de utilidad en la formación de personal civil y militar que estén o vayan a estar en ZO a la hora de facilitar su avistamiento y evitar accidentes por falta de conocimiento.

6.2. Aplicación de la fabricación aditiva

Una de las ventajas de la FA es la versatilidad que aporta a la hora de crear réplicas de un objeto frente a la compra directa de este. En el caso de las minas se dan tres grandes oportunidades:

- La producción de réplicas a escalas mayores que 1:1 seccionadas para que se vean los diferentes componentes. El hecho de que sean más grandes que las de tamaño real hace que la explicación de su funcionamiento interno sea más fácilmente comprensible por el personal al que va dirigida la explicación.
- La producción de réplicas a escalas 1:1 (ver ilustración 13) para su utilización en actividades de instrucción y adiestramiento como la pista de indicios¹⁹. Para este tipo de piezas son adecuados materiales duraderos y robustos.
- La manera en la que se imprime la mina. Por ejemplo, si la mina va a ser destinada a exposición, se puede ahorrar material imprimiendo esta, hueca por dentro. Por el contrario si va a ser utilizada en instrucción, requerirá soportar ciertas cargas con lo que no deberá imprimirse hueca, si no maciza o con un patrón en rejilla, panel, etc.



Ilustración 13: Réplica de la mina M14 impresa en ABS.

Fuente: elaboración propia.

¹⁹ La pista de indicios es una actividad de instrucción en la que una unidad ha de realizar un itinerario por el que se han establecido minas y/o IED,s de instrucción, con la finalidad de que la unidad sea capaz de reconocerlos y actuar en consonancia a la situación.

6.2.1. Mina M14

Características

La mina M14 de fabricación estadounidense se empezó a utilizar en 1955, pero aun así, es capaz de cumplir la enmienda de 1996 del Protocolo II del Convenio sobre Ciertas Armas Convencionales (Convenciones de Ginebra, 1980) sobre la capacidad de una mina de ser detectada con medios “comúnmente disponibles”²⁰ de detección. Esto se debe a que antes de emplazar las minas, se les podía adherir una masa de hierro mínima de 8 gramos para así facilitar su detección con medios electromagnéticos. En 1974 la M14 dejó de estar en dotación en las fuerzas armadas estadounidenses, aunque existe una reserva de un millón y medio de minas para ser utilizadas en caso necesario en la península de Corea. Otros países como la India y Vietnam, fabricaron minas similares a la versión M14 por su fiabilidad y eficacia (Colin King, 2002).

Este artefacto explosivo estaba diseñado para herir a un combatiente, como indica su apodo “Toe popper”, por lo que es una mina de pequeño tamaño, con 56 mm de diámetro en su parte más extensa y 40 mm de altura. Su masa neta es de 100 g de los cuales, 29 g son tetрил, un explosivo normalmente utilizado como multiplicador para iniciar explosivos de baja sensibilidad. El mecanismo de iniciación del dispositivo es un plato de presión que se activa frente una presión de entre 9 y 16 kg repartidos en toda la superficie del plato (baja presión de activación, puesto que se trata de una mina C/P), para liberar un muelle que transmite la energía sobre la aguja percutora, iniciando así el tren de fuego de la mina (Colin King, 2002).

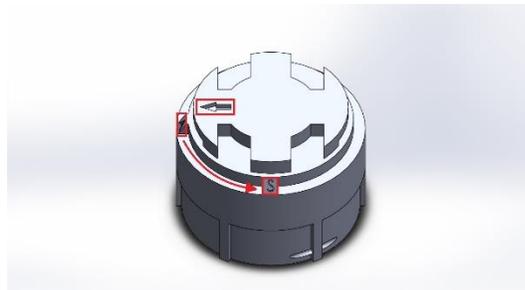


Ilustración 14: Croquis explicativo de como neutralizar una M14.

Fuente: elaboración propia

²⁰ Comúnmente disponibles refiriéndose a detectores de metales ordinarios.

Por último, la forma de neutralizarla es muy sencilla, pues solo hay que girar el plato de presión (ver ilustración 14) de la marca “A” (“Armed”: Armada) a la marca “S” (“Safe”: Seguro), operación inversa a la de armado.

Análisis estático

Se ha llevado a cabo un análisis estático en “SolidWorks” de dos configuraciones del modelo digital de la mina M14 utilizando como material ABS. La finalidad ha sido comprobar que aguantaría las posibles cargas externas en una situación de instrucción y adiestramiento.

Se ha empotrado²¹ la parte inferior del modelo digital y se ha arriostrado la superficie cilíndrica de tal forma que solo es posible el movimiento vertical de la mina (simulando que está enterrada con el plato de presión a ras de suelo).

Se ha estimado una fuerza²² de 1500 N repartida de manera uniforme por todo el plato de presión²³, de tal forma que ante una pisada accidental de una persona con equipo de combate no rompa la réplica.

Se han analizado los desplazamientos totales y las secciones del modelo más solicitados, de cara a evaluar las diferencias entre llevar a cabo una impresión completa del modelo o por el contrario solamente la carcasa, quedando hueco por dentro.

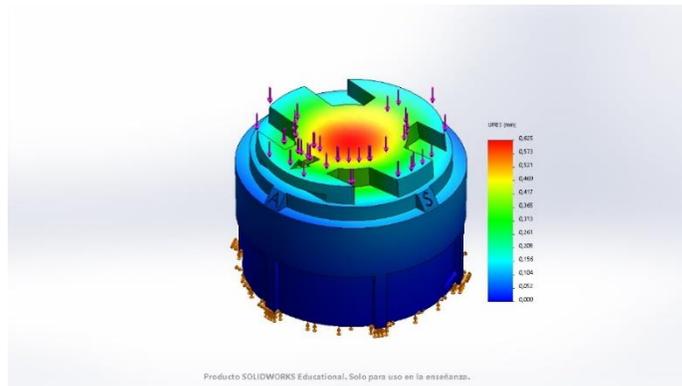


Ilustración 15: La modificación de la deformación total en mm en modelo digital hueco.

Fuente: elaboración propia.

²¹ Los apoyos están representados en las ilustraciones con flechas de color naranja o verde.

²² La fuerza está representada en las ilustraciones con flechas de color morado.

²³ Esta fuerza está totalmente sobredimensionada del lado de la seguridad, puesto que haría falta una masa aproximada de 153 kg solamente apoyada en el plato de presión de la mina.

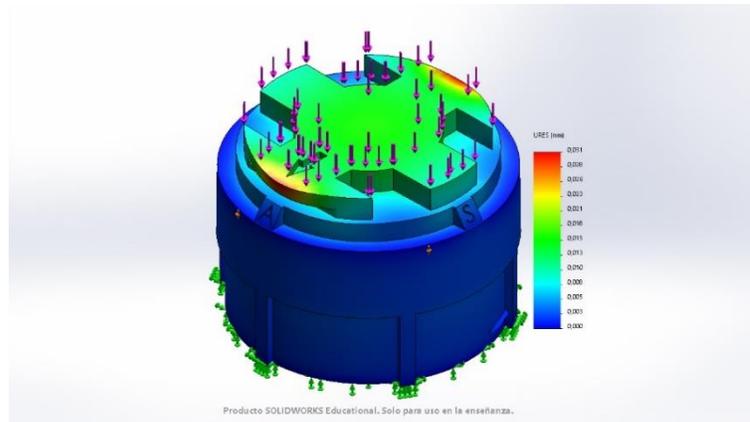


Ilustración 16: Deformación total en mm en modelo digital sólido.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados en el modelo hueco son unas deformaciones máximas de 0,625 mm en el centro del plato de presión (ver ilustración 15) y en el modelo sólido 0,031 mm (ver ilustración 16). Las tensiones máximas son 16,5 MPa y 5,67 MPa en los modelos hueco y sólido respectivamente, resultando en unos coeficientes de seguridad²⁴ de 1,88 para el modelo hueco y 5,47 para el modelo sólido.

