

Diseño y fabricación de prototipos de réplicas inertes utilizando materiales y procesos adecuados que aseguren resistencia, seguridad y similitud con las armas originales.

Naranjo Villagómez, Jordy Elian y León Mendoza, Josthin Leonel

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Tecnólogo Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Mgtr. Trujillo Jaramillo, José Guillermo

04 de septiembre de 2026

Latacunga

Reporte de verificación de contenidos

Informe de análisis
Compilatio Studium

TESIS LEON JOSTHIN - NARANJO JORDY ...
ID : 03edfd354fedfadb9773fc96c753abb933bbd9c4

4%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TESIS LEON JOSTHIN - NARANJO JORDY ....txt
Tamaño del archivo original : 291,74 kB
Número de palabras : 11.092

Depositante : Atro. Leon Mendoza Josthin. E TEC
Fecha de depósito : 7 de septiembre de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 7 de septiembre de 2026

Resumen (sección 1/3)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 3%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas 0%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JOSE GUILLERMO TRUJILLO JARAMILLO

Mgtr. José Guillermo, Trujillo Jaramillo.

Director

C.C: 1707316632

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnologia Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Diseño y fabricación de prototipos de réplicas inertes utilizando materiales y procesos adecuados que aseguren resistencia, seguridad y similitud con las armas originales"**; fue realizado por los señores **Naranjo Villagómez, Jordy Elian y León Mendoza, Josthin Leonel**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Además, fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga 04 de septiembre del 2026

JOSE GUILLERMO TRUJILLO JARAMILLO

Mgtr. José Guillermo, Trujillo Jaramillo

Director

C.C: 1707316632

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Naranjo Villagómez, Jordy Elian y León Mendoza, Josthin Leonel**, con cédula de ciudadanía n°0202350518 y n°0504062506, declaramos que el contenido, ideas y criterios que el trabajo de Integración Curricular: **"Diseño y fabricación de prototipos de réplicas inertes utilizando materiales y procesos adecuados que aseguren resistencia, seguridad y similitud con las armas originales"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 04 de septiembre del 2026

JORDY ELIAN NARANJO VILLAGOMEZ

Naranjo Villagómez, Jordy Elian

C.C.: 0202350518

JOSTHIN LEONEL LEON MENDOZA

León Mendoza, Josthin Leonel

C.C.: 0504062506

Departamento de Seguridad y Defensa

Carrera de Tecnología Superior Universitaria en Ciencias Militares Aeronáuticas

Autorización de publicación

Nosotros, **Naranjo Villagómez, Jordy Elian y León Mendoza, Josthin Leonel**, con cédula de ciudadanía N°0202350518 y N°0504062506, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Unidad de Integración Curricular: **"Diseño y fabricación de prototipos de réplicas inertes utilizando materiales y procesos adecuados que aseguren resistencia, seguridad y similitud con las armas originales"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 04 de septiembre del 2026

JORDY ELIAN NARANJO VILLAGOMEZ

Naranjo Villagómez, Jordy Elian

C.C.: 0202350518

JOSTHIN LEONEL LEON MENDOZA

León Mendoza, Josthin Leonel

C.C.: 0504062506

Dedicatoria

Con el corazón lleno de gratitud y emoción, dedico este logro a mi familia, quienes han sido mi sostén, mi inspiración y mi razón de perseverar en los momentos más difíciles. Este triunfo no es únicamente mío, sino el reflejo de cada gesto de amor, cada palabra de aliento y cada sacrificio compartido que me impulsó a seguir adelante cuando las fuerzas parecían agotarse.

A mis padres, que con su ejemplo de trabajo incansable y su fe inquebrantable me enseñaron que los sueños se alcanzan con disciplina, humildad y esperanza. A mis hermanos, que con su compañía constante me recordaron que la unión familiar es el refugio más seguro en medio de las tormentas.

Gracias por cada sonrisa que me devolvió la calma, por cada consejo que iluminó mi camino y por cada abrazo que me recordó que nunca estoy solo. Este éxito es también suyo, porque detrás de cada meta alcanzada está la huella imborrable de su apoyo y confianza. Hoy celebro no solo un triunfo personal, sino una victoria compartida, construida con el amor infinito de quienes siempre creyeron en mí, incluso antes de que yo mismo lo hiciera.

Naranjo Villagomez, Jordy Elian

Dedicatoria

Al alcanzar esta meta, dedico este logro con profunda gratitud a las personas que creyeron en mí desde el primer día. Cada paso dado y cada obstáculo superado han sido posibles gracias al aliento, la confianza y el esfuerzo incondicional de quienes me acompañaron en el trayecto.

A mis amados padres, Mendoza Pilatasig Martha Jeaneth y León Yanez Klever Vinicio, cimientos de mi vida y mi mayor inspiración: gracias por su entrega interminable, por sus sacrificios silenciosos y por enseñarme el valor de la perseverancia. A mis hermanas, León Mendoza Andreina Lisbeth y León Mendoza Alejandra Mickaela, por su apoyo constante, sus palabras de ánimo y por ser refugio y alegría en los momentos más exigentes.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a todas aquellas personas que, con una palabra de aliento, un gesto generoso o su presencia silenciosa, aportaron luz en mis noches de desvelo y constancia. Su apoyo fue esa fortaleza invisible que me impulsó a mantener la disciplina y no rendirme jamás ante la adversidad.

Este logro no es solo mío, sino el resultado del amor y la fuerza compartida en hogar. Su fe en mí transformó las horas de cansancio en motivación para continuar; gracias por acompañarme a construir este sueño y por celebrar hoy junto a mí el triunfo alcanzado.

León Mendoza, Josthin Leonel

Agradecimiento

En este logro alcanzado, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y a la institución que, de una u otra manera, fueron parte fundamental de este proceso. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada enseñanza recibida se convirtieron en la base que me permitió avanzar con firmeza y confianza.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y la paciencia necesarias para superar los obstáculos que se presentaron en el camino. Sin su guía y su luz, este triunfo no habría sido posible.

A mi familia, quienes han sido mi motor y mi refugio en cada etapa de mi vida. A mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y la disciplina, y por recordarme siempre que los sueños se alcanzan con perseverancia. A mis hermanos, por su compañía constante, por su apoyo silencioso y por ser ejemplo de unión y solidaridad. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo mismo dudaba.

A mis docentes y a la institución que me abrió sus puertas, por brindarme conocimientos, herramientas y valores que me acompañarán en mi vida profesional y personal. Cada clase, cada consejo y cada corrección fueron semillas que hoy florecen en este logro.

A mis compañeros y amigos, quienes se convirtieron en una segunda familia durante este trayecto. Gracias por las horas compartidas de estudio, por las risas que aligeraron las jornadas más pesadas y por el compañerismo que transformó este proceso en una experiencia inolvidable.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, aportaron a mi formación y crecimiento. Cada palabra, cada gesto y cada enseñanza quedarán grabados en mi memoria como recordatorio de que los triunfos nunca son individuales.

Naranjo Villagomez, Jordy Elian

Agradecimiento

Al alcanzar esta meta, dedico este logro con profunda gratitud a las personas que creyeron en mí desde el primer día. Cada paso dado y cada obstáculo superado han sido posibles gracias al aliento, la confianza y el esfuerzo incondicional de quienes me acompañaron en el trayecto.

A mis amados padres, Mendoza Pilatasig Martha Jeaneth y León Yanez Klever Vinicio, cimientos de mi vida y mi mayor inspiración: gracias por su entrega interminable, por sus sacrificios silenciosos y por enseñarme el valor de la perseverancia. A mis hermanas, León Mendoza Andreina Lisbeth y León Mendoza Alejandra Mickaela, por su apoyo constante, sus palabras de ánimo y por ser refugio y alegría en los momentos más exigentes.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a todas aquellas personas que, con una palabra de aliento, un gesto generoso o su presencia silenciosa, aportaron luz en mis noches de desvelo y constancia. Su apoyo fue esa fortaleza invisible que me impulsó a mantener la disciplina y no rendirme jamás ante la adversidad.

Este logro no es solo mío, sino el resultado del amor y la fuerza compartida en hogar. Su fe en mí transformó las horas de cansancio en motivación para continuar; gracias por acompañarme a construir este sueño y por celebrar hoy junto a mí el triunfo alcanzado.

León Mendoza, Josthin Leonel

Índice de contenido

Carátula 1

Reporte de verificación de contenidos 2

Certificación 3

Responsabilidad de Autoría 4

Autorización de publicación 5

Dedicatoria 6

Dedicatoria 7

Agradecimiento 8

Agradecimiento 9

Índice de contenido 10

Índice de tablas 14

Índice de figuras 15

Resumen 16

Abstract 17

Capítulo I 18

Introducción 18

Planteamiento del Problema 19

El problema de diseño 19

El problema de los materiales 19

El problema de los procesos 20

El problema de la seguridad del objeto 20

Evidencia disponible y vacío nacional 21

Derivación del problema y de los objetivos 22

Formulación del Problema 22

Justificación 22

Justificación metodológica 22

Justificación técnica 24

Justificación institucional 24

Objetivos 24

Objetivo general 25

Objetivos específicos 25

Alcance y Delimitación 25

Capítulo II 27

Estado del Arte 27

Antecedentes Investigativos 27

Antecedentes internacionales 27

Antecedentes institucionales 28

Marco Teórico 29

Historia de la réplica inerte de instrucción 29

El proceso de deposición de material fundido 29

Material y parámetros de fabricación 30

La colada de poliuretano en molde de silicona 31

El paquete de diseño digital 33

Construcción del protocolo de pruebas básicas 34

La seguridad del prototipo resuelta por geometría 35

Marco Legal 36

Capítulo III 38

Metodología 38

Enfoque de la Investigación 38

Tipo de Investigación 38

Diseño de la Investigación 39

Objeto de Estudio y Unidad de Análisis 40

Técnicas e instrumentos de recolección de datos 41

Procedimiento de la Investigación 41

Técnicas de Análisis de Datos 43

Consideraciones de Seguridad 44

Criterios de Rigor y Limitaciones 45

Capítulo IV 46

Resultados 46

Resultado del Diseño Digital 46

Resultado de la Fabricación 49

Similitud Dimensional y de Masa 52

Simulación de una Configuración Alternativa 53

Verificación de las Condiciones de Seguridad 54

Alcance de las Pruebas Básicas 55

Capítulo V 56

Conclusiones y Recomendaciones 56

Conclusiones 56

Recomendaciones 57

Referencias 59

Apéndice 60

Índice de tablas

Tabla 1 Aportes de la literatura revisada a la decisión de material y parámetros 30

