

INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍA Y MATERIALES PARA LA APLICACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA, SOLUCIONES PARA EL MANTENIMIENTO RECUPERATIVO

TENIENTE CORONEL CAROLINA ALVARADO BURGOS¹

Resumen: *el artículo analiza la fabricación aditiva metálica y su impacto en el ámbito militar, destacando materiales como el acero, titanio y aluminio, junto con tecnologías como SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) y EBM (Electron Beam Melting). Se presentan ejemplos de aplicación en los ejércitos de Estados Unidos, Reino Unido y Alemania, donde se emplea para producir repuestos, herramientas y componentes estructurales en zonas de operación. En el Ejército de Chile se observan avances iniciales en la adopción de estas tecnologías, principalmente en el Regimiento Logístico N°6 “Pisagua”, aunque aún limitados. Finalmente, se recomiendan acciones para fortalecer la capacitación técnica, estandarizar procesos y avanzar gradualmente hacia la impresión metálica certificada.*

Palabras clave: *impresión aditiva, metales, logística.*

Abstract: *The article analyzes metal additive manufacturing and its impact on the military field, highlighting materials such as steel, titanium, and aluminum, along with technologies like SLM, DMLS, and EBM. It presents examples of implementation in the armed forces of the United States, the United Kingdom, and Germany, where these technologies are used to produce spare parts, tools, and structural components in operational environments. In the Chilean Army, initial progress in adopting these technologies is noted, mainly within Regimiento Logístico N°6 “Pisagua”, though still limited. Finally, the article recommends actions to strengthen technical training, standardize processes, and gradually advance toward certified metal printing.*

Keywords: *Additive manufacturing, metals, logistic.*

1 Oficial del Arma de Telecomunicaciones, Licenciada en Ciencias Militares, Ingeniero Politécnico Militar, título otorgado por la Academia Politécnica Militar (ACAPOMIL). Magíster en Ingeniería Industrial mención Confiabilidad en Mantenimiento por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) y Máster en Armamento y Material por la Escuela Politécnica Superior del Ejército de Tierra de España. Actualmente se desempeña como profesora de la Academia Politécnica Militar. Correo electrónico: carolina.alvarado@ejercito.cl.

INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva (FA) metálica se consolida a nivel global como una de las tecnologías con mayor potencial para transformar los procesos industriales, especialmente en los ámbitos de mantenimiento, sostenimiento logístico y autonomía operativa. Su capacidad para producir componentes complejos, personalizados y de alta resistencia mediante la deposición controlada de material metálico permite reducir los tiempos de reposición, optimizar el uso de recursos y mejorar la disponibilidad de sistemas críticos.

En los países desarrollados, esta tecnología se ha incorporado progresivamente en el sector defensa como un recurso estratégico para la producción descentralizada y la reparación avanzada de equipos, sustentada en políticas de innovación, inversión en infraestructura y programas de certificación técnica. En el Ejército de Chile, la fabricación aditiva se encuentra en una etapa inicial de desarrollo, con oportunidades de crecimiento a partir de iniciativas emergentes, una progresiva asignación de recursos y el potencial de establecer una estructura doctrinaria que guíe su desarrollo e integración institucional.

El presente artículo realiza una revisión crítica de las características, materiales, tecnologías y experiencias internacionales asociadas a la impresión metálica, evaluando además las capacidades actuales del Ejército de Chile y los desafíos que deben superarse para consolidar su implementación futura. Se plantea la necesidad de avanzar en la formación de personal especializado, la definición de procesos de certificación y control de calidad, y la adquisición de equipamiento de impresión metálica, con el fin de establecer una capacidad robusta y sostenible de fabricación aditiva al servicio del sostenimiento logístico, enfocado en el mantenimiento recuperativo, como solución a la obsolescencia logística o tecnológica.

En definitiva, la adopción planificada de la fabricación aditiva metálica permitiría al Ejército de Chile incrementar su autonomía tecnológica, reducir su dependencia de proveedores externos y fortalecer su capacidad de respuesta operativa, situando a la institución en la senda de las fuerzas armadas tecnológicamente avanzadas.

Fabricación aditiva metálica: características y principios

La fabricación aditiva metálica se ha posicionado como una de las tecnologías más transformadoras dentro del ámbito industrial, al posibilitar la creación de componentes con geometrías altamente complejas mediante la fusión o sinterizada capa por capa de polvos metálicos.² Este enfoque permite un aprovechamiento eficiente del material y una notable reducción de desperdicios

2 Proceso de fabricación aditiva en el cual un material metálico en forma de polvo es consolidado progresivamente, capa por capa.

en comparación con los procesos sustractivos convencionales. La selección adecuada del metal o aleación constituye un aspecto determinante, ya que condiciona las propiedades mecánicas (resistencia, ductilidad, tenacidad y dureza); térmicas (conductividad y expansión térmica) y químicas (resistencia a la corrosión y a la oxidación) del componente final, además de incidir en su costo, su procesabilidad y los requerimientos de posprocesado como el tratamiento térmico o el mecanizado de acabado.

Entre los materiales más utilizados destacan las aleaciones de aluminio, valoradas por su baja densidad y buena relación resistencia-peso; las aleaciones de titanio, con excelente comportamiento frente a la corrosión y alta resistencia específica; los aceros inoxidable y aceros para herramientas, empleados por su tenacidad y estabilidad dimensional; las superaleaciones de níquel, que conservan su integridad estructural a temperaturas elevadas; y las aleaciones de cobalto-cromo, apreciadas por su dureza y biocompatibilidad. Cada uno de estos materiales exhibe una microestructura particular, influenciada por los parámetros del proceso como la velocidad de escaneo, la potencia del láser y la orientación de las capas, lo que genera anisotropía³ en las propiedades y la presencia de porosidad, tensiones residuales y transformaciones de fase que deben ser controladas cuidadosamente.