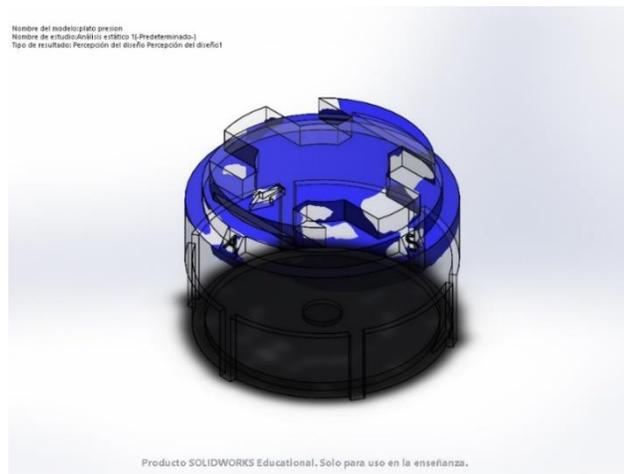


Ilustración 17: Superficie más solicitada del modelo digital hueco.

Fuente: elaboración propia.

²⁴ Los coeficientes de seguridad se han calculado teniendo en cuenta el límite elástico del ABS proporcionado por el programa “SolidWorks”: 31 MPa.

Sin embargo, en ambos casos las secciones más solicitadas se sitúan cerca del borde del plato de presión con el cuerpo de la mina (ver ilustraciones 17 y 18).

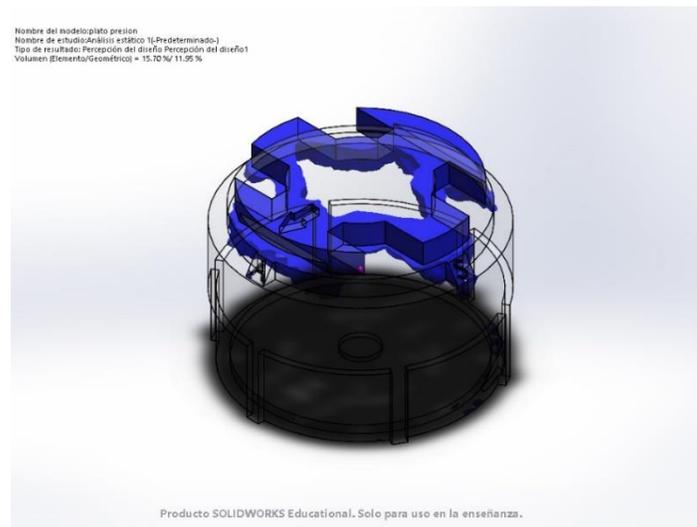


Ilustración 18: Sección más solicitada del modelo digital sólido.

Fuente: elaboración propia.

Por último recalcar que según el uso al que se vaya destinar la réplica, se puede utilizar menos material dejando huecos en el interior a la hora de la fabricación. Por ejemplo si únicamente se va a utilizar con carácter expositivo (en cuyo caso no tendrá que soportar grandes cargas externas), se podría imprimir la mina completamente hueca con un espesor de pared de 4 mm. Utilizando 45,6 g de ABS (según mediciones de “SolidWorks”) frente a 84,2 g que habría que emplear en el modelo macizo, con el ahorro de material que conlleva.

7.CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1. Conclusiones

Del estudio realizado de los medios de las unidades EOD, se observa que es posible la obtención de repuestos mediante la FA. Estas piezas podrían dar solución de forma temporal a problemas de mantenimiento urgentes en ZO. No obstante, el número de piezas del TEODOR factibles de su replicación es limitado debido a los altos requerimientos técnicos.

Por otro lado, la fabricación “in situ” de réplicas exactas de las minas o artefactos explosivos, permite mejorar las actividades de instrucción y adiestramiento del personal implicado en la misión. Además facilitan mejorar los procedimientos de las unidades EOD a la hora de reconocer, neutralizar y desactivar estos artefactos.

Principalmente, cabe concluir que, en la actualidad, es viable llevar a cabo la fabricación mediante impresión 3D de ciertos repuestos, no sólo de las unidades EOD, sino de cualquier unidad desplegada en el exterior. Aunque si bien es cierto que la técnica a día de hoy es limitada, la FA no deja de ser una tecnología emergente, y es más que factible que en un futuro cercano, casi cualquier tipo de repuesto podrá ser fabricado en el campo de batalla, a cualquier nivel, conservando o incluso mejorando las características de la pieza original.

La especificidad de los medios de impresión 3D, la formación de personal que suponen y el gasto que conlleva desplegar un medio de estas características, hacen que este tipo de “herramienta” deba estar unificado en ZO, para mejor coordinación de sus capacidades y optimización de recursos como: equipos de impresión 3D, cursos de formación y personal cualificado.

7.2. Líneas futuras

Dado que en este TFG, se realiza una propuesta de la FA en ZO de repuestos y minas, futuros estudios podrían empezar analizando la validación geométrica de los modelos. También deberían incluir estudios de funcionabilidad con la finalidad de alcanzar los estándares de calidad en cuanto a resistencia y durabilidad. A continuación se podría estudiar la viabilidad financiera y logística, de acuerdo a las capacidades del ET, respecto de los repuestos transportados al teatro de operaciones.

El análisis financiero podría estudiar si fabricar los repuestos de los diversos equipos en ZO es más rentable que transportarlos hasta allí. Este, debería ser complementado con un análisis legal, por la posibilidad de ser esta práctica considerada como intrusismo laboral por las empresas que proveen al ET de ellas.

El transporte de repuestos a ZO siempre supone un gran esfuerzo para las unidades de apoyo logístico, con un análisis de este tipo, se podría determinar, si en un futuro, sería viable enviar cargamentos de material de impresión 3D (filamento, resina o polvo) con el que fabricar variedad de repuestos directamente allí, en función de la necesidad, con la más que probable disminución de carga logística que ello conllevaría. Además, esto aseguraría la disponibilidad de multitud de repuestos siempre y cuando haya material de fabricación.

Este potencial futuro de la FA se refleja en el documento de la Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales llamado “Entorno Operativo Terrestre Futuro 2035” (Ministerio de Defensa, 2018), en el que se hace mención a que la FA es una tecnología emergente que podría causar gran impacto en las operaciones terrestres futuras, ya que permitiría reducir la huella logística, permitiendo realizar la reparación en el campo de batalla, mediante la fabricación de todo tipo de repuestos y componentes. También hace mención a la impresión de grandes estructuras en zona a partir de nuevos materiales ligeros y de alta resistencia, lo cual permitiría mejorar la protección de las unidades en el campo de batalla.

Un análisis futuro más amplio podría centrarse en cuáles serían los procesos de FA más favorables para la fabricación de repuestos en zona de operaciones teniendo en cuenta las limitaciones económicas y de personal con las que cuenta el ET.