Tabla 2 Criterios de comparación entre los dos procesos de fabricación considerados 32

Tabla 3 Estructura del protocolo de pruebas básicas del prototipo 34

Tabla 4 Correspondencia entre la metodología declarada y su aplicación 39

Tabla 5 Composición del conjunto según el plano explosionado 40

Tabla 6 Fases del procedimiento de diseño y fabricación 41

Tabla 7 Configuración de fabricación empleada 42

Tabla 8 Paquete de diseño digital entregado 46

Tabla 9 Comparación entre el ácido poliláctico y el acrilonitrilo butadieno estireno en piezas impresas por deposición de material fundido 50

Tabla 10 Consumo estimado de material por pieza 50

Tabla 11 Comparación entre el prototipo y los valores declarados por la documentación técnica 52

Tabla 12 Comparación entre las dos configuraciones de relleno simuladas 53

Índice de figuras

Figura 1 Equipo de deposición de material fundido empleado en la fabricación 43

Figura 2 Modelo digital del conjunto de la réplica inerte 47

Figura 3 Guardamanos modelado en vista exterior 48

Figura 4 Guardamanos modelado en vista interior 48

Figura 5 Prototipo fabricado y ensamblado 51

Resumen

Este trabajo diseña y fabrica un prototipo de réplica inerte del fusil M4 para la instrucción de los alumnos de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea (ETFA), con materiales y procesos que aseguren resistencia, seguridad y similitud con el arma original. La Escuela no podía reponer por su cuenta el medio de instrucción que emplea, y carecía de una decisión documentada sobre con qué material, con qué configuración de máquina y mediante qué proceso fabricarlo. El estudio se desarrolló con un enfoque cualitativo, de alcance descriptivo y finalidad aplicada, con diseño no experimental de corte transversal, apoyado en literatura arbitrada sobre comportamiento mecánico de polímeros procesados por manufactura aditiva y sobre procesos de moldeo. El conjunto se resolvió en software de diseño asistido por computadora y quedó documentado en doce piezas mediante un plano explosionado con su lista de elementos. La fabricación se ejecutó por deposición de material fundido en ácido poliláctico, con altura de capa de 0,2 milímetros y relleno del doce por ciento, y consumió 699,92 gramos de material en 23 horas con 15 minutos de tiempo de máquina. El prototipo alcanzó el 23 por ciento de la masa declarada para el arma sin cargador. Una simulación con relleno del cuarenta por ciento elevó esa proporción al 37 por ciento sin cerrar la diferencia, resultado que ubica la solución en la fase de diseño del modelo antes que en la configuración de la máquina. Las pruebas básicas de ensamblaje, resistencia y manipulación quedaron definidas en su protocolo, sin aplicarse dentro del período del proyecto.

Palabras clave: réplica inerte, manufactura aditiva, ácido poliláctico, diseño asistido por computadora, instrucción militar.

Abstract

This study details the design and manufacturing of an inert M4 rifle replica prototype for student training at the Air Force Technical School (ETFA), using materials and processes that ensure durability, safety, and similarity to the original weapon. The School lacked an autonomous method to replace this instructional material, as well as documentation specifying the required manufacturing processes or materials. This project addresses that gap through 3D printing design and production. The replica was structured into twelve distinct parts using CAD software and produced with lightweight polymer. Although the physical prototype turned out significantly lighter than the actual rifle, test simulations showed that matching the original weight requires modifying the internal design of the model rather than simply increasing material density during printing. By the end of this stage, the replica was completed, and the evaluation procedures for its strength, assembly, and handling were fully documented in a practical guide ready for implementation at the School.

Keywords: inert replica, additive manufacturing, polylactic acid, computer-aided design, military training.

Capítulo I

Introducción

Este informe entrega dos cosas que no pueden separarse: los prototipos de réplicas inertes para la instrucción de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea (en adelante “ETFA”) y el registro de cómo se los hizo. Sin ese registro el objeto sirve una sola vez, porque cuando se rompe nadie sabe con qué volver a fabricarlo.

Hoy la Escuela no puede reponer por su cuenta el medio de instrucción que usa. Las réplicas de uso profesional se importan, llegan con el catálogo del fabricante y no siempre corresponden al arma que está en dotación. Fabricarlas en el país es posible con procesos que ya están disponibles en el medio local. Lo que no existe es la decisión escrita de con qué material, con qué configuración de máquina y mediante qué proceso hacerlo.

El estudio es cualitativo, de alcance descriptivo y finalidad aplicada, con diseño no experimental de corte transeccional. Resuelve por análisis documental la selección del material, de los parámetros de fabricación y del proceso; y, verifica sobre el prototipo terminado lo que la literatura permitió anticipar.

El proyecto general se divide en tres objetivos y el orden entre ellos es de dependencia. El primero documenta las características técnicas, ergonómicas, materiales y funcionales del fusil M4 que la réplica debe reproducir. El segundo convierte esos parámetros en un modelo digital y en piezas fabricadas. El tercero evalúa la funcionalidad y la utilidad del sistema de entrenamiento en las prácticas de instrucción de los alumnos de la ETFA.

La posición intermedia de esta fase explica su carga. Recibe parámetros y entrega objetos. Un error no se detiene aquí. Si la pieza no reproduce la masa que se buscaba, la evaluación posterior mide algo distinto de lo que el proyecto se propuso. Es necesario llevar a cabo un registro de fabricación puesto que sin él los resultados de evaluación no sirven para corregir fallas.

Planteamiento del Problema

La ETFA aún no tiene la capacidad de abastecimiento propio de enseñanza. Existe una gran dependencia en ejemplares extranjeros por lo que ante la falta de fabricación local, la institución no decide qué o cuándo adquirir, sino que queda a la disposición de las ofertas que se presentan en los mercados internacionales. Fabricar dentro del país invierte ese orden, pero abre un problema que nadie ha resuelto todavía: ¿con qué se fabrica y cómo?

El tema nombra cuatro frentes: el diseño, los materiales, los procesos y la seguridad del objeto. Cada uno constituye un problema en sí mismo y de cada uno se desprende una causa que provoca un efecto concreto sobre el prototipo. A continuación, se exponen los cuatro en ese orden:

El problema de diseño

Una pieza puede fabricarse a partir de un boceto, pero no puede reproducirse a partir de este. Sin modelo digital no hay planos con dimensiones acotadas, no hay archivo que enviar a la máquina y no hay forma de declarar cuánto se parece el prototipo al arma, porque no existe el documento contra el cual verificarlo. Una corrección, en esas condiciones, obliga a rehacer el objeto entero en lugar de modificar el modelo y volver a imprimir.

Entre las causas más relevantes no se dispone un modelo digital paramétrico de la réplica ni la documentación de planos que debería acompañarlo, lo que provoca que cada unidad fabricada dependa del criterio de quien la hizo y que la institución quede sin la capacidad de reponer una pieza rota sin repetir todo el trabajo.

El problema de los materiales

La resistencia de una pieza polimérica no viene dada por el nombre del material que aparece en el rollo de filamento. Dos piezas del mismo material se comportan de manera distinta según cómo se las haya fabricado y la diferencia entre una que soporta el uso y otra que se rompe en la primera semana puede estar entera en parámetros que nadie anotó.

Cuando la elección se hace por el filamento que está a la mano, el resultado es un dato de suerte.

Entre las causas más relevantes se evidencia que no existe un criterio declarado que vincule la solicitud prevista de cada pieza con el material y con los parámetros de fabricación, lo que provoca que la resistencia del prototipo sea un resultado y no una decisión; y, que una falla en servicio no pueda atribuirse a ninguna causa identificable.

El problema de los procesos

Existe más de una manera de producir este objeto. La deposición de material fundido es la que la sede tiene instalada; la colada de poliuretano en molde de silicona es la que emplea la industria que fabrica estas réplicas de forma comercial. Las dos rutas tienen costos, tiempos y precisiones distintas, y la conveniencia de una sobre otra depende de cuántas unidades se vayan a producir y de cuánto se espere corregir el diseño en el camino.

Entre las causas más relevantes se evidencia que el proceso disponible no ha sido comparado contra la alternativa industrial bajo criterios declarados, lo que provoca que la elección se justifique por lo que hay en la sede y no por lo que corresponde al uso previsto.

El problema de la seguridad del objeto

Un objeto que reproduce la forma externa de un fusil obliga a resolver, en la pieza misma, que no dispara, que no admite munición y que no puede convertirse en algo que sí lo haga. Una advertencia escrita en un manual no cumple esa función: quien encuentra el objeto no lee el manual. La seguridad de una réplica inerte es una propiedad de su geometría y de su acabado.

Entre las causas más relevantes se evidencia que las condiciones que hacen inerte al objeto no están traducidas en decisiones concretas de volumen, de interfaces y de color, lo que provoca que la condición de no convertibilidad quede sostenida por una declaración y no por la pieza, y que el prototipo se ubique en una zona ambigua frente al control institucional.

Evidencia disponible y vacío nacional

Antes de recurrir a literatura extranjera corresponde precisar qué hay en el país. La revisión realizada para este trabajo no localizó producción arbitrada ecuatoriana sobre fabricación de réplicas inertes de armamento, ni estudios nacionales que documenten con qué material y con qué parámetros se produce un medio de instrucción de este tipo.

Lo que sí existe en el Ecuador es trabajo previo sobre el proceso. Fonseca y Miranda (2018) desarrollaron en la ESPE extensión Latacunga un prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes orientado al ahorro de material y a la mejora de la resistencia mecánica de piezas obtenidas por deposición de material fundido. La preocupación por la resistencia de la pieza impresa ya se trabajó dentro de la sede con equipo propio. Este informe continúa una línea abierta en lugar de estrenar una. La evidencia que delimita el problema, en cambio, proviene de producción regional e internacional.