Para garantizar la homogeneidad, densidad y confiabilidad estructural de las piezas fabricadas, se recurre a tratamientos térmicos de alivio de tensiones y estrategias de optimización del recorrido de impresión. Estas medidas permiten mejorar la cohesión entre capas, refinar el tamaño de grano y estabilizar la microestructura, optimizando así el desempeño funcional del componente.

Las aplicaciones de la fabricación aditiva metálica abarcan sectores de alta exigencia tecnológica como la industria aeroespacial, médica, automotriz, electrónica y de defensa, donde se priorizan la reducción de peso, la resistencia a la fatiga, la durabilidad en entornos agresivos y la capacidad de personalización. En este contexto, un conocimiento profundo de la ciencia de los materiales y su comportamiento durante el proceso aditivo resulta esencial para maximizar el potencial de la tecnología, asegurando la producción de componentes innovadores, confiables y de alto rendimiento.

Materiales empleados y propiedades relevantes

A partir de las investigaciones revisadas,⁴ es posible identificar que el acero constituye el material con mayor relevancia en aplicaciones de fabricación aditiva, al ser considerado uno de los más adecuados debido a su elevada tolerancia a la corrosión y a su durabilidad en entornos hostiles. Asimismo, destaca por sus sobresalientes propiedades mecánicas, tales como dureza, ductilidad,

3 Propiedad de un material cuyas características físicas o mecánicas (como resistencia, rigidez o conductividad) varían según la dirección en la que se midan, en contraste con los materiales isotrópicos que presentan un comportamiento uniforme en todas las direcciones.

4 UNIVERSIDAD CATÓLICA LUIS AMIGO. Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos. Lámpsakos, núm. 19, 2018. pp. 47-54. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/6139/613964506005/html/>

resistencia al desgaste y tenacidad, las cuales superan a las de otros materiales comúnmente empleados. Es uno de los componentes más usados en la fabricación de armamento.

En segundo lugar, se encuentra el aluminio, ampliamente utilizado en diversas industrias gracias a su bajo costo, alta resistencia específica y baja densidad, características que lo convierten en una alternativa idónea en contextos donde se requiere eficiencia estructural combinada con ligereza. Finalmente, en tercer lugar, se posiciona el titanio, reconocido por su excelente desempeño en los ámbitos aeroespacial y médico, debido a sus destacadas propiedades mecánicas.

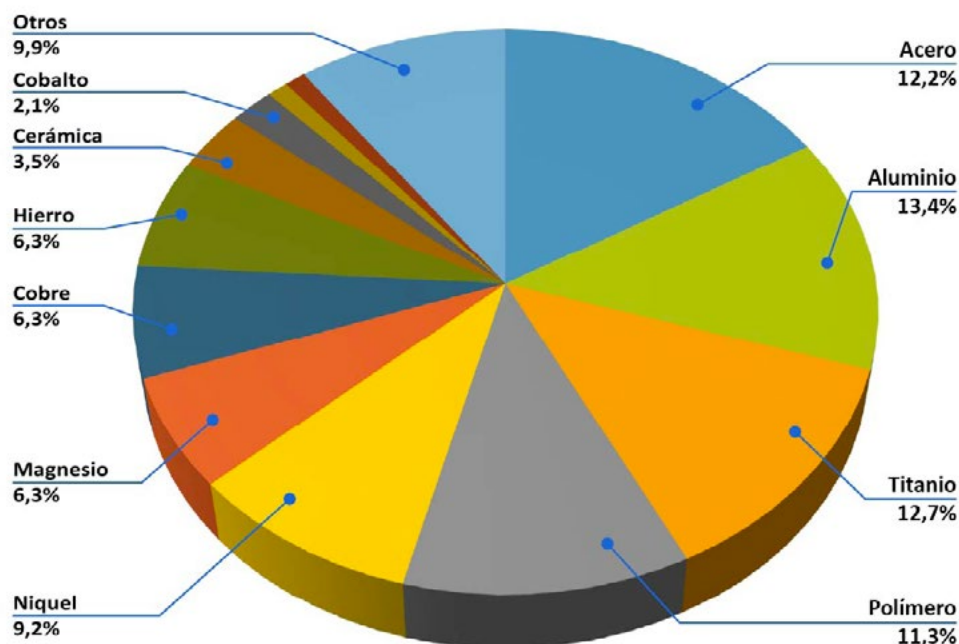


Figura N°1: Materiales más usados en la impresión aditiva.

Fuente: Materiales más usados en la fabricación de tecnologías disponibles y tendencias en impresión metálica

Tecnologías disponibles y tendencias de impresión metálica

La fabricación aditiva metálica comprende un conjunto de tecnologías que permiten consolidar polvos metálicos capa por capa hasta obtener componentes tridimensionales de alta complejidad geométrica y funcional. Estas tecnologías se diferencian principalmente en el tipo de fuente de energía utilizada para fundir o sinterizar el material y en las condiciones de operación, lo que influye directamente en la microestructura, propiedades finales y posibles aplicaciones de las piezas obtenidas. Entre ellas, destacan la fusión por láser en lecho de polvo (L-PBF), la fusión por haz de electrones (EBM), la deposición directa de energía (DED) y, en menor medida, procesos de sinterización láser adaptados para metales.