**PÁGINA
INTENCIONADAMENTE
EN BLANCO**

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1. Bibliografía

- Blanco Borrego, J. M. (2017). *Impresión 3D como sistema logístico alternativo en Operaciones*. Zaragoza: Centro Universitario de la Defensa.
- Cajal Hernando, C., Jimenez Pacheco, R., Santolaria Mazo, J., Pueo Arteta, M., García García, M. Á. (2015). *Rapid tooling aplicado a defensa, potenciales usos*. Zaragoza: Centro Universitario de la Defensa y Universidad de Zaragoza.
- Colin King. (2002). *Janes. Mines and mine clearance*. Schiebel.
- Convenciones de Ginebra. (1980). *Protocolo II a la convención sobre armas convencionales excesivamente nocivas o de efectos indiscriminados, relativo a minas, armas trampa y otros artefactos*. Ginebra: Naciones Unidas.
- Ejército de Tierra (2). (2005). *Orientaciones. Batallón de zapadores (OR4-402)*. Granada: Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC).
- Ejército de Tierra (4). (2011). *Empleo EOD/EOR (PD4-408)*. Granada: MADOC.
- Ejército de Tierra (6). (2008). *Posibilidades de empleo de los robots por las PU,s de combate en escenarios urbanos (DIVA-IV-049)*. Granada: MADOC.
- Ejército de Tierra (7). (2012). *Pliego de prescripciones técnicas. Adquisición de equipos de robot para desactivación de explosivos con medios de ataque*. Madrid: Mando de Apoyo Logístico.
- Estado Mayor del Ejército. (1994). *Manual Técnico. Catálogo de Minas (MT7-003)*. Madrid: División de Operaciones.
- International Standards Organisation (ISO). (2015). *Additive manufacturing. General principles*. Ginebra.
- Jiménez Pacheco, R., Cajal Hernando, C., Santolaria Mazo, J., Pueo Arteta, M., Acero Cacho, R., Torralba Gracia, M., & Albajez García, J. A. (2014). *Tecnologías de impresión 3D para su uso logístico en operaciones*. Zaragoza: Centro Universitario de la Defensa y Universidad de Zaragoza.
- Jorge Bártolo, P. y Gibson, I. (2011). *History of Stereolithographic Processes*. (Springer, Ed.), *Stereolithography*. Leiria: Polytechnic Institute of Leiria.

Mando de Adiestramiento y Doctrina. (2019). *Fabricación Aditiva (ETTM19/02)*. Granada: Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales (DIDOM).

Mine action coordination centre Southern Lebanon. (2004). *Threat Factsheet No 2*.

Ministerio de Defensa. (2018). *Entorno Operativo 2035*. Madrid: Estado Mayor de la Defensa (EMAD).

National Ground Intelligence Center. (2002). *Iraq Landmine Identification Guide*. Charlottesville: United States Army.

Núñez Sánchez, F. (2018). *Aplicación de la impresión digital 3D a nivel táctico*. Zaragoza: Centro Universitario de la Defensa.

Pueo Arteta, M., Vicente Oliva, S., Jiménez Pacheco, R., Cajal Hernando, C., Mur Amada, J., & García Garcia, M. Á. (2017). *Fabricación Aditiva en la Misión Antártica*. (Centro Universitario de la Defensa, Ed.). Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

Vicente Oliva, S., Jiménez Pacheco, R., Pueo Arteta, M., Cajal Hernando, C., Mur Amada, J., & García Garcia, M. Á. (2016). *Transferencia e inserción de tecnologías de fabricación aditiva en Defensa*. Zaragoza: Centro Universitario de la Defensa y Universidad de Zaragoza.

8.2. Internet

Additively. (2019). Recuperado 10 de marzo de 2019, de <https://www.additively.com/en/>

Bournias Varotsis, A. (2019). Introduction to SLS 3D Printing. Recuperado 14 de febrero de 2019, de <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>

Bournias Varotsis, A. (2019). Introduction to FDM 3D printing. Recuperado 15 de febrero de 2019, de <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing#what>

Printing Expert 3D. (2014). Different Types of 3D Printing for 3D Printers. Recuperado 15 de marzo de 2019, de <http://3d-printing-expert.com/different-types-of-3d-printing-for-3d-printers/>

Center For Strategic Assessment And Forecasts. (2013). Anti-personnel mines U.S. army. Recuperado 3 de marzo de 2019, de <http://csef.ru/en/oborona-i-bezopasnost/505/protivopehotnye-miny-armii-ssha-4338>

Codina, E. (2018). La ingeniera malagueña que revoluciona el mercado de las escayolas con sus férulas 3D. Recuperado 10 de febrero de 2019, de https://elpais.com/politica/2018/08/30/diario_de_espana/1535631828_833588.html

DefenseTech. (2017). Marines Send 3D Printers to Combat Zone to Fix Gear Faster. Recuperado 15 de marzo de 2019, de <https://www.military.com/defensetech/2017/07/05/marines-send-3d-printers-combat-zone-fix-gear-faster>

Díez Cámara, O. (2018). Imprimir sobre el terreno en 3D barracones para las Fuerzas Expedicionarias. Recuperado 15 de marzo de 2019, de <https://www.defensa.com/otan-y-europa/imprimir-sobre-terreno-3d-barracones-para-fuerzas>

Ejército de tierra (1). (2017). Agrupación de Apoyo Logístico 41. Recuperado 21 de mayo de 2019, de http://www.ejercito.mde.es/ca/unidades/Zaragoza/aalog41/Noticias/2017/2017_05_15_visita_gebrilog.html

Ejército de tierra (3). (2019). Academia de Ingenieros del Ejército. Centro Internacional de Desminado. Recuperado 6 de marzo de 2019, de <http://www.ejercito.mde.es/unidades/Madrid/acing/Organizacion/cid.html>

- Ejército de tierra (5). (2018). BRIGADA 2035. Brigada experimental. Recuperado 23 de mayo de 2019, de http://www.ejercito.mde.es/estructura/briex_2035/index.html
- EMAD (1). (2018). Operación Inherent Resolve (IRAQ). Recuperado 1 de marzo de 2019, de <http://www.emad.mde.es/MOPS/042-Iraq-IR/>
- EMAD (2). (2018). Operación Libre Hidalgo. Recuperado 1 de marzo de 2019, de <http://www.emad.mde.es/MOPS/010-Libano-UNIFIL/>
- Enabling the future. (2019). A Global Network Of Passionate Volunteers Using 3D Printing To Give The World a Helping Hand. Recuperado 10 de marzo de 2019, de <http://enablingthefuture.org/>
- Erwin, S. (2017). Marines take 3D printed drones from the lab to the field. Recuperado 18 de enero de 2019, de <https://defensesystems.com/articles/2017/05/08/marinecorpprint.aspx>
- Impresoras3D.com. (2019). Un misil impreso en 3D. Recuperado 20 de diciembre de 2018, de <https://www.impresoras3d.com/un-misil-impreso-en-3d/>
- Lucía, C. (2018). EE.UU. comienza el desarrollo de explosivos impresos en 3D. Recuperado 15 de marzo de 2019, de <https://www.3dnatives.com/es/ee-uu-explosivos-impresos-en-3d-230420182/>
- Staymates, Matthew E., MacCrehan, William A., Staymates, Jessica L., Kunz, Roderik R., Mendum, Thomas, Ong, Ta-Hsuan, Geurtsen, Geoffrey, Gillen, Greg J., Craven, Brent A. (2016). Biomimetic Sniffing Improves the Detection Performance of a 3D Printed Nose of a Dog and a Commercial Trace Vapor Detector. Recuperado 6 de febrero de 2019, de <https://doi.org/10.1038/srep>
- Stoliarov, M. (2012). Is there a Comparison Chart of different 3D printing technologies? Recuperado 15 de marzo de 2019, de <https://www.quora.com/Is-there-a-Comparison-Chart-of-different-3D-printing-technologies>
- Vallon. (2019). Minehound VMR3G. Detector dual sensor de IEDs con pantalla gráfica. Recuperado 15 de marzo de 2019, de <http://www.vallon.de/productos.lasso?a=mine-detection&b=919>
- 3DEO. (2018). Metal 3D Printing Processes. Recuperado 15 de marzo de 2019, de <https://news.3deo.co/metal-3d-printing-processes-fdm-fff>