Experimentos como los de Rodríguez-Panes et al. (2018) demostraron que el porcentaje de relleno de la impresión pesa más en la resistencia del objeto que el material seleccionado. Algarni y Ghazali (2021) continuaron con esta línea de análisis mediante un análisis estadístico en varios polímeros, la densidad de relleno fue ubicada en primer lugar y la altura de la capa en segundo. De este modo, la fuerza del objeto se define en los ajustes de la impresora y no en lo que se gasta al comprar el material.

El siguiente punto se refiere al método de fabricación. Wortmann et al. (2022) analizaron el moldeo en silicona por colada al vacío y demostraron que su rentabilidad se basa en el número de copias. Fabricar el molde inicial es costoso por lo que el proceso únicamente encontrará su norte si se producen suficientes unidades.

Las cuatro causas expuestas comparten una naturaleza. Ninguna se refiere a falta de equipo, de material o de tiempo: todas señalan decisiones que no se han tomado ni se han dejado por escrito. Los cuatro efectos, por su parte, recaen sobre el objeto que se va a fabricar y sobre la posibilidad de volver a fabricarlo.

Derivación del problema y de los objetivos

Las cuatro causas se agrupan en dos bloques según el lugar donde se resuelven. La primera y la cuarta se resuelven en el modelo digital porque tanto la geometría acotada como el volumen sin cavidad, las interfaces y el marcado de identificación se deciden al modelar y quedan fijados en los planos. La segunda y la tercera se resuelven en la construcción porque el material, los parámetros de máquina y el proceso solo quedan comprobados cuando la pieza existe y se la manipula.

Esa agrupación es la que explica por qué el trabajo tiene dos objetivos específicos y no más. El objetivo específico de diseño produce el modelo y los planos digitales, y con ellos resuelve el problema de diseño y el de la seguridad del objeto. El objetivo específico de construcción produce el prototipo y sus pruebas básicas, y con ello resuelve el problema de los materiales y el de los procesos.

El problema es sencillo porque la Escuela no tenía réplicas del arma para que los alumnos entrenaran, ni existía una guía clara sobre cómo fabricar unas que no se rompieran, fueran seguras de manipular y se sintieran como las reales.

Para resolver esa falta de información, la meta fue diseñar y construir esos prototipos paso a paso. Se tuvieron muy presente los materiales y procesos adecuados para que soporten la exigencia del entrenamiento diario y sean prácticamente iguales a las ejemplares reales.

Formulación del Problema

¿De qué manera la integración de diseño digital, selección de materiales y procesos de fabricación permite desarrollar prototipos de réplicas inertes que garanticen resistencia mecánica, seguridad operativa y fidelidad con las armas de dotación para la instrucción en la ETFA?

Justificación

Justificación metodológica

La tipología de Hernández y Mendoza (2018) ofrece los cuatro planos en los que se define un estudio. Cada uno se resuelve aquí por lo que exige fabricar un objeto.

El enfoque es cualitativo. La selección del material, de los parámetros de máquina y del proceso se resuelve interpretando literatura experimental ya publicada y contrastando criterios entre sí, sin ensayo propio de probetas. Lo que el trabajo produce como conocimiento son decisiones justificadas y un procedimiento repetible, no magnitudes obtenidas de una muestra.

Los registros que se toman sobre el prototipo terminado, su masa, su comportamiento durante el ensamblaje y la manipulación cumplen función de verificación y no de medición de variables: no hay grupos de comparación, no hay tratamiento estadístico y de ellos no se generaliza a ninguna población de piezas. Llamar mixto a este estudio porque algunos de esos registros son numéricos confundiría la naturaleza del dato con la naturaleza del trabajo.

El alcance es descriptivo y la finalidad, aplicada. Es descriptivo porque el propósito es especificar las propiedades del prototipo obtenido y del procedimiento con que se lo produjo, sin establecer relaciones causales entre variables ni explicar por qué un polímero se comporta como se comporta. Es aplicado porque el conocimiento que se moviliza ya está publicado y lo que el trabajo hace es usarlo para resolver una necesidad concreta de la Escuela.

El estudio es no experimental y transeccional. No existen experimentos previos, grupos de control o pruebas comparativas, sino más bien se evaluó un prototipo único. Las mediciones fueron realizadas en una sola jornada mediante el contraste de manuales técnicos con el registro físico de la pieza.

Las fuentes documentales son la literatura arbitrada sobre comportamiento mecánico de polímeros procesados por manufactura aditiva, la literatura sobre procesos de moldeo, la documentación técnica del arma que la ETFA facilite y la normativa nacional vigente. El registro sobre la pieza comprende la configuración de fabricación efectivamente empleada la masa del prototipo y la observación de su comportamiento durante el ensamblaje y la manipulación, consignados en fichas escritas con anterioridad a la prueba. El contraste entre lo que la

literatura establece y lo que el prototipo hizo es el que permite afirmar que la pieza resiste, en lugar de suponerlo.

Estos cuatro planos, junto con las fichas y el protocolo que se construyen en el marco teórico, son el material con el que se levanta el diseño metodológico completo: la secuencia de trabajo, los instrumentos, el procedimiento de aplicación y los criterios con que se leerán los resultados.

Justificación técnica

Al producir la réplica en el país, se asegura que el diseño responda al fusil real del cuerpo militar, evitando las limitaciones de un catálogo comercial. La institución conservará la documentación completa del proyecto: planos, archivos 3D, lista de materiales y la bitácora de fabricación. Además, la resistencia de las piezas impresas queda respaldada por estudios previos en parámetros de impresión.

Además, genera un valor directo a varios cuerpos: la ETFA gana autonomía de producción; los instructores extienden sus sesiones de entrenamiento al contar con piezas de repuesto; los alumnos entrenan con un objeto resistente a la actividad diaria de instrucción; y, la ESPE aplica sus tecnologías en un proyecto real.

Justificación institucional

La ESPE cuenta con trabajos previos en manufactura aditiva orientada a la resistencia mecánica de la pieza; lo que se busca con este informe es continuar la línea existente en la sede y aprovechar el equipamiento que está disponible.

El aporte original del trabajo es el registro de fabricación. Los materiales existen, el equipo existe y la literatura sobre parámetros existe, pero no está reunida en un procedimiento que permita producir esta pieza concreta y volver a producirla igual. Convertir conocimiento disperso en una secuencia repetible, con las decisiones justificadas una por una, es lo que este informe entrega y lo que hoy no existe en la institución.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y fabricar prototipos de réplicas inertes utilizando materiales y procesos adecuados que aseguren resistencia, seguridad y similitud con las armas originales.

Objetivos específicos

Desarrollar modelos y planos digitales de las réplicas inertes mediante software de diseño asistido por computadora (CAD).

Construir los prototipos utilizando materiales seleccionados y realizar pruebas básicas de ensamblaje, resistencia y manipulación.

Alcance y Delimitación

El estudio alcanza a convertir los parámetros documentados del arma en un objeto fabricado y verificado. Entrega dos productos, que corresponden a los dos objetivos específicos: el modelo digital del conjunto con su plano explosionado y su lista de piezas, el prototipo construido junto con el registro de las pruebas básicas de ensamblaje, resistencia y manipulación aplicadas sobre ellos. Con esos dos productos el objetivo general queda cumplido y el informe cierra.

El estudio no alcanza a caracterizar el arma original. Las dimensiones, la masa y la posición de los elementos de manipulación se toman de los manuales técnicos y de la documentación que la ETFA facilitó, porque la fabricación no puede a la vez producir y auditar su propio requerimiento. Tampoco alcanza a los ensayos normalizados de caracterización de material sobre probeta, porque no se dispone de máquina de ensayo. Las pruebas de este informe son las básicas que nombra el objetivo específico, esto es, verificaciones funcionales sobre la pieza terminada y de ahí que sus resultados describan lo que esa pieza soportó y no las propiedades del polímero que la compone.

Al haberse producido una sola réplica completa, tampoco se practican pruebas que puedan inutilizarla. La verificación de resistencia se limita al manejo previsto durante la instrucción.

No se desarrolla contenido relativo al mecanismo de disparo, al sistema de percusión ni a ninguna adaptación destinada a proyectar municiones de cualquier tipo, por ser incompatible con la condición de réplica inerte que gobierna el objeto.

El trabajo se desarrolla en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga y en las instalaciones de la ETFA. El período de ejecución oscila entre mayo y septiembre de 2026. La información de la que se parte son los manuales técnicos y la documentación del fusil M4 que la ETFA facilitó por canal institucional, junto con la literatura arbitrada sobre comportamiento mecánico de polímeros procesados por manufactura aditiva, de modo que el nivel de exactitud alcanzable por el prototipo queda condicionado por la tolerancia que esa documentación declare. La referencia poblacional para el dimensionamiento de las superficies de agarre son los alumnos de la ETFA que reciben instrucción con el fusil de dotación.

De esa delimitación se desprende una limitación que el informe asume de manera expresa. Los resultados describen el comportamiento del prototipo efectivamente producido y no permiten estimar la variabilidad entre unidades ni atribuir propiedades al material, porque no se cuenta con equipo de ensayo normalizado y porque la producción se limita a las unidades que el proyecto alcanzó a fabricar.

Capítulo II

Estado del Arte

Lo que se publica sobre fabricación de réplicas inertes son fichas de producto. La búsqueda realizada para este trabajo en bases académicas no devolvió estudios arbitrados sobre cómo se diseñan estos objetos ni sobre con qué se los produce y la información técnica disponible proviene de quienes los venden, es decir, de literatura gris.

Los antecedentes que siguen se seleccionaron por su relación con los dos objetivos específicos, esto es, con el desarrollo del modelo digital y con la construcción del prototipo y sus pruebas, y se ordenan del más reciente al más antiguo. Se recurre a años anteriores solo cuando no existe producción posterior sobre el mismo asunto.

Antecedentes Investigativos

Antecedentes internacionales

Colorado et al. (2023) publicaron una revisión sobre manufactura aditiva en aplicaciones militares y de protección, con autoría de la Universidad de Antioquia y del Instituto Militar de Ingeniería de Brasil, que recorre materiales, tecnologías de procesamiento y limitaciones vigentes de estas técnicas en el sector defensa. Lo que interesa a este objetivo es la limitación que los autores consignan: la reproducibilidad sigue siendo el punto débil reconocido del proceso. Ese señalamiento resuelve una duda de método, porque obliga a que la fabricación deje bitácora de parámetros en lugar de confiar en que la máquina repita el resultado por su cuenta.