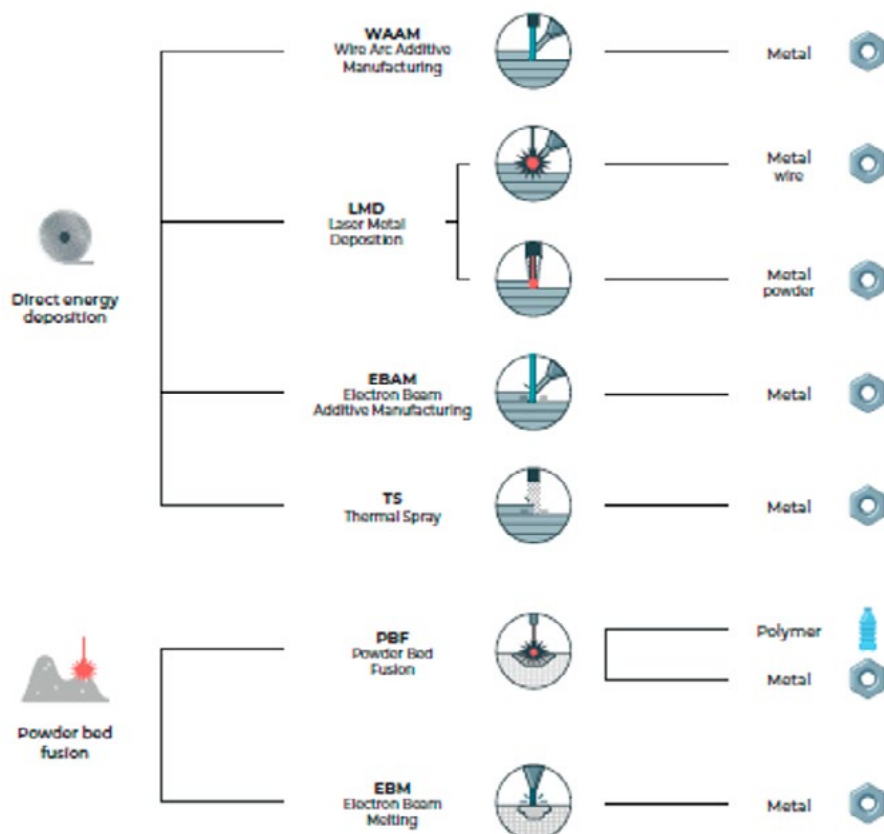


Figura N°2: Tecnologías de fabricación aditiva e impresión 3.

 Fuente: <https://www.addimat.es/>

La L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) es actualmente la tecnología más extendida en la impresión metálica debido a su versatilidad y precisión. Emplea un láser de alta potencia que funde selectivamente las partículas de polvo metálico en un lecho bajo atmósfera inerte, capa por capa, hasta consolidar la pieza. Su principal ventaja es la capacidad de producir geometrías intrincadas con excelentes propiedades mecánicas y buena resolución superficial. Sin embargo, presenta limitaciones en el tamaño de la pieza y requiere un control estricto de parámetros para evitar defectos como porosidad o tensiones residuales.

Por otro lado, la EBM (Electron Beam Melting) emplea un haz de electrones como fuente de energía y opera en condiciones de alto vacío.⁵ Esta característica reduce el riesgo de oxidación y

5 ZHANG, Yi; WU, Linmin; GUO, Xingye; KANE, Stephen; DENG, Yifan; JUNG, Yeon-Gil; LEE, Je-Hyun and ZHANG, Jing. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, p. 13. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>

facilita la fusión de materiales con altas temperaturas de fusión, como el titanio y sus aleaciones. Además, al mantener todo el lecho de polvo precalentado, disminuye las tensiones residuales y mejora la integridad estructural de los componentes. No obstante, su resolución es inferior a la de L-PBF, y los requerimientos de vacío limitan los tipos de materiales procesables.

La DED (*Directed Energy Deposition*) representa una alternativa adecuada para la reparación, recubrimiento o fabricación de piezas de gran tamaño. En este proceso, un láser, haz de electrones o incluso un arco eléctrico funde el polvo o alambre metálico a medida que se deposita en la trayectoria definida. A diferencia de PBF, DED no se limita a una cámara cerrada de polvo y permite una mayor flexibilidad en dimensiones, aunque con una precisión y acabado superficial más reducidos.

En conjunto, estas tecnologías ofrecen un abanico de posibilidades que se ajustan a distintos requerimientos. La elección entre L-PBF, EBM o DED depende de factores como el material a emplear, el tamaño y la complejidad de la pieza, las propiedades requeridas y los costos de producción, siendo todos ellos determinantes para garantizar la viabilidad técnica y económica de la fabricación aditiva metálica.

Aplicación internacional: experiencias en países desarrollados

La fabricación aditiva se utiliza ampliamente en diversos sectores, por lo que no es sorprendente que también se aplique cada vez más en el sector defensa a nivel mundial. Todo esto ha culminado en un rápido crecimiento, con un mercado global de fabricación aditiva en la industria aeroespacial y de defensa valorado en aproximadamente 2.760 millones de dólares en 2022 y con una previsión de crecimiento de aproximadamente 17.900 millones de dólares para 2032,⁶ lo que ilustra la importancia de estas tecnologías. Considerando que la velocidad, el menor peso y los menores costos son prioridades en el ámbito militar es que la fabricación aditiva sin duda desempeñará un papel importante.⁷

Los sistemas de defensa aéreos, terrestres y navales se caracterizan por poseer estructuras complejas y con requisitos específicos. En este contexto, la fabricación aditiva resulta especialmente atractiva debido a su capacidad de personalización, producción bajo demanda y manufactura *in situ*, cualidades que permiten responder a escenarios donde la flexibilidad y la rapidez son esenciales.

6 PRIOR, Markus. "How is Additive Manufacturing Being Adopted in Defense?" 3Dnatives, marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/en/how-is-additive-manufacturing-being-adopted-in-defense-100320254/>

7 CLEMENS, M. "The Use of Additive Manufacturing in the Defense Sector," 3Dnatives, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/en/the-use-additive-manufacturing-defense-sector300620224/>

Estados Unidos

En las Fuerzas Armadas de Estados Unidos, la fabricación aditiva comenzó a implementarse de manera experimental por el Ejército, la Armada, la Fuerza Aérea y el Cuerpo de Marines desde al menos el 2012. No obstante, su adopción más amplia y sistemática se consolidó a partir de 2016, marcando el inicio de una fase en la que el uso de la impresión 3D se expandió de forma sostenida.