9.ANEXOS

9.1. ANEXO A. Tecnologías de impresión 3D según ISO 17296-2

- Inyección de aglutinante (BJ):

El sistema de impresión emplea material en polvo en la plataforma de impresión que se va uniendo capa a capa mediante la aplicación de aglutinante por el cabezal impresor.

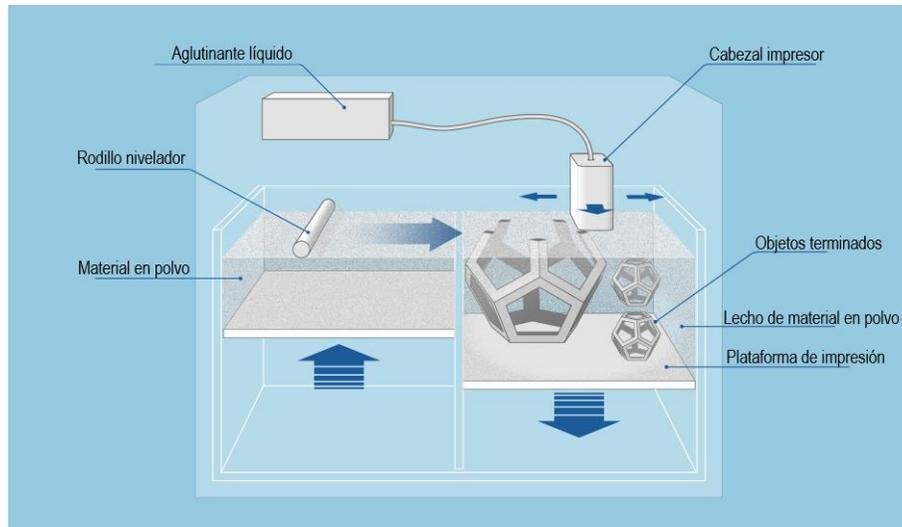


Ilustración 19: Proceso BJ.

Fuente: Additively, 2019.

En 1993 el “Massachusetts Institute of Technology” junto con “Z Corporation” desarrollan una nueva tecnología de FA conocida como inyección de aglutinante. (Bournias Varotsis, A, 2019).

Este tipo de impresión 3D es típicamente utilizado para prototipos a todo color (por ejemplo, mapas topográficos en relieve), moldes de fundición de arena de grandes dimensiones y objetos metálicos con una calidad inferior, pero menos costosos que los impresos por SLM. Los moldes de arena están listos para su utilización justo después de su impresión, la contrapartida es que son de un solo uso, pues hay que romperlos para obtener la pieza metálica de su interior. Los otros dos materiales utilizados generalmente necesitan procesos posteriores para mejorar sus características. A los prototipos a todo color se les suele dar un recubrimiento de cianocrilato para fortalecer la unión de las partículas y las piezas metálicas se infiltran con cobre (sustituyendo el aglutinante) o se sinterizan (quemando el aglutinante) (Bournias Varotsis, A, 2019).

- Fotopolimerización:

Los procesos de impresión en tres dimensiones clasificados en fotopolimerización son todos aquellos que usan para la fabricación de objetos la polimerización de resinas mediante luz normalmente ultravioleta (UV).

- *Inyección de material (MJ):*

El proceso de fabricación utiliza resinas curables por UV, que son inyectadas por el cabezal de impresión en capas horizontales, que son curadas sucesivamente por una luz UV hasta completar el objeto a imprimir (Bournias Varotsis, A, 2019).

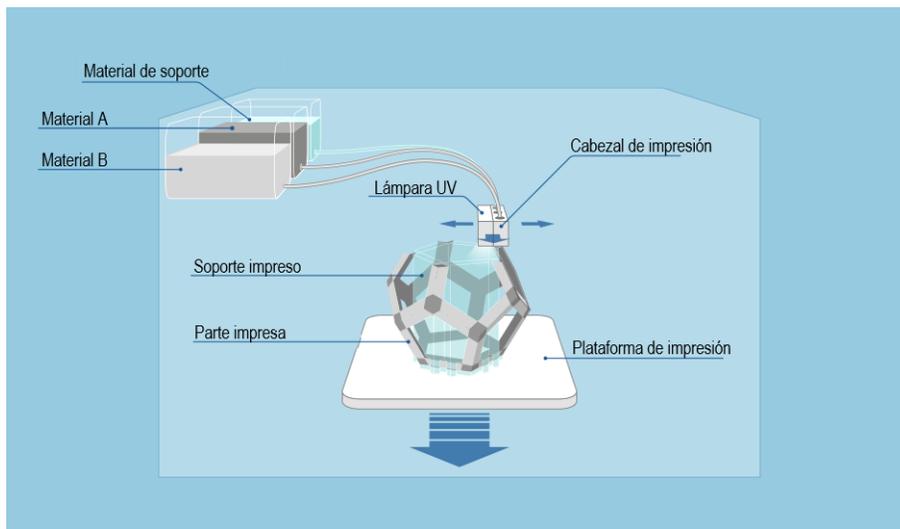


Ilustración 20: Proceso MJ.

Fuente: Additively, 2019.

El MJ nace en 1994 con la empresa “SolidScape” que diseñó una impresora 3D que utilizaba cera para crear moldes maestros muy precisos. Más tarde en 1999 la empresa “3D Systems” saca al mercado la plataforma “ThermoJet”, introduciendo los fotopolímeros como materiales de impresión. En la actualidad existen impresoras capaces de imprimir con diferentes materiales o mezclas de materiales a la vez (3DEO, 2018).

Esta tecnología se caracteriza por una gran precisión dimensional (+-0,1%, con un límite inferior normalmente de +-0,1 mm) y un considerable volumen de impresión (19L lo más común y en ámbitos industriales de hasta 400L). Además ofrece la posibilidad de imprimir varias piezas con diferentes fotopolímeros simultáneamente. En una misma pieza utilizar dos o más materiales y mezclar las resinas en la proporción que se desee, creando infinidad de materiales con propiedades

distintas. Es por esto por lo que esta tecnología está extendida para fabricación de prototipos visuales o educativos y para moldes de inyección de pocas tiradas (más baratos que los moldes de inyección de acero).

- *Estereolitografía (SLA):*

La estereolitografía se sirve de un recipiente relleno de una resina que es curada por un láser UV trazando linealmente la sección transversal de cada capa del objeto que se desea imprimir.