Wortmann et al. (2022) revisaron la colada al vacío con moldes de silicona a escala industrial y trataron la precisión dimensional alcanzable, la vida útil del molde, la estructura de costos según el número de unidades y la comparación con la impresión tridimensional y con el moldeo por inyección. Es el antecedente que hace posible comparar el proceso disponible contra la alternativa industrial con criterios declarados en lugar de con adjetivos y el que aporta la variable que decide esa comparación, que es el número de piezas a producir.

Algarni y Ghazali (2021) estudiaron la sensibilidad de las propiedades mecánicas de cuatro materiales de impresión, el ácido poliláctico (de ahora en adelante “PLA”), el acrilonitrilo butadieno estireno (de ahora en adelante “ABS”), la poliéter éter cetona y el tereftalato de polietileno glicol, frente a cuatro parámetros de fabricación: ángulo de trama, altura de capa, porcentaje de relleno y velocidad. Tras la revisión de resultados se mostró que el porcentaje de relleno es el factor más influyente en las propiedades de las piezas, seguido de la altura de la capa.

Rodríguez-Panes et al. (2018) expusieron un resultado familiar al comparar piezas fabricadas con PLA y ABS. En este punto encontraron que el porcentaje de relleno era el de mayor influencia sobre su comportamiento a tracción. Ese dato resuelve algo que la sola resistencia no: cuando la institución vaya a producir unidades adicionales que deban comportarse igual que la primera, la repetibilidad pesa tanto como el valor máximo que una pieza alcanza.

Álvarez et al. (2016) estudiaron la influencia del porcentaje de relleno sobre las propiedades mecánicas de piezas de acrilonitrilo butadieno estireno obtenidas por deposición de material fundido, en un trabajo publicado por la Universidad Nacional de Colombia. Su aporte es de confirmación regional, reporta la misma dirección del efecto que los estudios europeos y asiáticos, lo que hace posible sostener el criterio de fabricación sin depender de una sola tradición de investigación.

Antecedentes institucionales

Fonseca y Miranda (2018) diseñaron e implementaron en la ESPE un prototipo de impresora tridimensional de cinco ejes con el propósito de ahorrar material y mejorar la resistencia mecánica de las piezas fabricadas por deposición de material fundido. Este antecedente es clave puesto a que se desarrolló en la misma sede, también utilizó el mismo proceso principal y atendió una necesidad similar. Al no haber encontrado trabajos locales sobre moldes de silicona con poliuretano ni sobre fabricación de réplicas de entrenamiento,

esta ruta queda como secundaria. Así, este estudio toma la información de pruebas de laboratorio y la aplica en un escenario real: un objeto de forma compleja sujeto a una manipulación constante.

Marco Teórico

Historia de la réplica inerte de instrucción

La primera pregunta que el planteamiento deja abierta es por qué el objeto tiene la forma que tiene. Un prototipo se puede diseñar copiando lo que existe en el mercado, pero entonces se copian también decisiones que nadie explica.

Las réplicas inertes nacieron para entrenar desarmes y contacto sin depender de armas reales. Son bloques sólidos de poliuretano sin mecanismos internos. Su diseño responde a la seguridad: el cuerpo evita que pueda convertirse en un arma funcional y su color la hace reconocible a simple vista.

La ausencia de partes móviles responde a dos razones que apuntan al mismo lado: cada pieza móvil es una pieza que se pierde o se rompe, y es también un punto donde el objeto empieza a parecerse funcionalmente al arma en lugar de parecerse solo por fuera.

La manufactura aditiva agrega además una posibilidad que la colada no ofrece con la misma facilidad: ajustar la masa de cada pieza mediante el porcentaje de relleno, sin cambiar ni el material ni la geometría externa. Ese margen es el que admite acercar el prototipo a la masa declarada del arma en lugar de aceptar la que resulte.

El proceso de deposición de material fundido

La segunda pregunta abierta es de qué depende que una pieza impresa resista. Responderla exige entender cómo se construye, porque el objeto que sale de la máquina no es un sólido homogéneo.

En la deposición de material fundido, un filamento termoplástico se calienta hasta un estado de fluidez suficiente, se extruye por una boquilla y se deposita siguiendo la trayectoria de cada sección transversal del modelo, capa sobre capa, hasta completar el volumen.

Al imprimir en 3D, un conjunto de cordones plásticos se pega mediante calor, esto da como resultado un interior hueco. Los efectos directos son los siguientes: la resistencia varía según el ángulo del esfuerzo (anisotropía) y la calidad de la pieza depende cómo se configuró la máquina.

Colorado et al. (2023) destacan que la impresión 3D es de gran ayuda para fabricar pocas piezas militares complejas. Sin embargo, advierten que la falta de repetibilidad sigue siendo su debilidad. Esta advertencia es la que incita a documentar cada ajuste de impresión; solo así se asegura que la segunda pieza funcione de la misma forma que la primera.

Material y parámetros de fabricación

Saber cuál es el parámetro determinante en la impresión, evita configurar una máquina al azar. La evidencia ubica al porcentaje de relleno como el factor principal en resistencia mecánica (Alvarez et al., 2016 y Rodríguez-Panes et al., 2018), seguido por la altura de capa, desplazando al ángulo de trama y a la velocidad a roles secundarios (Algarni y Ghazali, 2021). Además, se reporta que el ABS entrega resultados más consistentes y menos variables entre piezas que el PLA (Rodríguez-Panes et al., 2018). La tabla 1 enfrenta los tres trabajos y muestra qué aporta cada uno a la decisión de fabricación.

Tabla 1

Aportes de la literatura revisada a la decisión de material y parámetros

Autor y año	**Qué estudia y qué reporta**	**Qué componente de la decisión determina**
Rodríguez-Panes et al. (2018)	Comparación experimental de PLA y ABS a tracción variando altura de capa, relleno y orientación	El valor de relleno de cada pieza y la elección del material.

Autor y año	Qué estudia y qué reporta	Qué componente de la decisión determina
Algarni y Ghazali (2021)	Sistematiza resultados publicados de cuatro materiales y ordena por análisis de varianza la influencia de cuatro parámetros. Ubica el relleno primero y la altura de capa segundo.	El orden en que se fijan los parámetros y cuáles se dejan en un valor de trabajo estable.
Alvarez et al. (2016)	Estudia la influencia del porcentaje de relleno sobre propiedades mecánicas de piezas de ABS obtenidas por deposición de material fundido.	La confirmación regional del criterio, que evita apoyar la decisión en una sola tradición de investigación.

Nota. Elaborado a partir de las fuentes citadas.

Leídos en conjunto, los tres trabajos dicen lo mismo desde ángulos distintos: la resistencia de una pieza impresa se decide sobre todo al fijar cuánto material lleva por dentro, y en segundo lugar al fijar el espesor de cada capa. La elección entre un polímero y otro entra después, y no siempre por resistencia: puede entrar por repetibilidad, cuando lo que interesa es que una unidad futura se parezca a la que ya se produjo. De ahí se desprende el criterio con que se fabrica este prototipo.

Cada pieza recibe un relleno acorde con lo que va a soportar durante la instrucción, la altura de capa se mantiene igual en todo el conjunto para que las piezas sean comparables entre sí y cada una se orienta de modo que el esfuerzo principal previsto no coincida con el plano donde las capas se unen.

Queda un límite que conviene declarar antes de que lo señale la lectura. Los tres estudios trabajan sobre ensayo de tracción con probeta normalizada, y ninguno reporta resistencia al impacto. Este informe, en consecuencia, no formula afirmaciones respaldadas en literatura sobre cómo se comporta el prototipo ante un golpe o una caída, y lo que registre al respecto lo hará como observación propia de una prueba funcional.

La colada de poliuretano en molde de silicona

La cuarta pregunta abierta es si conviene el proceso que la sede tiene o el que la industria emplea. La colada en molde de silicona parte de un modelo maestro, sobre el cual se

fabrica un molde flexible en el que después se vierte la resina. Wortmann et al. (2022) tratan los cuatro aspectos que deciden una fabricación: la precisión dimensional que el proceso alcanza, la cantidad de piezas que un molde soporta antes de degradarse, cómo se reparte el costo según el número de unidades y cómo se ubica frente a la impresión tridimensional y al moldeo por inyección. La tabla 2 organiza esa comparación aplicada a los dos procesos considerados aquí.

Tabla 2

Criterios de comparación entre los dos procesos de fabricación considerados

Criterio	**Deposición de material fundido**	**Colada de poliuretano en molde de silicona**
Costo previo a la primera pieza	No requiere utillaje. El equipo ya está instalado en la sede.	Requiere fabricar el modelo maestro y el molde antes de producir la primera unidad (Wortmann et al., 2022).
Comportamiento del costo por unidad	Se mantiene aproximadamente constante. Cada pieza consume tiempo de máquina y material.	Disminuye al repartir el molde entre más piezas, hasta el límite de su vida útil (Wortmann et al., 2022).
Homogeneidad de la pieza	Pieza no homogénea, con dirección preferente de debilidad asociada a la orientación de las capas (Rodríguez-Panes et al., 2018).	Pieza maciza y homogénea, sin dirección preferente de debilidad.
Control de la masa	La masa se ajusta mediante el porcentaje y el patrón de relleno, sin cambiar la geometría externa.	La masa queda determinada por la densidad de la resina y el volumen de la pieza.
Costo de modificar el diseño	La corrección se aplica sobre el modelo digital y se vuelve a imprimir.	La corrección obliga a rehacer el modelo maestro y el molde.
Disponibilidad en la sede	Disponible, con antecedente de uso e investigación propia (Fonseca y Miranda, 2018).	No se cuenta con los insumos ni el equipamiento.

La elección depende de la flexibilidad y el costo. Cuando se producen pocas piezas hay que considerar que el diseño pude sufrir cambios; los moldes tradicionales exigen un gasto

previo que podrá perderse en el caso de que existan ajustes. La impresión 3D, en cambio, brinda la posibilidad de corregir el modelo digital e imprimir la versión actualizada de inmediato.