Actualmente, todas las ramas de las fuerzas armadas estadounidenses emplean la impresión en diferentes niveles y con diversos fines. De acuerdo con el Informe Final del Departamento de Defensa de EE. UU;⁸ los proyectos de fabricación aditiva desarrollados en este ámbito se pueden agrupar en tres áreas fundamentales: en mantenimiento y sostenimiento, operaciones desplegadas y adquisición de nuevos sistemas; se utiliza también para diseñar y fabricar componentes optimizados, generar ayudas de fabricación y desarrollar prototipos.

Un caso emblemático ocurrió en 2020, cuando el Ejército necesitaba con urgencia dispositivos de visión nocturna y, ante la falta de piezas del proveedor original, logró producir en cuestión de días dos versiones funcionales mediante impresión 3D, reduciendo plazos y costos de forma significativa.⁹

Reino Unido

Al igual que en el caso del Ejército de Estados Unidos, el Ejército británico ha incorporado la tecnología de impresión aditiva en sus diferentes ramas, respondiendo a necesidades operativas propias de fuerzas militares de carácter expedicionario. Una de las aplicaciones más relevantes se ha dado en la producción de repuestos para vehículos militares en servicio, destacando el trabajo del proveedor de defensa Babcock International Group, que recientemente presentó las primeras piezas metálicas impresas destinadas a las flotas Titan y Trojan, vehículos de combate blindados.¹⁰

Este hito constituye la primera ocasión en que un contratista de defensa del Reino Unido produce componentes metálicos mediante fabricación aditiva para prolongar la vida útil y mejorar la disponibilidad de vehículos blindados. En particular, las piezas impresas forman parte del sistema de periscopio de estas plataformas, un subsistema crítico que garantiza a los operadores de Titan y Trojan una visión completa de su entorno operativo.

8 DEPARTMENT OF DEFENSE, DoD FY 2023 Agency Financial Report. Washington, DC: Department of Defense, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://comptroller.war.gov/ODCFO/afr/>

9 FICZERE, Péter. "Additive Manufacturing in the Military and Defence Industry", Design of Machines and Structures. 2022, pp. 80–85. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32972/dms.2022.016>

10 BABCOCK INTERNATIONAL GROUP. "Additive Manufacturing", 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.babcockinternational.com/what-we-do/support/equipment-support/additive-manufacturing/>

La introducción de componentes metálicos representa un avance significativo para la industria de defensa del país, ya que no solo permite dar respuesta a problemas de obsolescencia técnica y comercial, sino que también ofrece la capacidad de producir piezas de manera rápida y eficiente en apoyo directo a las operaciones militares.

Alemania

Las Fuerzas Armadas Alemanas comenzaron a utilizar la impresión aditiva en 2016, iniciando una etapa de investigación para conocer y evaluar su potencial. Más adelante, realizaron pruebas y ensayos piloto como parte de un plan general de desarrollo tecnológico. En 2020, con la creación del Proyecto de Gestión de Productos para Clientes, se pasó a una fase de implementación más amplia, que culminó en 2023 con el uso operativo de la fabricación aditiva. Todo este proceso se llevó a cabo siguiendo un enfoque planificado y basado en múltiples criterios, que permitió alinear la adopción de la tecnología con las prioridades estratégicas de la institución.¹¹

En el ámbito operativo, han fabricado piezas de baja complejidad en un taller de reparación remota desplegado. Asimismo, la Fuerza Aérea ha experimentado con producción de series pequeñas, mientras que unidades navales han evaluado el comportamiento de la impresión aditiva frente a condiciones ambientales propias del medio marítimo, tales como vibraciones, estado del mar y exposición al aire salino. Estos avances evidencian una integración progresiva de la FA en distintas ramas de las fuerzas alemanas, con miras a fortalecer su autonomía y resiliencia operativa.

Situación actual en el Ejército de Chile

El Ejército de Chile ha incorporado la impresión aditiva a sus procesos de capacitación y mantenimiento desde hace aproximadamente tres años. Esta tecnología ha impulsado la creación de diversos departamentos especializados en el desarrollo de capacidades basadas en la fabricación aditiva si bien este crecimiento aún está en fases iniciales, es necesario destacar algunas de ellas:

Laboratorio de impresión 3D de la Academia Politécnica Militar

En noviembre de 2024 se inauguró el centro de fabricación aditiva, una instalación diseñada para fortalecer las competencias técnicas y creativas de los oficiales alumnos, futuros ingenieros politécnicos militares. Este centro está equipado con sistemas de impresión 3D por extrusión de filamento (FFF/FDM), destinados a la fabricación de prototipos funcionales, así como con equipos de fotopolimerización por resina (SLA/DLP), orientados a la obtención de piezas de alta precisión

11 STANKIEWICZ, Grzegorz y KOWALSKI, Kazimierz. "Additive Manufacturing in Military Using," *Military Logistics Systems*, 2023, pp. 129 - 148. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.37055/slwl/175936>

y geometrías complejas. Su finalidad es desarrollar habilidades fundamentales en el ámbito de la ingeniería militar, tales como la capacidad de innovación, la resolución de problemas técnicos en entornos operativos y el trabajo colaborativo en el diseño y validación de soluciones tecnológicas.