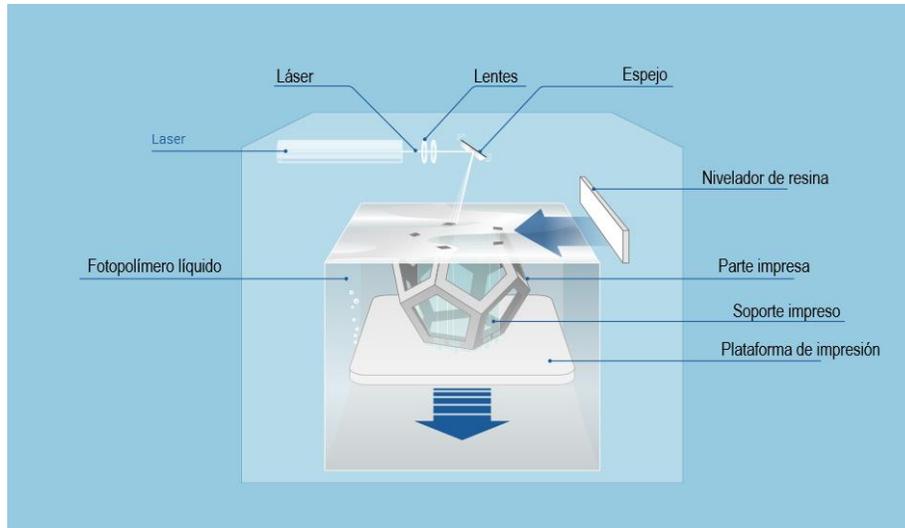


Ilustración 21: Proceso SLA.

Fuente: Jorge Bártolo, P. y Gibson, I., 2011.

A pesar de que los comienzos de la SLA datan de 1971 (Additively, 2019), es en 1986 cuándo se acuña el término “Estereolitografía” por Chuck Hull cuándo patenta su proceso. Esto convierte a la SLA en la primera tecnología de impresión 3D.

Aunque podemos dividir las impresoras SLA en dos ramas (de escritorio e industriales), tienen características parecidas. Son utilizadas por una buena precisión (+-0,15-0,5% con un límite inferior normalmente de +-0,01-0,25 mm) y un buen acabado superficial (generalmente para prototipos visuales). La contrapartida de esta tecnología es que se degradan con la exposición solar (se puede solventar con pintura acrílica con protección UV) y que necesitan de post-procesado para eliminar las estructuras de soporte además de terminar de curar la resina (lo que aumenta la resistencia tensil y la capacidad de trabajar a mayor temperatura a costa de ser más frágil) (Bournias Varotsis, A, 2019).

- *Procesado digital de luz (DLP):*

El DLP se diferencia de la SLA en la forma de curar la resina. Mientras que la SLA utiliza un haz de luz UV, la tecnología DLP utiliza un proyector de luz UV, con lo que puede curar la resina de una misma capa simultáneamente. Lo que confiere a este proceso una mayor velocidad de impresión pero resoluciones más bajas.

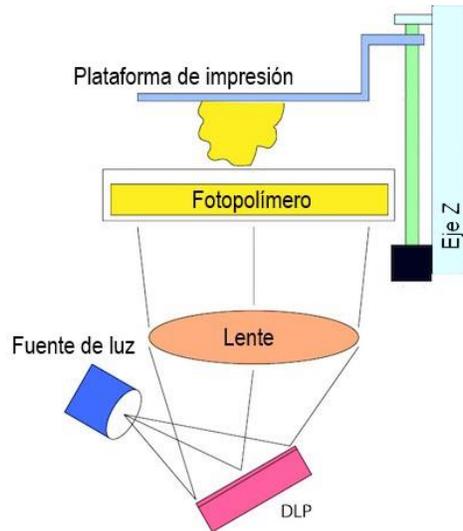


Ilustración 22: Proceso DLP.

Fuente: Printing Expert 3D, 2014.

La tecnología DLP surge en 1987 cuándo Larry Hornbeck trabajador de “Texas Instruments” crea la primera máquina de impresión 3D que usa proyectores de luz y espejos digitales en una matriz para el curado de la resina (Additively, 2019).

- Extrusión de material:

Este tipo de procesos usan la extrusión directa de material sobre la plataforma de impresión para la fabricación de los objetos en tres dimensiones.

- *Modelado por deposición fundida (FDM):*

El FDM crea objetos tridimensionales mediante una bobina de material termoplástico en filamento que es fundido y depositado en la plataforma de impresión en capas a través de un cabezal montado sobre una estructura de tres ejes (X, Y y Z). Una vez la capa se termina, la plataforma de impresión baja la altura de una capa y se repite el proceso.

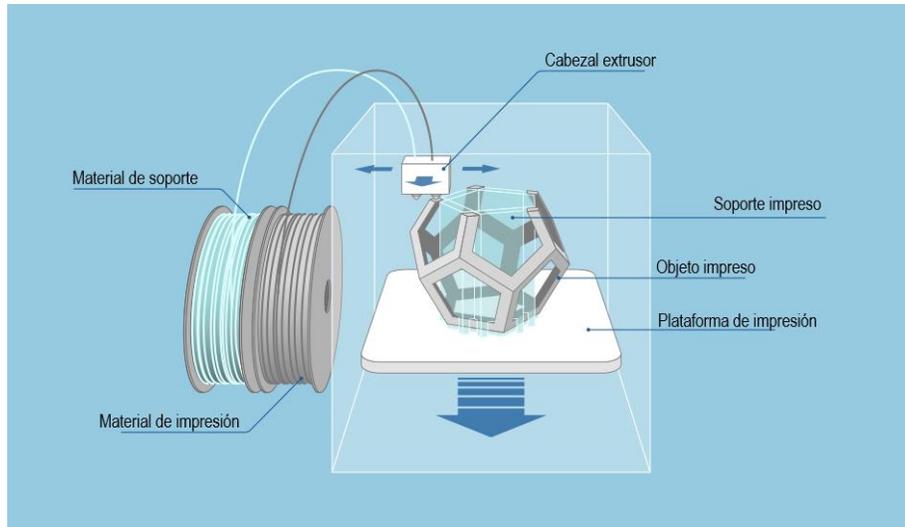


Ilustración 23: Proceso FDM.

Fuente: Additively, 2019.

La tecnología FDM nace en 1988, creada por Scott y Lisa Crump, la patente la consiguieron en 1989 y fundaron la empresa “Stratasys”, que desarrolló un proceso para convertir los archivos informáticos usados en la SLA (“Standard Triangle Language”), en otro formato más útil para la creación de capas mediante FDM (Additively, 2019).

El volumen de impresión más común en este tipo de máquinas es de un cubo de 200 mm de lado, llegando a existir máquinas con un volumen de impresión de hasta 1 m³. El grosor de capa puede variar desde 0,05 mm hasta 0,4 mm, siendo lo más normal el uso de 0,2 mm. Un objeto impreso con capas más finas tendrá mayor resolución en geometrías complejas y un acabado más homogéneo, sin embargo, imprimir con capas más gruesas permite acelerar el proceso de fabricación y ahorrar costes.

Se utiliza por ser la tecnología de impresión 3D más económica de todas, por ser muy rápida en la fabricación de piezas y por la amplia gama de termoplásticos que se pueden utilizar. Uno de los problemas de esta tecnología es el “warping” (pandeo) que sufre un objeto impreso por la

diferencia de temperaturas entre las capas. Cuando se empieza a imprimir la segunda capa sobre la primera, la primera capa ya se ha enfriado y la segunda capa se adhiere fundida a la primera. Una vez se enfría la segunda capa, se contrae haciendo que la primera capa tienda a curvarse de forma cóncava respecto de la plataforma de impresión. Finalmente, las piezas impresas mediante el uso de esta tecnología resultan ser anisótropas debido al proceso de unión entre capas, tiene menor precisión dimensional que el resto y se requiere aplicación de procesos (como lijado) después de la impresión para obtener un acabado más suave (Bournias Varotsis, A, 2019).