El relleno admite acercar la pieza a la masa que se busca sin tocar su forma y la colada no ofrece ese margen. Por ambas razones el prototipo se fabrica por deposición de material fundido y la colada queda documentada como la alternativa que correspondería si en el futuro la institución decidiera producir un número mayor de unidades sobre un diseño ya estabilizado.

El paquete de diseño digital

El primer objetivo específico compromete modelos y planos digitales. Un modelo, sin embargo, puede entregarse de maneras muy distintas y de esa forma depende que la institución pueda usarlo después o quede con un archivo que solo abre quien lo hizo.

El modelo se construye de forma paramétrica, es decir, conservando el historial de operaciones y las cotas que las gobiernan. La diferencia es práctica: en un modelo paramétrico una corrección de dimensión se introduce en la cota y se propaga a la pieza, al ensamblaje y a los planos, mientras que en una malla cerrada la misma corrección obliga a rehacer la geometría. A ese archivo nativo se suma la exportación a formatos de intercambio, que son los que permiten abrir el modelo en otro programa o enviarlo a fabricar sin depender del software con que fue creado.

La documentación que acompaña al modelo consta de tres piezas. Los planos de detalle, uno por componente, con las vistas normalizadas, las cotas y las tolerancias que cada uno admite. Los planos de conjunto con la vista explosionada, que muestran cómo se arma el objeto y en qué orden.

Finalmente, la lista de materiales, que consigna para cada componente su cantidad, su material y su especificación de fabricación. Con esas tres piezas, una persona que no participó del diseño puede reproducir el prototipo, y esa es exactamente la prueba a la que debe someterse un paquete de diseño para considerarse completo.

Construcción del protocolo de pruebas básicas

El segundo objetivo específico compromete pruebas básicas de ensamblaje, resistencia y manipulación. El término “básicas” tiene ya delimitado su estudio que radica en medir el desempeño práctico de la pieza terminada, en ningún momento se abarca las propiedades del material.

Las tres operaciones abordan preguntas distintas sobre el prototipo; el ensamblaje en específico comprueba la tolerancia dimensional y la durabilidad del ajuste tras un par de sesiones o repeticiones; la resistencia pregunta si el objeto conserva su integridad ante las condiciones del uso previsto; y, la manipulación pregunta si el objeto se comporta en la mano como se espera que se comporte. La tabla 3 presenta la estructura resultante.

Tabla 3

Estructura del protocolo de pruebas básicas del prototipo

Prueba	**Qué verifica**	**Qué se registra**	**Fundamento**
Ensamblaje	Que las piezas se unan y se separen sin herramienta ni fuerza excesiva, y que sigan haciéndolo tras repetirlo.	Número de repeticiones realizadas y estado de las interfaces al inicio y al final.	Operación nombrada en el objetivo específico.
Resistencia	Que la pieza conserve su integridad ante el manejo previsto durante la instrucción.	Observación del estado de la pieza y registro fotográfico antes y después.	Anisotropía del proceso y orientación de impresión (Rodríguez-Panes et al., 2018).
Manipulación	Que la masa y las superficies de agarre correspondan a lo declarado como requerimiento.	Masa del prototipo y dimensiones de las superficies de agarre.	Requerimiento dimensional y de masa del que parte el diseño.
Registro común	Que el resultado pueda atribuirse a una configuración concreta de fabricación.	Material, porcentaje de relleno, altura de capa y orientación con que se produjo la pieza.	Limitación de reproducibilidad del proceso (Colorado et al., 2023).

Nota. Las pruebas son verificaciones funcionales sobre la pieza terminada y no ensayos normalizados de caracterización de material.

De manera muy sencilla, el protocolo responde cuatro preguntas sobre el prototipo: si se puede armar y desarmar las veces que sea necesario, si resiste el uso previsto, si alcanza el peso correcto y con qué configuración exacta de fabricación se obtuvo ese resultado.

La seguridad del prototipo resuelta por geometría

La seguridad del prototipo está en su propia forma gracias a cuatro decisiones de diseño. Las zonas que alojan el mecanismo o la munición son, sin acceso externo. De este modo se elimina cualquier cavidad útil. Además, las uniones de la réplica se cambiaron para que no encajen con las del arma real, evitando que se puedan adaptar partes funcionales. El color de seguridad se define desde el filamento y no con pintura; así el roce del uso diario no lo borra.

Los términos que este informe emplea con sentido técnico quedan definidos a continuación.

Réplica inerte: pieza fabricada en material no metálico que reproduce la forma externa y la masa de un arma determinada, sin ningún componente del ciclo de fuego, sin cavidad que admita munición y sin posibilidad de conversión, destinada a la práctica de manipulación y ensamblaje bajo control institucional.

Manufactura aditiva por deposición de material fundido: proceso de fabricación en el que un filamento termoplástico se extruye fundido y se deposita capa sobre capa hasta completar el volumen de la pieza, que queda formada por cordones unidos entre sí por adhesión térmica.

Porcentaje de relleno: proporción de material que ocupa el interior de la pieza respecto de su volumen total. Es el parámetro de mayor influencia sobre las propiedades mecánicas del resultado (Rodríguez-Panes et al., 2018; Algarni y Ghazali, 2021).

Altura de capa: espesor de cada una de las capas depositadas. Alturas mayores reducen el tiempo de fabricación y comprometen la unión entre capas (Algarni y Ghazali, 2021).

Orientación de impresión: posición en que la pieza se dispone sobre la plataforma de fabricación, que determina en qué dirección quedan los planos de unión entre capas.

Anisotropía: propiedad de un material o de una pieza cuyo comportamiento mecánico difiere según la dirección en que se aplique la carga. En las piezas obtenidas por deposición de material fundido proviene de la unión entre capas.

Colada al vacío en molde de silicona: proceso de fabricación en el que se vierte resina en un molde flexible obtenido a partir de un modelo maestro, en cámara de vacío para evitar la inclusión de aire (Wortmann et al., 2022).

Modelo paramétrico: Modelo 3D que es editable; un solo cambio en una medida actualiza automáticamente todo el ejemplar junto con sus componentes

Lista de materiales: documento que detalla las cantidades exactas junto con las especificaciones técnicas para una posterior fabricación.

Prueba funcional: evaluación que mide si el objeto armado resiste el uso real militar.

Probeta normalizada: pieza con forma y tamaño estandarizados por norma, se diseña únicamente para evaluar la resistencia de un material.

Marco Legal

El cuerpo normativo que rige la materia en el Ecuador es la Ley de Armas, Municiones, Explosivos y Materiales Relacionados, publicada en el Cuarto Suplemento del Registro Oficial 680, de 11 de noviembre de 2024. Para entender el alcance de esta ley, vale la pena mirar cómo se va armando desde sus primeros pasos. En el artículo 1 se define el objetivo principal, hay que seguir de cerca todo el camino que recorren las armas, municiones, explosivos y materiales afines. Existe la tarea de vigilar cada etapa: la fabricación, la importación, la venta, el transporte, el almacenamiento, el rastreo paso a paso y la disposición final; considerar los permisos para la tenencia y el porte.

En el artículo 6, la ley abre el panorama y detalla exactamente qué elementos están bajo su control. Incluye desde el equipo de uso exclusivo de las Fuerzas Armadas hasta armas de fuego, neumáticas y eléctricas; se incluyen armas de destrucción masiva. También cubre los insumos del día a día como municiones y explosivos, materiales de uso civil, sustancias químicas o biológicas controladas. Por último, los propios lugares donde se producen o se guardan estos materiales. La idea de fondo es construir un marco completo que no deje vacíos en ningún punto de la cadena.

El artículo 5 define arma de fuego como el arma portátil dotada de cañón que lanza un proyectil, está concebida para expulsarlo o puede transformarse fácilmente para hacerlo por la acción de un explosivo. Ninguno de esos elementos concurre en el objeto de este trabajo, que carece de cañón funcional, de mecanismo de disparo y de todo componente del ciclo de fuego.

El mismo artículo define arma réplica exigiendo que concurran dos condiciones: que el objeto esté diseñado o pueda transformarse fácilmente para realizar disparos, y que al momento de su fabricación falsifique marcas industrialmente conocidas. El prototipo no cumple ninguna de las dos. El objeto no se puede adaptar al mecanismo de disparo, cuenta con un interior hueco y sellado, en él no descansan piezas móviles ni munición, su uso queda restringido a las instalaciones de la ETFA.

La clasificación formal de este objeto corresponde al Ente Rector de la Defensa Nacional. Es así que, el título legal definitivo se consultará con dicha autoridad antes de producir unidades adicionales.

En el plano académico, el trabajo se desarrolla dentro de la modalidad de trabajo de integración curricular prevista en la normativa interna de titulación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en el marco de la Ley Orgánica de Educación Superior, y bajo el convenio con la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea en calidad de entidad coparticipante.

Capítulo III

Metodología

Este capítulo describe cómo se produjo el prototipo y cómo se verificó lo que produjo. Declara el enfoque, el tipo y el diseño con los que el trabajo se comprometió, sobre qué recae el estudio, con qué instrumentos se registra, en qué orden se ejecutaron las fases y qué tratamiento reciben los datos obtenidos.

Fabricar deja rastro. Un archivo, un plano, una configuración de máquina, un consumo de material y una pieza. La tarea de este capítulo consiste en fijar qué parte de ese rastro se conserva como dato y bajo qué regla.

Enfoque de la Investigación

El enfoque es cualitativo. Todo este proceso fue llevado a cabo con base en la literatura científica disponible, no se realizaron ensayos previos en ningún laboratorio. Por ello, el aporte radica en la fundamentación de cada decisión y entrega la posibilidad de replicar un procedimiento.

Toda la parte interpretativa surge al leer esos datos. Por ejemplo, el consumo de filamento simplemente brinda un número de peso o masa, pero entender por qué el material terminó distribuido de esa forma requiere acudir una vez más a los criterios de fabricación que se definió antes de la orden de impresión.

Tipo de Investigación

El alcance es descriptivo, detalla las propiedades del prototipo obtenido, así como las características del procedimiento que lo produjo. El trabajo registra y especifica los parámetros del objeto y su proceso de fabricación.