Proyecto de mantenimiento recuperativo mayor en el Regimiento Logístico N° 5 “Magallanes”

Los esfuerzos del RL N° 5 “Magallanes” se han enfocado en el mantenimiento recuperativo mayor, que corresponde a una actividad programada cuyo objetivo es efectuar la intervención integral o parcial de los sistemas que componen la Escopeta Riot CBC Cal. 12. Esta actividad está orientada a la recuperación de las capacidades funcionales del arma, asegurando su disponibilidad operacional conforme a los parámetros establecidos para su empleo.

En el marco de este proceso se han fabricado componentes que requieren alta rigidez y resistencia estructural, utilizando polímeros técnicos como el ácido poliláctico (PLA) y Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Adicionalmente, para aquellas piezas que demandan propiedades de flexibilidad, se ha considerado el uso de poliuretano termoplástico (TPU), en función de sus características mecánicas adaptativas. A la fecha se han fabricado algunas piezas de polímeros, tales como:

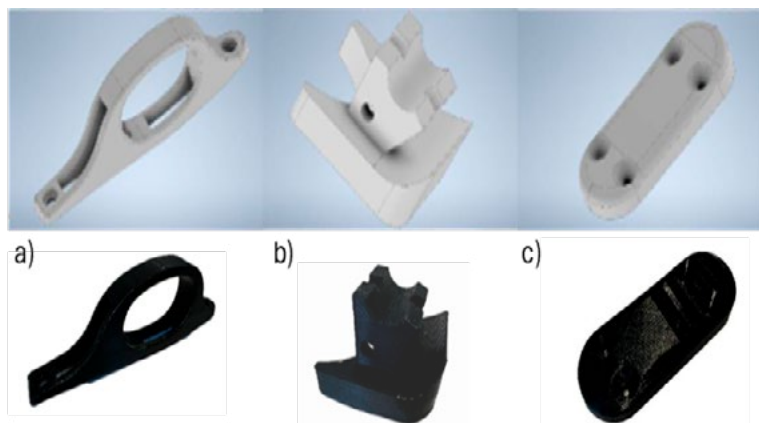


Figura N°3: Piezas fabricadas en el RL N° 5 “Magallanes”: a) guardamonte, b) guardapolvo, c) cantonera.

Fuente: Compañía de Mantenimiento del RL N° 5 “Magallanes”.

Maestranza del Regimiento Logístico N° 6 “Pisagua”

La Compañía Maestranza cuenta con capacidades básicas en diseño y fabricación aditiva, actualmente en proceso de fortalecimiento y formalización. Se emplean herramientas de modelado 3D mediante el software SolidWorks, encontrándose en trámite la adquisición de su licencia oficial para uso institucional. En materia de digitalización, se dispone de un escáner EINSKAN-SP, que permite obtener representaciones tridimensionales precisas de componentes y prototipos sencillos.

Las competencias técnicas del personal han sido desarrolladas de manera autodidacta, reflejando un alto grado de iniciativa y adaptación frente a la ausencia de entrenamiento formal en el área.



Figura N°4: piezas del fusil Galil.

Fuente: Catálogo de piezas e impresión 3D (RL N° 6 "Pisagua", 2025).

Las actividades de validación de piezas se han limitado, hasta el momento, a evaluaciones visuales, debido a que los requerimientos de ensayos destructivos exceden las capacidades actuales del taller.

En cuanto a infraestructura, el taller opera con cinco impresoras 3D, destacando una Bambu Lab X1 Carbon con sistema AMS, junto a tres Creality K1 Max y una Creality Sermoon D3, además de un computador de alto rendimiento con 1 TB de almacenamiento destinado al procesamiento de modelos y control de impresión. Como resultado de la experiencia acumulada, se ha elaborado un catálogo de modelos impresos disponible para el uso del personal del Ejército, complementado con un catálogo técnico de manufactura sustractiva del torno CNC (Control Numérico por Computadora), ambos orientados a estandarizar y difundir las capacidades productivas del taller.

Fábricas y Maestranzas del Ejército (FAMAE)

La Jefatura de Ingeniería de FAMAE ha comenzado a desarrollar capacidades en fabricación aditiva mediante la incorporación de equipos y software especializados, lo que representa un paso importante hacia la modernización de sus procesos de diseño y producción. Actualmente, cuenta con una impresora FL SUN, que permite la elaboración de prototipos funcionales y modelos de prueba, junto con el uso del software Ultimaker Cura, herramienta que facilita la preparación, optimización y control de las piezas a fabricar. A través de estos recursos, FAMAE ha logrado generar prototipos de carcasas y componentes que sirven como base para validar diseños antes de su fabricación definitiva.

La Planta de Armamento y Munición dispone de capacidades maduras y bien desarrolladas en manufactura sustractiva, con procesos, equipos y personal capacitado para cubrir las necesidades productivas actuales. No obstante, hasta la fecha no se han efectuado exploraciones sistemáticas ni inversiones en tecnologías de fabricación aditiva.

DISCUSIÓN

Comparación de propiedades metálicas

Entre los materiales más estudiados en este contexto se encuentra el acero inoxidable 316L, ampliamente utilizado en sectores como el aeroespacial, médico, nuclear y químico, debido a su excelente resistencia a la corrosión, buena soldabilidad y adecuadas propiedades mecánicas. Sin embargo, las diferencias microestructurales y mecánicas entre las piezas fabricadas mediante procesos aditivos y aquellas producidas por métodos convencionales (como la forja y la fundición) siguen estando en constante investigación.

En el artículo “Análisis comparativo de propiedades mecánicas: fabricación convencional versus fabricación aditiva para acero inoxidable 316L”¹² se analizan las propiedades de resistencia

12 SUMANARIU, Constantin Alex y CATALIN, Gheorghe. “Comparative Analysis of Mechanical Properties: Conventional vs additive manufacturing for stainless steel 316L,” Materials 17 (2024): p. 21. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma17194808>

a la tracción y la microestructura de probetas de acero fabricadas mediante fabricación aditiva y fabricación convencional.