- Fusión de lecho de polvo:

La fusión de lecho de polvo se caracteriza por usar material en polvo para la creación de objetos tridimensionales. Las diferencias entre los diferentes procesos radican en los materiales y en la forma de unir las partículas en polvo.

- *Fundido selectivo por láser (SLM):*

El SLM utiliza un láser como fuente de energía para fundir el material metálico en polvo con un único punto de fusión. El proceso se lleva a cabo en un gas inerte para evitar al máximo la oxidación que ocurriría en un ambiente normal al fundir el metal.

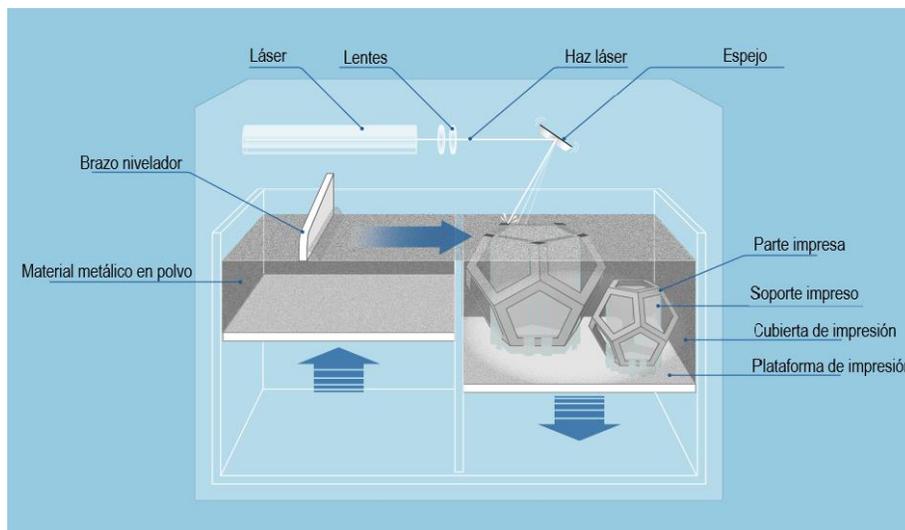


Ilustración 24: Proceso SLM.

Fuente: Additively, 2019.

Este proceso de impresión surge en 1995 en el instituto para tecnología láser “Fraunhofer” en Alemania.

El material en polvo no utilizado en una impresión puede ser reciclado casi al completo para posteriores trabajos, aunque esta tecnología requiere de estructuras de soporte que incrementan el consumo de material. Para un mismo material, un objeto fabricado mediante SLM tiene mejores resistencias mecánicas que un objeto fabricado por métodos tradicionales, aunque requieren tratamientos térmicos posteriores a la impresión y una menor resistencia a la fatiga (Bournias Varotsis, A, 2019).

- *Fundido por haz de electrones (EBM):*

El EBM es similar al SLM, cambiando la fuente de energía por un haz de electrones, el gas inerte se cambia por un entorno de vacío y la temperatura de la cámara de producción pasa de ser de unos 200°C en SLM a unos 700°C en EBM.

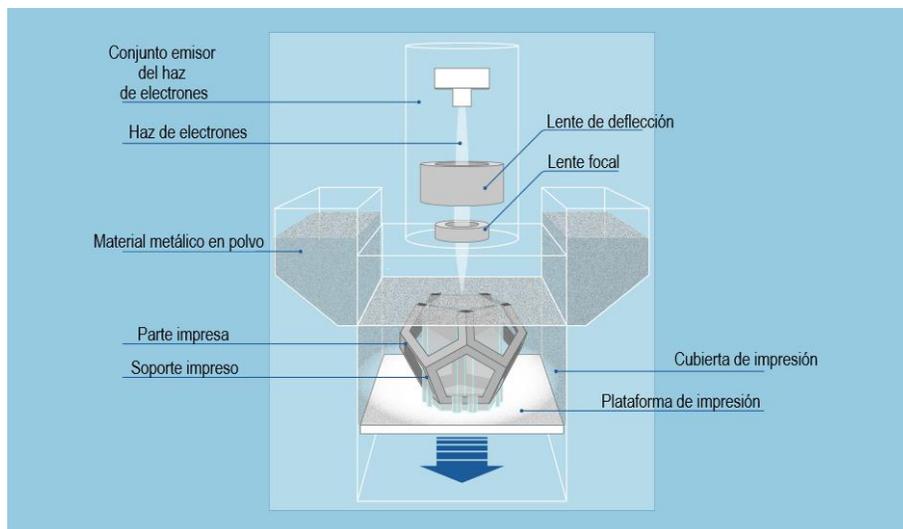


Ilustración 25: Proceso EBM.

Fuente: Additively, 2019.

Actualmente, la única empresa que ofrece este tipo de tecnología y comercializa este tipo de máquinas es una empresa sueca, Arcam. Es en 1993 cuando se solicita una patente para esta tecnología, aunque en el año 2002 fue cuando se vendió la primera máquina con esta tecnología.

Este tipo de tecnología solo se puede utilizar con materiales conductores, requiere una menor cantidad de soporte que el SLM e imprime a mayor velocidad, aunque tiene una menor precisión y es más difícil retirar el material en polvo no utilizado del producto final (Additively, 2019).

- *Sinterizado selectivo por láser (SLS):*

El SLS es un proceso similar al SLM, la principal diferencia es el material utilizado. En el proceso SLM se emplea material metálico, mientras que el SLS sinteriza polímeros. Al no utilizar metales, no se realiza el proceso en un gas inerte como en el SLM.

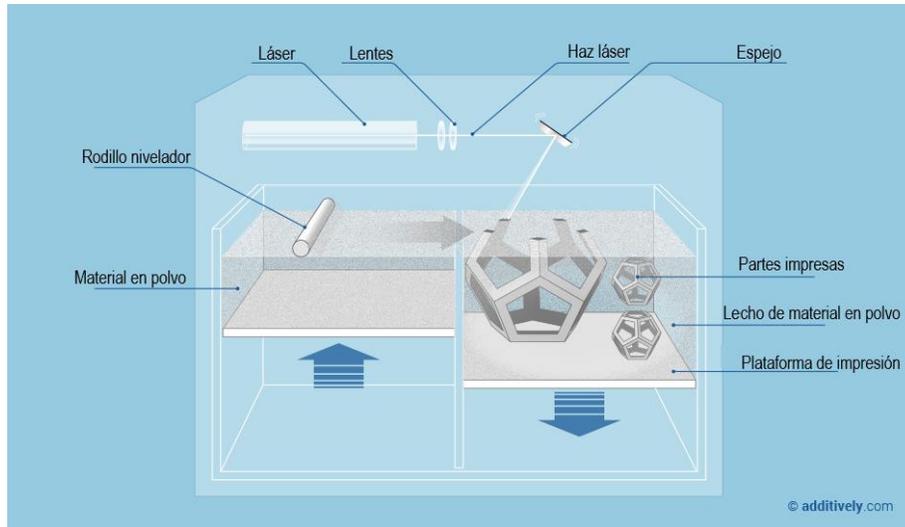


Ilustración 26: Proceso SLS.