De la misma manera, es de alcance aplicado porque no busca crear nueva teoría sobre materiales, sino usar información existente para resolver una necesidad concreta. No se estudia el ácido poliláctico en abstracto, se toman datos conocidos para fabricar una pieza real para la Escuela.

No se incorpora fase exploratoria. El objeto a producir viene delimitado desde el enunciado del objetivo general.

Diseño de la Investigación

El diseño es no experimental y de corte transeccional. Fabricar no equivale a experimentar, no se manipula una variable independiente para observar su efecto sobre otra, no se conforman grupos de comparación y no se producen configuraciones alternativas de la misma pieza para enfrentarlas entre sí. Se fijó una configuración para el conjunto y se verificó cómo se comportó la pieza resultante.

Es transeccional porque los registros sobre el prototipo se toman en un momento único, sin seguimiento del objeto a lo largo del tiempo. Las repeticiones que contempla el protocolo de verificación se ejecutan dentro de esa misma sesión. La tabla 4 muestra cómo cada elemento declarado se materializa en el procedimiento.

Tabla 4

Correspondencia entre la metodología declarada y su aplicación

Elemento	Declaración	Cómo se materializa
Enfoque	Cualitativo	La literatura decide material y parámetros; los registros sobre la pieza verifican lo que la literatura permitió anticipar.
Alcance	Descriptivo	Documenta el prototipo y el proceso de fabricación
Finalidad	Aplicada	Solventa una duda concreta del cuerpo militar.
Diseño	No experimental	Analiza solo una configuración por conjunto.
Corte	Transeccional	Registra las mediciones en un momento único del proceso.
Unidad de análisis	El prototipo producido	Los datos provienen únicamente de las unidades físicas fabricadas.

Objeto de Estudio y Unidad de Análisis

El objeto de estudio es el prototipo de réplica inerte del fusil M4 producido dentro de este trabajo. La unidad de análisis son las piezas que integran el conjunto junto con el procedimiento que las produjo.

El conjunto se resolvió en un programa de diseño asistido por computadora y quedó documentado mediante un plano explosionado con su lista de piezas (Ver Anexo A). Ese plano fija la composición del prototipo en doce elementos. Esa es la referencia que este informe emplea cuando menciona el número de piezas. La tabla 5 los presenta.

Tabla 5

Composición del conjunto según el plano explosionado

Elemento	Pieza	Cantidad	Función en la instrucción
1	Cuerpo	1	Estructura principal y punto de referencia del conjunto
2	Guardamanos derecho	1	Superficie de agarre de la mano de apoyo
3	Guardamanos izquierdo	1	Superficie de agarre de la mano de apoyo
4	Culata	1	Apoyo de hombro y ajuste a la talla del usuario
5	Cargador	1	Ejercicio de colocación y retiro
6	Gatillo	1	Elemento de referencia, sin función de accionamiento
7	Rack	1	Riel superior de montaje
8	Side	1	Elemento lateral del cuerpo
9	Indicador de estado	1	Señalización visible de la condición del objeto
10	Tapa	1	Cierre del cuerpo
11	Pin	1	Elemento de sujeción entre conjuntos
12	Back	1	Elemento posterior del cuerpo

Nota. Nombres según el plano explosionado.

Ninguna de las doce partes tiene capacidad de disparo ni compone el sistema de tiro. La cola del disparador funciona como guía de posición para el dedo y en el cargador no es posible alojar cartuchos.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Existen tres formas de recoger datos en este trabajo. En primer punto, se revisan documentos para elegir los materiales y los ajustes de impresión. Después se lleva un registro de fabricación para controlar cómo se hace cada pieza. Finalmente, se aplica una observación detallada para revisar que el prototipo terminado funcione como debe.

Aquellas fuentes documentales abarcan literatura arbitrada sobre polímeros en manufactura aditiva, procesos de moldeo, la documentación técnica del arma proveída por la Escuela y la normativa nacional.

El registro de fabricación proviene directamente del software de laminado, el cual reporta el material, la altura de capa, el patrón y porcentaje de relleno, la orientación en la plataforma, el consumo de filamento y el tiempo estimado (Ver Anexo B).

La observación estructurada utiliza la ficha del protocolo de pruebas básicas. Este instrumento evalúa el ensamblaje, la manipulación y la resistencia al uso previsto. Cada resultado es vinculado a la configuración de producción de la pieza.

Procedimiento de la Investigación

El trabajo se ejecutó en cinco fases. La tabla 6 las presenta en orden con su producto.

Tabla 6

Fases del procedimiento de diseño y fabricación

Fase	Qué se hace	Producto
Requerimiento	Se toman los parámetros dimensionales del arma de la documentación técnica facilitada por la Escuela.	Lista de dimensiones de referencia
Modelado	Se resuelve el conjunto en el programa de diseño asistido	Archivo de ensamblaje, archivos de pieza y exportación a formato de intercambio

Fase	Qué se hace	Producto
	por computadora, con sus piezas y su ensamblaje.	
Documentación	Se genera el plano explosionado con la lista de piezas y sus cantidades.	Plano explosionado y lista de materiales
Fabricación	Se prepara el laminado con la configuración adoptada y se imprime el conjunto.	Piezas impresas, captura de la configuración y registro de consumo
Verificación	Se aplica el protocolo de pruebas básicas sobre el prototipo terminado.	Ficha del protocolo llena y registro fotográfico

La configuración de fabricación quedó fijada antes de imprimir y se conserva sin cambios para todas las piezas del conjunto. La tabla 7 la presenta.

Tabla 7

Configuración de fabricación empleada

Parámetro	Valor adoptado	Fundamento de la decisión
Proceso	Deposición de material fundido.	Comparación de procesos del capítulo anterior.
Material	Ácido poliláctico (PLA).	Disponibilidad y comportamiento documentado en la literatura revisada.
Diámetro de boquilla	0,4 mm.	Configuración estándar del equipo empleado.
Altura de capa	0,2 mm.	Segundo parámetro de mayor influencia según Algarni y Ghazali (2021).
Porcentaje de relleno	12 %	Valor adoptado en la producción del prototipo.
Patrón de relleno	Rectilíneo.	Patrón predeterminado del programa de laminado.
Soportes	Empleados en las piezas que lo requieren.	Geometría con voladizos que exige apoyo durante la construcción.

Nota. Valores tomados de la captura del programa de laminado empleado en la producción del prototipo.

Un parámetro de esa tabla merece explicación aparte. El porcentaje de relleno del doce por ciento se ubica por debajo de lo que la literatura revisada asocia con mayor resistencia a tracción. Rodríguez-Panes et al. (2018) reportan el relleno como el parámetro de mayor influencia sobre el comportamiento mecánico. Algarni y Ghazali (2021) confirman ese primer lugar sobre un conjunto mayor de materiales. El valor adoptado responde a la configuración con que el prototipo se produjo. Su efecto sobre la masa del conjunto se analiza en el capítulo siguiente.

Registrar ese dato con su fundamento declarado hace posible que una futura unidad se produzca con otra configuración y que la diferencia sea atribuible. Sin ese registro, la comparación entre dos prototipos no tendría contra qué explicarse.

Figura 1

Equipo de deposición de material fundido empleado en la fabricación



Nota. Impresora de deposición de material fundido con la cámara cerrada y detalle del cabezal extrusor sobre la plataforma de fabricación.

Técnicas de Análisis de Datos

Los datos se organizan en tres bloques que corresponden a las tres condiciones que el objetivo general nombra.

La similitud se analiza comparando las dimensiones externas del prototipo contra los valores declarados en la documentación técnica del arma. La comparación se expresa en milímetros y en porcentaje de desviación, parámetro por parámetro.

La resistencia mide el desempaño práctico de la pieza bajo una manipulación recurrente, no se consideran pruebas de caracterización mecánica.

La seguridad verifica visualmente en la pieza mediante cuatro factores clave: volumen macizo, imposibilidad de acople funcional, color de visibilidad en el plástico y marca grabada de instrucción.

La masa se obtiene del consumo del laminador y se contrasta contra la masa del objeto real. Existirá una brecha en gramos y porcentaje que determine el nivel de fidelidad en la sensación de manejo.

Todo lo referente al procesamiento de datos reposa en una hoja de cálculo y sirve como soporte para presentar los resultados.

Consideraciones de Seguridad

El prototipo carece de mecanismo de disparo, de componentes del ciclo de fuego y de cavidad capaz de alojar munición. Ninguna fase del procedimiento contempló la fabricación de piezas de esa naturaleza.

Las pruebas de verificación se practican dentro de las instalaciones autorizadas, sin munición y sin ejercicios que involucren accionamiento de mecanismo alguno.

El objeto lleva marcado de identificación formado durante la fabricación junto con color de identificación en el propio material, condiciones que hacen posible distinguirlo del arma sin necesidad de manipularlo.

La clasificación que la autoridad competente asigne a este tipo de objeto se consulta antes de producir unidades adicionales. Así se consigna.

Criterios de Rigor y Limitaciones

El rigor descansa en la trazabilidad. Cada decisión de fabricación queda registrada con su fundamento. Cada valor que aparece en el capítulo de resultados indica de dónde se obtuvo. La captura del programa de laminado, el plano explosionado y los archivos del modelo se conservan como respaldo.

La consistencia se resuelve por procedimiento escrito. El protocolo de pruebas se redactó antes de aplicarlo, con lo que ningún resultado pudo acomodar el criterio con el que se lo lee.

El trabajo asume cuatro limitaciones. La primera corresponde al número de unidades. Los resultados describen el prototipo efectivamente producido, sin permitir estimar la variabilidad entre unidades sucesivas de la misma configuración.

La segunda limitación sostiene que el alcance de las pruebas tiene enfoca en el desempeño funcional del conjunto; si se quisiese analizar las propiedades mecánicas del plástico, sería necesario contar con probetas estandarizadas y maquinaria de laboratorio que, por el momento, no se encuentra disponible.

La tercera limitación es la obtención de la masa, este dato no se mide, lo calcula el sistema según el filamento que se use. Si hay balanza disponible se comprueba el peso; si no, se deja una estimación.

La cuarta corresponde al alcance de la comparación. Las dimensiones del arma provienen de la documentación técnica facilitada por la Escuela, que declara variaciones dentro de la línea de la plataforma. La comparación se practica contra los valores de esa fuente, con la advertencia que la propia fuente incorpora.