En la siguiente tabla resumen se relevan algunas de las principales características de las propiedades mecánicas evaluadas:

Propiedades	Fabricación aditiva	Fabricación convencional / fundición	Observación
Resistencia a la tracción	650–760 MPa	580–657 MPa	La AM presenta resistencia ligeramente superior debido al refinamiento del grano y alta densidad de dislocaciones.
Límite elástico	550 MPa	330 MPa	La resistencia al inicio de la deformación plástica es notablemente mayor en AM.
Ductilidad (elongación a la rotura)	20–40%	35–45%	La ductilidad es menor en AM por la presencia de porosidad, anisotropía y tensiones residuales.
Tenacidad (comportamiento frente a fractura)	30 J/cm ² (no uniforme; fractura con cavidades finas)	No especificada, pero mayor uniformidad y absorción de energía	AM muestra fractura dúctil con cavidades pequeñas, pero menor capacidad de deformación antes de falla.
Microestructura	Grano fino (1–5 µm), crecimiento columnar alineado a la dirección de impresión	Grano más grueso (10–20 µm), distribución homogénea	El refinamiento del grano en AM aumenta la resistencia, pero reduce la deformabilidad.
Anisotropía homogeneidad	Anisotrópica (direccional, dependiente de la orientación de impresión)	Isotrópica (propiedades uniformes)	La anisotropía en AM puede afectar el desempeño bajo carga multiaxial.
Defectos microestructurales	Porosidad, vacíos, tensiones residuales	Baja porosidad, microestructura estable	Los defectos AM reducen la ductilidad y la tenacidad efectiva.

Tabla N°1: Comparación de propiedades mecánicas de acero 316L.
Fuente: Constantin Alex Sumanariu. 2024.

De lo anterior podemos deducir, en términos generales, que la manufactura aditiva, particularmente mediante la técnica SLM (*Selective Laser Melting*), método específico perteneciente a L-PBF (*Laser Powder Bed Fusion*), explicado anteriormente, presenta una mayor resistencia a la tracción y límite elástico debido a su microestructura más fina, producto de las altas velocidades de enfriamiento y solidificación. Sin embargo, esta misma característica provoca menor ductilidad, atribuida a la presencia de porosidad, anisotropía y tensiones residuales.

En contraste, los métodos convencionales generan materiales con granos más grandes y distribuidos uniformemente, lo que permite mayor deformación plástica y mejor capacidad de absorción de energía antes de la fractura, aunque con resistencia inferior.

En síntesis, la fabricación aditiva ofrece ventajas notables en términos de resistencia y diseño geométrico complejo, siendo idónea para aplicaciones estructurales o de alta carga donde la duc-

tilidad no es prioritaria. Por su parte, la fabricación convencional continúa siendo más adecuada cuando se requiere un equilibrio entre resistencia, flexibilidad y confiabilidad mecánica.

Desafíos y requisitos para la integración futura

En el Ejército de Chile, la fabricación aditiva se encuentra aún en una fase inicial y con iniciativas aisladas, lo que limita su impacto en la sostenibilidad logística. Esta situación obedece a la falta de infraestructura, personal especializado y lineamientos estratégicos que integren la tecnología en los procesos de mantenimiento.

Para avanzar hacia una implementación efectiva se requiere de una planificación institucional que incluya la creación de laboratorios especializados, la capacitación técnica del personal y la adquisición de equipos certificados. Además, deben establecerse protocolos de validación, control de calidad y certificación de materiales que aseguren la confiabilidad de las piezas producidas.

La consolidación de estos elementos permitirá pasar de una etapa experimental a un modelo normado y sostenible de producción descentralizada, fortaleciendo la autonomía y la disponibilidad operativa del Ejército.

Algunos de los desafíos a considerar:

- a. **La capacitación del personal:** el uso y operación de la impresión aditiva es un factor clave para consolidar su implementación efectiva. El manejo adecuado de las tecnologías de impresión requiere no solo destrezas prácticas en la operación de equipos, sino también conocimientos especializados en software de diseño asistido por computador (CAD), simulación y optimización de procesos. Asimismo, es necesario comprender los aspectos técnicos asociados a las licencias y plataformas digitales que respaldan la gestión del diseño y la producción.

Una formación integral en estos ámbitos garantiza la correcta utilización de los recursos, reduce errores operativos y promueve la autonomía tecnológica, fortaleciendo así la capacidad institucional para aprovechar al máximo el potencial de la fabricación aditiva.

Junto con lo anterior, el conocimiento técnico en materiales y dinámica de sólidos resulta esencial para comprender el comportamiento de los metales y polímeros utilizados, optimizar los parámetros de impresión y garantizar la calidad estructural de los componentes producidos. En conjunto, estas competencias fortalecen la autonomía tecnológica y aseguran un uso más seguro, preciso y estratégico de la fabricación aditiva dentro del ámbito militar.

- b. **Permanencia del personal:** la experiencia práctica, que se adquiere progresivamente con el tiempo, permite al personal identificar las configuraciones de impresión, materiales y condiciones operativas que ofrecen un mejor desempeño según cada apli-

cación específica. Este proceso de aprendizaje continuo no solo mejora la eficiencia técnica, sino que también fortalece la capacidad de adaptación ante nuevos desafíos.

A medida que se avanza en conocimientos, competencias y dominio del sistema, la fabricación aditiva irá alcanzando una mayor madurez dentro de la organización, consolidándose como una herramienta estratégica capaz de ofrecer soluciones cada vez más eficaces, sostenibles y alineadas con las necesidades operativas.