Fuente: Additively, 2019.

Asimismo, el material no utilizado en una impresión puede ser reciclado para posteriores trabajos, aunque en algunos polímeros, debido al precalentamiento para la impresión, solo se puede reutilizar al 50%. No se requieren estructuras de soporte puesto que las partículas en polvo no sinterizadas hacen la misma función. Para un mismo material, un objeto fabricado mediante SLS tiene mejores resistencias mecánicas que un objeto fabricado por FDM o SLA, por lo que esta tecnología se utiliza para componentes poliméricos de prototipos funcionales y tiradas de producción de pequeño tamaño.

Esta tecnología surge gracias al Dr. Carl Deckard de la Universidad de Texas en los años 80. Patrocinados por “Defense Advanced Research Projects Agency”, el Dr. Deckard y el Dr. Joseph J. Beaman crearon una “start up” para diseñar y fabricar maquinaria SLS, que fue comprada en 2001 por 3D Systems (otra empresa de impresión 3D centrada en el proceso SLS) (Bournias Varotsis, A, 2019).

- Laminación de hojas (SL):

La laminación de hojas es un proceso de FA que consiste en la superposición de láminas de material recortadas que se van pegando a la lámina anterior, con lo que capa a capa van dando forma al objeto que se desea producir.

- *Manufactura de Objetos Laminados (LOM):*

La LOM utiliza capas de papel recubiertas con adhesivo, que corta con un láser o cuchilla para darle la forma a la capa que se adherirá a la capa anterior, repitiendo el proceso se obtiene el objeto fabricado.

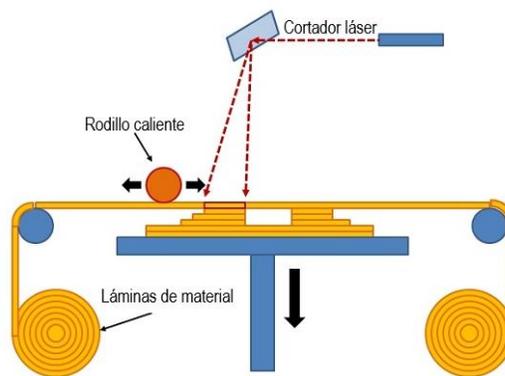


Ilustración 27: Proceso LOM.

Fuente: Stoliarov, M., 2012.

Una de las ventajas de este proceso es lo económico que resulta, puesto que no necesita altas temperaturas o reacciones químicas. Otro punto a favor es la alta velocidad de impresión. A cambio, la precisión no es muy elevada (depende del elemento cortante y el grosor del material laminado utilizado). Debido a las características mecánicas del papel no se suele utilizar para la creación de prototipos funcionales más bien se emplea en la fabricación rápida de prototipos visuales.

- Deposición directa de energía (DED):

La DED es un proceso de impresión 3D en el cual se inyecta material metálico en polvo en la superficie de impresión o en una pieza metálica a reparar, donde un haz enfocado de láser de alta potencia funde el material inyectado y la superficie del material donde se inyecta el material, creando una especie de cordón de soldadura.

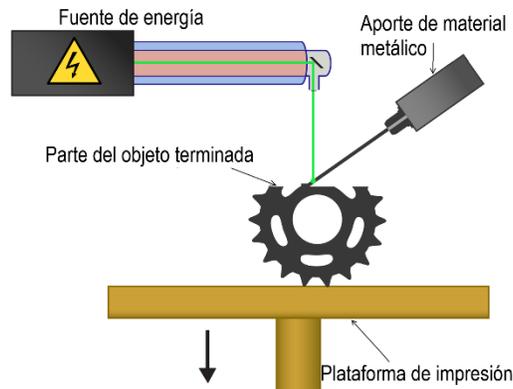


Ilustración 28: Proceso DED.

Fuente: 3DEO, 2018.

Esta tecnología por tanto tiene la ventaja de poder ser utilizada para reparar piezas metálicas de geometría compleja, o sometidas a un desgaste continuo, lo que evita la compra de recambios. Otro punto a favor de este tipo de tecnología es que al no necesitar unas condiciones de impresión específicas (como el SLM o el EBM) y poder realizarse el proceso a condiciones atmosféricas, este tipo de máquinas son fácilmente escalables consiguiendo unos volúmenes de impresión considerables.

Sin embargo, la inyección de material no es tan precisa como en el caso del SLM o EBM y normalmente las piezas fabricadas por DED requieren de un postprocesado, además de estructuras de soporte para geometrías más complejas.

La DED surge gracias a la empresa Sciaky, especializada en sistemas de soldadura desde 1939. En 2009 lanzó la primera impresora con tecnología “Electron Beam Additive Manufacturing” (un tipo de DED), de gran tamaño y capaz de imprimir con titanio (Additively, 2019).

9.2. ANEXO B. Las FAS en operaciones internacionales.

Las FAS están involucradas en un gran número de operaciones militares en el extranjero enmarcadas bajo (EMAD (1), 2018):

- La Unión Europea:
 - Operación EUNAVFOR ATALANTA, para mejorar la seguridad en las aguas del Golfo de Adén y Somalia.
 - Operación EUFOR ALTHEA, para el desarrollo de las fuerzas armadas de Bosnia-Herzegovina.
 - Operación EUTM Malí, para adiestramiento del ejército maliense.
 - Operación EUTM Somalia, para adiestramiento del ejército somalí.
 - Operación EUTM República Centroafricana, para adiestramiento de las fuerzas armadas de República Centroafricana.
 - Operación EUNAVFOR SOPHIA, para luchar en el mar Mediterráneo central meridional contra el tráfico de seres humanos.
- La Organización del Tratado del Atlántico Norte:
 - Operación “Resolute Support” Afganistán, para entrenar y asesorar a las fuerzas armadas de Afganistán.
 - Operación “Baltic Air Policing”, para controlar el espacio aéreo de los países bálticos.
 - Operación “enhanced Forward Presence” Letonia, para disuadir cualquier posible agresión a Letonia.
 - Operación “Apoyo a Turquía”, para ayudar a la defensa aérea de Turquía con medios antimisiles.
 - Operación SEA GUARDIAN, para desarrollar un ambiente de seguridad en el mar Mediterráneo.
- Coaliciones internacionales:
 - Operación “Inherent Resolve” Irak, para adiestramiento y capacitación de las fuerzas armadas iraquíes en su lucha contra el “Islamic State of Irak and Syria”, llevada a cabo por la coalición internacional contra el ISIS liderada por Estados Unidos.
- La Organización de Naciones Unidas (ONU):
 - Operación “United Nations Interim Force In Lebanon” (Libre Hidalgo), para conservar la paz en la frontera entre Líbano e Israel.
 - Monitorización del Acuerdo de Paz en Colombia, observadores de la ONU vigilan y verifican que se cumplen los términos del Acuerdo de Paz.