Capítulo IV

Resultados

Este capítulo presenta lo que produjo el trabajo. El resultado tiene dos partes que se sostienen entre sí: el prototipo fabricado y el registro de cómo se lo produjo. Se expone en el orden en que las fases se ejecutaron, esto es, el paquete de diseño digital, la fabricación con su configuración y su consumo, la comparación del objeto obtenido contra los valores de la documentación técnica, la simulación de una configuración alternativa y la verificación de las condiciones de seguridad. El capítulo cierra declarando qué parte del protocolo de verificación quedó sin ejecutar.

Resultado del Diseño Digital

El primer objetivo específico comprometía modelos y planos digitales de las réplicas inertes mediante software de diseño asistido por computadora. El conjunto se resolvió en SolidWorks y quedó documentado en los productos que presenta la tabla 8.

Tabla 8

Paquete de diseño digital entregado

Producto	Formato	Para qué sirve
Ensamblaje del conjunto	Archivo nativo de SolidWorks	Conserva la relación entre las doce piezas y permite modificar el conjunto por cotas
Piezas individuales	Archivos nativos de SolidWorks	Permiten corregir una pieza sin rehacer el conjunto
Exportación del ensamblaje	Formato de intercambio STEP	Abre el modelo en otro programa sin depender del software que lo creó
Plano explosionado	Documento en formato portátil	Muestra el orden de armado y fija la composición en doce elementos

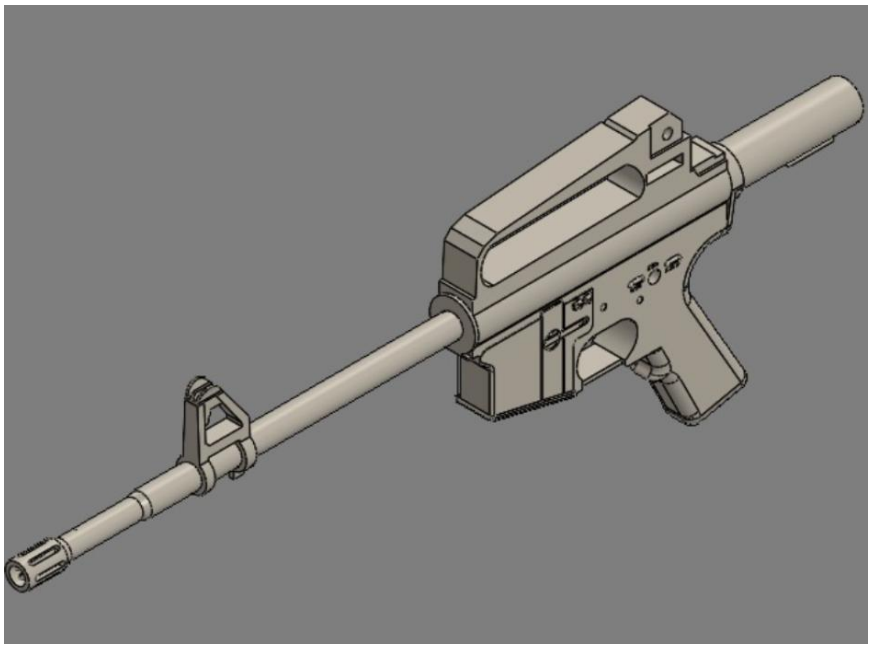
Producto	Formato	Para qué sirve
Lista de piezas	Incluida en el plano explosionado	Consigna la denominación y la cantidad de cada elemento

Nota. A partir de los archivos entregados por el equipo de diseño.

La exportación al formato de intercambio merece una nota. Un archivo nativo se abre únicamente en el programa que lo creó, mientras que el formato de intercambio se abre en cualquier programa de diseño. Conservar ambos deja a la Escuela con un modelo que puede modificar y con uno que puede enviar a fabricar sin depender de una licencia particular.

Figura 2

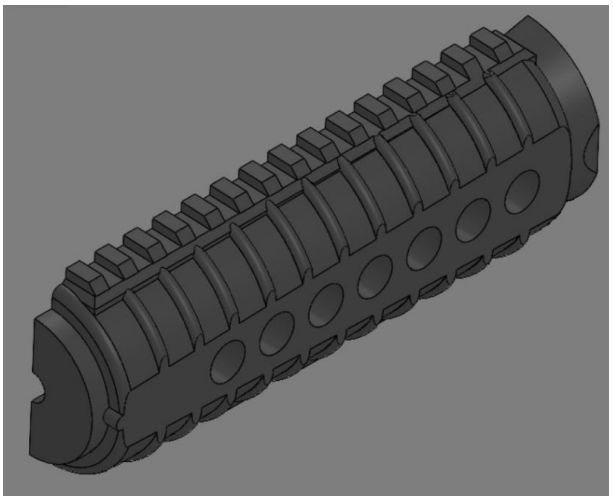
Modelo digital del conjunto de la réplica inerte



Nota. Conjunto de doce piezas resuelto en programa de diseño asistido por computadora, en vista isométrica y sin guardamanos montado

Figura 3

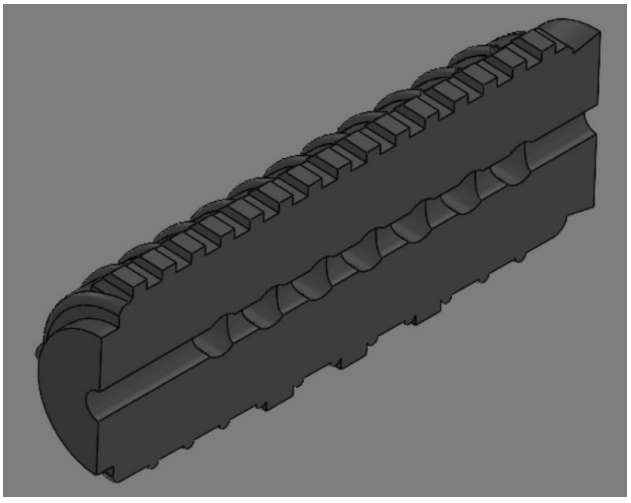
Guardamanos modelado en vista exterior



Nota. Vista exterior de la pieza de guardamanos, se aprecia el nervado de refuerzo y la geometría de acople.

Figura 4

Guardamanos modelado en vista interior



Nota. Vista interior de la pieza de guardamanos, se aprecia el nervado de refuerzo y la geometría de acople.

El plano explosionado consigna material y peso como no especificados. Ese dato tiene una consecuencia práctica: al no haberse asignado material al modelo, el programa de diseño no calcula masa ni centro de gravedad. La masa del prototipo se obtuvo entonces del consumo de filamento que informa el programa de laminado, según se detalla en el apartado siguiente.

Resultado de la Fabricación

Las doce piezas se produjeron por deposición de material fundido con una configuración única, mantenida sin cambios para todo el conjunto. El equipo empleado fue una impresora Creality K1 Max con boquilla de 0,4 milímetros. El material, ácido poliláctico de la marca Sunlu. La altura de capa se fijó en 0,2 milímetros, igual en la primera capa. El relleno se configuró al doce por ciento con patrón rectilíneo. Las piezas con voladizos se imprimieron con soportes. El material empleado se examina primero de manera más detallada, antes de presentar el consumo que registró el programa de laminado.

Si se compara el PLA con el ABS (los dos plásticos más usados en impresión 3D), existen diferencias muy marcadas que no dependen de folletos de fabricante. El PLA es más rígido, lo que evita que las piezas largas como el cuerpo del fusil se curven al agarrarlas o sostener su propio peso. De la misma forma, el PLA cambia mucho de peso y resistencia según qué tan lleno esté por dentro; mientras que el ABS casi no cambia, dos piezas de PLA con rellenos distintos se comportan de forma completamente diferente.

El PLA resultó ser la opción ideal para este proyecto en lugar de buscar un plástico resistente a golpes. La rigidez ayuda a que el cuerpo no se doble, y esa sensibilidad al relleno interno permitió ajustar el peso final de la pieza para acercarlo lo más posible al del arma real.

Tabla 9

Comparación entre el ácido poliláctico y el acrilonitrilo butadieno estireno en piezas impresas por deposición de material fundido

Criterio	Ácido poliláctico	Acrilonitrilo butadieno estireno
Rigidez de la pieza	Mayor. Se dobla menos bajo su propio peso.	Menor. Se flexiona con más facilidad.
Efecto del relleno	Su firmeza y peso cambian por completo según qué tan llena esté la pieza por dentro.	Su comportamiento casi no cambia, aunque varíe la cantidad de relleno interno.

Nota. Datos tomados de Rodríguez-Panes et al. (2018).

Estos factores guiaron la elección, pues la rigidez le da firmeza al agarre para evitar flexiones y el control del relleno permitió calibrar el peso de la réplica hasta igualar el del arma real.

Esa elección tiene un costo claro porque el material se deforma con calor moderado y cuesta más lijarlo. Ninguna de esas pegas afecta a una réplica que estará bajo techo y no necesita un acabado perfecto, ya que elegir un material no es buscar uno perfecto, sino aceptar fallas en lo que no importa para el uso que se le va a dar. La tabla 9 presenta, a continuación, el consumo de material que esa configuración produjo pieza por pieza.

Tabla 10

Consumo estimado de material por pieza

Pieza	Masa estimada (g)	Proporción del conjunto
Cuerpo	374,46	53,5 %
Culata	88,44	12,6%
Guardamanos derecho	76,64	11,0 %
Guardamanos izquierdo	74,31	10,6 %

Pieza	Masa estimada (g)	Proporción del conjunto
Cuerpo	374,46	53,5 %
Culata	88,44	12,6%
Cargador	67,74	9,7 %
Rack	7,36	1,1 %
Side, indicador de estado, tapa, pin, back y gatillo	10,97	1,6 %
Total del conjunto	699,92	100 %

Nota. A partir del reporte del programa de laminado (ver Anexo C).

El cuerpo abarca más de la mitad de la masa del conjunto al integrar la empuñadura y los cajones de mecanismos, siendo la sección determinante para ajustar el peso total. El proceso de impresión requirió 23 horas y 15 minutos, se consumió 242,48 metros de filamento (incluidos soportes) con un costo de material de 14,46 unidades monetarias según los cálculos del programa.