- c. **Clasificación de piezas:** para dar inicio al proceso de fabricación aditiva, es fundamental establecer una base de datos robusta que registre de manera sistemática la información asociada a la producción de piezas, incluyendo los parámetros de impresión, los materiales utilizados, los tiempos de fabricación y los resultados obtenidos. Esta base de datos servirá como referencia clave para garantizar el control de calidad, asegurar la trazabilidad y facilitar la mejora continua del proceso.

Junto con lo anterior, para determinar qué piezas son viables de reproducir, se debiese realizar una clasificación inicial dividiéndolas en dos tipos, según sus características y requisitos de fabricación, por ejemplo:

- Piezas Tipo 1: comprende componentes sometidos a esfuerzos mínimos y constantes, con bajas exigencias en control dimensional y calidad, como embellecedores, difusores de aire o placas de protección, cuya falla no afecta la operatividad del sistema.
 - Piezas Tipo 2: incluye piezas que deben cumplir ciertos requisitos mecánicos para funcionar correctamente sin romperse. Estas están sometidas a esfuerzos moderados y, aunque su fallo no inutiliza por completo el sistema, sí puede limitar su rendimiento. Para este tipo, es fundamental establecer límites de carga, temperatura u otras solicitaciones, así como criterios de validación y pruebas de certificación previas a su fabricación.
- d. **Certificación de piezas:** tiene como objetivo asegurar que la pieza fabricada cumple con los estándares establecidos en el diseño, los parámetros del proceso de fabricación y las condiciones operativas a las que será sometida. Esta certificación es un requisito indispensable antes de autorizar su instalación o uso. Entre las principales actividades del proceso se incluyen:
- La revisión documental, con su respectiva ficha de fabricación.
 - Especificaciones técnicas y trazabilidad de materiales.
 - La inspección dimensional, comparando medidas y tolerancias con los planos o archivos CAD
 - Los ensayos funcionales y mecánicos que evalúan resistencia, ajuste y comportamiento bajo condiciones reales o simuladas.
 - La evaluación del acabado superficial y calidad de impresión, mediante controles visuales y detección de defectos como porosidad o deformaciones.

- La emisión del informe de certificación, que registre los resultados obtenidos y determine si la pieza es conforme o no conforme para su uso.
- e. **Incorporación de un organismo certificador:** dentro de los puntos enumerados, existen pruebas o funciones que, debido a las limitaciones técnicas de los talleres de mantenimiento, no pueden ser ejecutadas de manera autónoma en cada instalación. Por lo tanto, dichas actividades de certificación o realización de ensayos destructivos o no destructivos, deberán centralizarse en el Instituto de Investigaciones y Control (IDIC), el cual cuenta con las capacidades y recursos necesarios para su desarrollo.
- f. **Catalogación de piezas:** las piezas fabricadas debiesen contar con un sistema oficial de catalogación; actualmente se utiliza el número de parte como identificador principal. Para repuestos de origen internacionales se emplea el Número de Orden de Catálogo (NOC).

En caso de que sea necesario incorporar piezas al Sistema de Gestión Logística del Ejército (SIGLE), se deberá asignar un nuevo número, lo que aplica en situaciones como la incorporación de piezas nuevas, modificaciones de diseño que requieran una catalogación alternativa a la original, u otros casos específicos.

- g. **Incorporación de la fabricación metálica:** la impresión aditiva en metales representa una de las soluciones más prometedoras para el futuro del sostenimiento militar. Su incorporación permitiría fabricar componentes estructurales y de alto desempeño directamente en unidades de mantenimiento, reduciendo drásticamente los tiempos de reposición y la dependencia de proveedores externos.

Esta tecnología ofrece la posibilidad de producir piezas con geometrías complejas, alta resistencia mecánica y excelente comportamiento en condiciones extremas, lo que la convierte en una alternativa viable para la reparación, modernización y extensión de vida útil de equipos y sistemas.

Implementar capacidades de impresión metálica, junto con los procesos críticos previamente mencionados, consolidaría una capacidad industrial de defensa moderna, flexible y autónoma, capaz de responder con rapidez y eficiencia a las necesidades operacionales del Ejército de Chile, fortaleciendo al mismo tiempo su soberanía tecnológica y su resiliencia logística.

- h. **Normativas específicas:** representa uno de los principales desafíos para su consolidación en el ámbito de defensa y principalmente en el Ejército. Actualmente, no existen marcos regulatorios claros ni estándares técnicos nacionales que definan los requisitos de calidad, trazabilidad y certificación de las piezas producidas mediante tecnologías aditivas. Esta ausencia de regulación genera incertidumbre en la validación y aceptación de componentes impresos, especialmente cuando se trata de aplicaciones críticas en sistemas militares o de seguridad.

La creación de un marco normativo adaptado a la realidad nacional, alineado con estándares internacionales como los de ASTM (*American Society for Testing and Materials*) o ISO (Sistema de Normalización Internacional), resulta fundamental para garantizar la confiabilidad, interoperabilidad y seguridad de las piezas fabricadas, y así permitir el desarrollo sostenido de esta capacidad tecnológica dentro del sistema de defensa.

- i. **Incorporación de un plan piloto:** con el propósito de fortalecer la capacidad institucional del Ejército de Chile en materia de fabricación aditiva y superar la actual dispersión de esfuerzos y desigualdad tecnológica entre unidades, se recomienda la implementación de un “Plan Piloto de Fabricación Aditiva” con una proyección de dos años, orientado a consolidar una red operativa, estandarizada y autosostenible de producción descentralizada de componentes.

Este plan permitirá al Ejército de Chile transitar desde iniciativas aisladas hacia una capacidad institucional integrada, alineada con las tendencias de modernización logística y mantenimiento predictivo observadas en fuerzas armadas de países desarrollados. Con ello, el proceso fortalecerá la eficiencia operativa, la resiliencia logística y la independencia tecnológica de la institución en el mediano plazo.