De todas las operaciones en las que participa España actualmente, la operación Libre Hidalgo en Líbano (EMAD (1), 2018) y la operación “Inherent Resolve” (EMAD (2), 2018) en Irak son las que adquieren mayor importancia. En un primer lugar por la cantidad de personal desplegado, según el Mando de Operaciones, alrededor de 650 efectivos en la operación Libre Hidalgo y unos 500 efectivos en la operación “Inherent Resolve” en Irak. En segundo lugar, por la gran cantidad de artefactos explosivos utilizados en la zona. La organización no gubernamental “Mines Advisory Group”, que trabaja desminando zonas para incrementar la seguridad de la población civil, solo en

2017 ha neutralizado 3.757 minas en Líbano y 18.405 en Irak, lo que indica que sigue habiendo un gran número de minas activas en estas ZO en las que las FAS se desenvuelven. Por último, el Batallón de Zapadores X, la unidad que ha propuesto el trabajo, ha participado en las rotaciones IX, XIII, XVIII, XXII, y XXVI de la operación Libre Hidalgo y en noviembre de 2018 ha desplegado en la operación “Inherent Resolve”.

9.3. ANEXO C. Clasificación de las minas en Irak y Líbano

		Contra Personal		Contra Carro	
		Irak	Líbano	Irak	Líbano
FABRICANTE	URSS	POMZ 2	SPM LIMPET	TM 46	TM 46
		PMN	PMN 2	TM 62	TM 62
		PMD 6	PMD 6	TM 57	
		MON 50			
		MON 100			
		MON 200			
		PPM 2			
	EEUU	M14	M14		M15
			M3		M7A2
			M2 HE		M6A2
			M16 A2		M19
	ITALIA	VS 50	VS 50	TC 2.4	
		P25		TC 6	TC 6
		P40		VS 1.6	
		VALMARA 69		VS 2.2	
		SB 33		SB 81	
	CHINA	TYPE 72	TYPE 72	AT TYPE 72	
				AT TYPE 59	
	BÉLGICA	PRB M409	PRB M35	PRB M3	PRB M3
	ISRAEL		N3		N 6
			N4		
			N6		
			N10		
	CHECOSLOVAQUIA			PT Mi-Ba III	
	FRANCIA		MI AP DV 59		ATM LIGHT
			MI AP MLE 51		AT MODEL 1947
					AT MODEL 1951
	HOLANDA				NR 25
YUGOSLAVIA				TMA 3	
				TMA 5	
INGLATERRA			L9		
RUMANIA			MAT 76		
PORTUGAL		MAPS			
HUNGRÍA		GYATA 64			

Tabla 2: Minas según su uso y ubicación.

Fuente: elaboración propia.

9.4. ANEXO D. Mina M14. Proceso de digitalización.

Para la elaboración del modelo digital de la mina M14 se han tomado las medidas de un manual internacional de minas (Colin King, 2002) y se ha procedido a la realización de su media sección transversal con la herramienta “Croquis” del programa SolidWorks (ver ilustración 29).

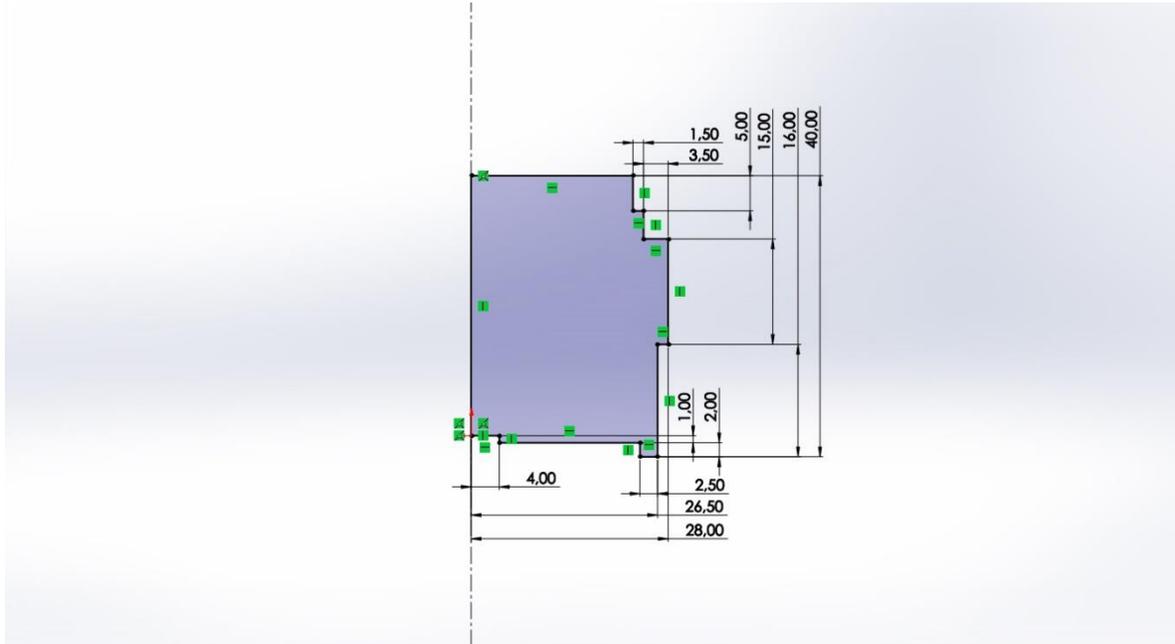


Ilustración 29: Media sección acotada de la M14.

Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenida acotada la sección se genera el sólido de revolución (ver ilustración 30) mediante la herramienta “Revolución de saliente” sobre el eje vertical de la ilustración 29.

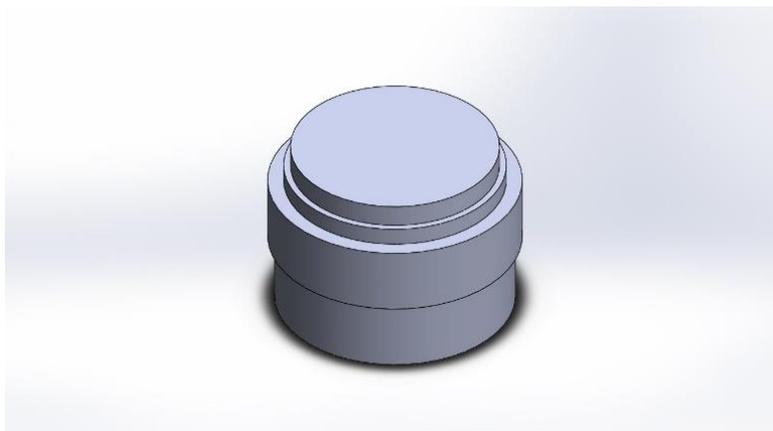


Ilustración 30: Sólido de revolución.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente con “Croquis” sucesivos se van realizando “Extruir corte” para la ultimación de los detalles de la mina (ver ilustración 31).

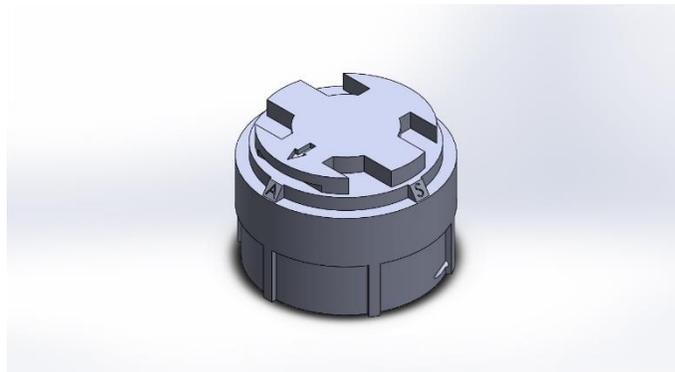


Ilustración 31: Modelo digital de la M14.

Fuente: elaboración propia.