Un elemento clave del plan piloto debe ser la incorporación deliberada de ciclos de ensayo y error controlados como metodología de trabajo. La fabricación aditiva prospera en entornos donde es posible iterar rápidamente: diseños, prototipos, ajustes de geometría, optimización de pesos y validación funcional.

CONCLUSIONES

La impresión metálica representa la evolución natural de las tecnologías 3D dentro del ámbito militar, al permitir la producción de componentes estructurales y funcionales en materiales de alta resistencia, como aceros, aleaciones de titanio o aluminio. A diferencia de la impresión polimérica, esta tecnología ofrece propiedades mecánicas comparables o incluso superiores a las obtenidas por métodos convencionales, lo que la convierte en una alternativa viable para la reparación, sustitución y producción de repuestos críticos en entornos logísticos exigentes.

Su aplicación en el ámbito de defensa abre la posibilidad de fabricar piezas bajo demanda en zonas de despliegues, reduciendo tiempos de inactividad y dependencia de cadenas de suministro externas. Sin embargo, su implementación requiere equipamiento especializado, condiciones controladas de producción y personal altamente calificado, así como el desarrollo de normas de certificación y control de calidad específicas.

En la actualidad, las iniciativas relacionadas con la fabricación aditiva en el Ejército de Chile se desarrollan de forma aislada y con diferentes niveles de madurez tecnológica, lo que ha generado una

desigualdad de capacidades técnicas entre las unidades y talleres. Mientras algunos centros han incorporado impresoras 3D y software de modelado para la elaboración de prototipos y piezas funcionales, otros carecen del equipamiento, infraestructura y personal especializado necesarios para aplicar la tecnología de manera autónoma. Esta disparidad limita la posibilidad de establecer una red de producción descentralizada y estandarizada, reduciendo el impacto potencial de la fabricación aditiva en la logística militar.

Además, la falta de programas de formación técnica y de transferencia de conocimiento entre unidades dificulta la consolidación de una capacidad institucional sólida. Superar esta brecha requerirá una estrategia coordinada a nivel institucional, que promueva la capacitación, la inversión en equipamiento y la creación de procedimientos comunes para el uso eficiente y seguro de la fabricación dentro del Ejército.

En este sentido, resulta esencial proyectar a futuro una estrategia de perfeccionamiento integral, que combine la capacitación del personal, la adquisición de equipos de última generación y la integración de tecnologías de impresión metálica.

En el contexto institucional, la incorporación progresiva de la fabricación aditiva metálica representaría un salto cualitativo hacia una capacidad industrial avanzada, fortaleciendo la autonomía tecnológica y la resiliencia operativa de las Fuerzas Armadas frente a escenarios cambiantes y de alta exigencia. No obstante, su implementación debe sustentarse en un estudio de conveniencia técnico-económica, que permita identificar con precisión las áreas donde la fabricación aditiva aporte mayor valor estratégico y logístico.

Para ello, resulta fundamental disponer de información robusta y actualizada sobre repuestos críticos, tasas de falla, tiempos de reposición, costos de adquisición y obsolescencia de componentes, de modo que la decisión de incorporar esta tecnología se base en datos verificables y cuantificables. La valoración objetiva de estos indicadores permitirá definir qué sistemas de armas, plataformas o líneas logísticas se beneficiarían más de la producción descentralizada y bajo demanda, optimizando recursos y asegurando la pertinencia técnica de la inversión. En este sentido, el estudio de conveniencia se configura como un instrumento clave de planificación, orientado a garantizar que la adopción de la fabricación aditiva contribuya efectivamente al sostenimiento y la modernización de las capacidades operativas del Ejército.

BIBLIOGRAFÍA

BABCOCK INTERNATIONAL GROUP. "Additive Manufacturing", 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.babcockinternational.com/what-we-do/support/equipment-support/additive-manufacturing/>

CLEMENS, M. Nativos 3D. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/en/the-use-additive-manufacturing-defense-sector300620224/#!>

DEPARTMENT OF DEFENSE, DoD FY 2023 Agency Financial Report. Washington, DC: Department of Defense, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://comptroller.war.gov/ODCFO/afr/>

EJÉRCITO DE CHILE. Regimiento Logístico N° 6 Pisagua". Catálogo de piezas e impresión 3D. 2025.

EJÉRCITO DE CHILE. Regimiento Logístico N° 5 "Magallanes. 2024. . Capacidades de impresión 3D de la Compañía de Mantenimiento.

FICZERE, Péter. "Additive Manufacturing in the Military and Defence Industry", Design of Machines and Structures. 2022, pp. 80–85. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.32972/dms.2022.016>

LÓPEZ Vicente, P. Additive manufacturing in defence. European defence. 2017. doi:ISSN 1977-5059

PRIOR Markus. "How Is Additive Manufacturing Being Adopted in Defense?" 3Dnatives, marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/en/how-is-additive-manufacturing-being-adopted-in-defense-100320254/>

STANKIEWICZ, Grzegorz y KOWALSKI, Kazimierz. "Additive Manufacturing in Military Using," Military Logistics Systems, 2023, pp. 129-148. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.37055/slw/175936>

SUMANARIU, Constantin Alex y CATALIN, Gheorghe. "Comparative Analysis of Mechanical Properties: Conventional vs additive manufacturing for stainless steel 316L ," Materials 17 (2024): p. 21. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma17194808>

UNIVERSIDAD CATÓLICA LUIS AMIGO. Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos. Lámpsakos, núm. 19, 2018. pp. 47-54. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/6139/613964506005/html/>

ZHANG, Yi; WU, Linmin; GUO, Xingye; KANE, Stephen; DENG, Yifan; JUNG, Yeon-Gil; LEE, Je-Hyun and ZHANG, Jing. Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, p. 13. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2747-y>