Figura 5

Prototipo fabricado y ensamblado



Nota. Conjunto ensamblado tras la fabricación, con la culata retráctil, el proveedor y el guardamonte montados sobre el cajón.

Similitud Dimensional y de Masa

La tercera condición que el objetivo general nombra es la similitud con el arma original. La tabla 10 compara el prototipo obtenido contra los valores que declara la documentación técnica facilitada por la Escuela.

Tabla 11

Comparación entre el prototipo y los valores declarados por la documentación técnica

Parámetro	Prototipo	Documentación	Diferencia
Longitud con culata extendida	860 mm	997 mm de longitud total	137 mm
Altura sin mira	180 mm	Sin valor declarado	No comparable
Altura con mira	250 mm	Sin valor declarado	No comparable
Ancho en guardamanos	70 mm	Sin valor declarado	No comparable
Ancho en tapa de mecanismos	25 mm	Sin valor declarado	No comparable
Masa del conjunto sin cargador	632,18 g	2.720 g	2.087,82 g
Masa del conjunto con cargador	699,92 g	No comparable	No comparable
Longitud con culata retraída	780 mm	Sin desglose por posición	No comparable

Nota. La masa del prototipo sin cargador se obtiene descontando los 67,74 gramos del cargador al total del conjunto.

La masa del arma corresponde al valor declarado sin cargador. La comparación arroja un resultado que conviene enunciar sin rodeos: el prototipo alcanza el 23 por ciento de la masa del arma. Le faltan poco más de dos kilogramos.

Ese hallazgo confirma en la práctica lo que la literatura advertía. García et al. (2021) documentaron que un medio de entrenamiento más ligero que el arma real reduce el realismo y

la inmersión que percibe el personal militar. El prototipo obtenido queda muy por debajo del valor de referencia, con lo que la diferencia de masa pasa a ser la principal desviación del trabajo respecto de su propio requerimiento.

La causa está identificada. El arma combina aluminio forjado en sus cajones con acero en el cañón, mientras que el prototipo se fabricó en un polímero cuya densidad se ubica muy por debajo de esas aleaciones. A esa diferencia de material se suma el relleno del doce por ciento, que deja el interior de cada pieza mayormente hueco.

La comparación de longitud requiere una precaución. La documentación declara 997 milímetros de longitud total junto a un cañón de 14,5 pulgadas para el mismo modelo, cifras que no corresponden a una misma configuración. El propio documento advierte que dentro de la línea existen variaciones de cañón y de culata. La diferencia de 137 milímetros se registra entonces como pendiente de verificación sobre la unidad de dotación, antes de tratarla como una desviación del prototipo.

Las cuatro dimensiones restantes carecen de valor declarado en la documentación, así que el prototipo aporta esos datos sin poder contrastarlos.

Simulación de una Configuración Alternativa

Frente a la diferencia de masa detectada, se ejecutó una simulación en el programa de laminado con el mismo modelo y un relleno del cuarenta por ciento, sin producir la pieza. La tabla 11 compara ambas configuraciones.

Tabla 12

Comparación entre las dos configuraciones de relleno simuladas

Indicador	Relleno 12 %	Relleno 40 %	Variación
Masa del conjunto	699,92 g	1.010 g	+310 g
Filamento de soporte	175,67 g	61,42 g	−114,25 g
Tiempo de fabricación	23 h 15 min	29 h 49 min	+6 h 34 min

Indicador	Relleno 12 %	Relleno 40 %	Variación
Costo de material	14,46	21,43	+48 %
Proporción de la masa del arma	25,7 %	37,1 %	+11,4 puntos

Nota. A partir de los reportes del programa de laminado. Ambos valores de masa corresponden a estimaciones del mismo programa bajo configuraciones distintas, con lo que la comparación es indicativa.

Triplicar el relleno agrega 310 gramos al conjunto, un 44 por ciento más de masa, a cambio de seis horas y media adicionales de fabricación. Aun con ese aumento, el prototipo permanece en el 37 por ciento de la masa del arma.

De los dos puntos disponibles se desprende una estimación de orden. El incremento observado equivale a unos once gramos por cada punto porcentual de relleno, con lo que alcanzar los 2.720 gramos exigiría un relleno muy superior al máximo que el proceso admite.

La limitación responde a patrones físicos pues el polímero pesa casi la mitad que el aluminio y mucho menos que el acero. No hay ajuste de relleno que pueda igualar el peso del arma. Es así que, para lograrlo se requiere una mayor densidad mediante insertos pesados en la pieza, zonas totalmente macizas o un material distinto.

Ese resultado tiene valor propio. Convierte una recomendación general en un dato con cifra. Ubica además el problema donde corresponde resolverlo, que es la fase de diseño del modelo antes que la configuración de la máquina.

Verificación de las Condiciones de Seguridad

El capítulo anterior estableció cuatro decisiones que trasladan la condición inerte del objeto a su propia geometría. El registro fotográfico del prototipo armado permite verificar dos de ellas y deja las otras dos pendientes de inspección directa (ver Anexo D).

Sobre el color se confirma lo que el capítulo anterior ya había declarado. El prototipo se produjo con el filamento disponible al momento de fabricar, con el cuerpo y el cargador en tono

claro; el guardamano; y, la culata en negro. El criterio de color de identificación en el propio material se mantiene para las unidades que se destinen a la instrucción.

Sobre el marcado se verifica que las leyendas del selector quedaron formadas en el propio material durante la fabricación, sin aplicarse después.

Para comprobar la ausencia de cavidades y la incompatibilidad de encajes solo se requiere desmontar la pieza y realizar una inspección visual directa. El registro fotográfico disponible muestra el conjunto armado, así que ninguna de las dos condiciones puede confirmarse por esa vía. Ambas quedan pendientes.

Alcance de las Pruebas Básicas

El segundo objetivo específico comprometía la construcción de los prototipos junto con pruebas básicas de ensamblaje, resistencia y manipulación. La construcción se cumplió y sus resultados constan en los apartados anteriores. Las pruebas no se ejecutaron dentro del período del proyecto.

El protocolo quedó definido en el capítulo anterior con sus cuatro registros, sus criterios y su fundamento. La ausencia corresponde entonces a la aplicación y no al instrumento. Cualquier persona con acceso al prototipo puede ejecutarlo con lo que el informe entrega, sin requerir formación previa ni equipo de laboratorio.

Tres consecuencias se siguen de esa ausencia y se declaran de forma expresa. La resistencia del conjunto al manejo repetido no cuenta con verificación empírica, con lo que las afirmaciones sobre durabilidad se apoyan únicamente en la literatura revisada. El comportamiento de las uniones tras ciclos sucesivos de armado y desarmado permanece sin registrar. Y la masa del prototipo corresponde a la estimación del programa de laminado, sin confirmación por pesaje directo.

Ninguna de las tres afecta a los resultados que este capítulo presenta, ya que todos provienen del diseño y de la fabricación. Las tres delimitan qué queda por establecer sobre el objeto en uso.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se modeló la réplica inerte en CAD y se entregó un paquete digital completo: ensamblaje, archivos individuales de las doce piezas, formatos de intercambio y el plano explosionado detallado. Con este material, la Escuela puede modificar el diseño, fabricar repuestos específicos y procesar los archivos en distintas plataformas.

Asimismo, se fabricó el prototipo por deposición de material fundido (FDM), manteniendo un registro documentado de la configuración de cada pieza. La fabricación completa consumió 699,92 gramos de ácido poliláctico en 23 horas con 15 minutos de tiempo de máquina. Cada valor del capítulo anterior puede atribuirse a esa configuración, con lo que una unidad futura producida con parámetros distintos admite comparación.

El resultado más importante fue descubrir que el peso de la réplica queda corto frente al arma real. El prototipo alcanzó apenas una cuarta parte del peso original. Al probar en la computadora si se lograba un modelo más denso con más plástico, el peso apenas llegó a la tercera parte, lo que demuestra que el problema no es de la impresora ni de los ajustes, sino del plástico mismo y del diseño interno.

En cuanto a la seguridad, la réplica cumple con los colores de entrenamiento y no tiene espacios donde se pueda meter munición ni disparar. Las pruebas físicas de golpes, armado y uso no se hicieron a tiempo por falta de calendario, pero los pasos para probarlas quedaron totalmente redactados para que la Escuela las aplique cuando lo necesite.

Recomendaciones

A la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea, brindar el mantenimiento adecuado a sus impresoras 3D. El equipo está fuera de servicio, para el desarrollo de este trabajo se tuvo que fabricar el prototipo en un local externo. Tener estas máquinas operativas reducirá los costos y los tiempos de entrega en las siguientes fases del proyecto.

A la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea, aplicar el protocolo de pruebas básicas sobre el prototipo que se encuentre disponible. Esto no exige equipo de laboratorio ni formación previa. Es más que suficiente una sesión de media hora con la pieza en la mano para cerrar la verificación pendiente.

A quien continúe el desarrollo del modelo, integrar masa o insertos densos por una vía distinta del relleno. Colocar elementos que concentren más de la mitad de la masa del conjunto permitiría un camino más directo puesto que permite ajustar el peso sin tergiversar sus características externas.

A quien continúe el desarrollo del modelo, asignar el material en el archivo de diseño. Al definir el polímero en el modelo 3D, el programa calcula la masa y el centro de gravedad de manera automática, sin depender de estimaciones externas.

A quien continúe el desarrollo del modelo, incorporar el marcado de identificación como material de instrucción. El procedimiento ya está probado, dado que las leyendas del selector quedaron formadas durante la fabricación. Agregar ese marcado al modelo antes de producir unidades adicionales cierra una de las cuatro condiciones de seguridad que el trabajo estableció.

A la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea, medir la longitud total del arma de dotación antes de tratar la diferencia de 137 milímetros como un error del prototipo. La documentación consigna distintas medidas según la variante de la plataforma, el valor del manual exige confirmación directa sobre la pieza.

A la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea, resguardar el conjunto de planos y el registro de impresión como respaldo técnico. Esta documentación garantiza la reposición de piezas sin rehacer el trabajo modelado, también ofrece un punto de partida claro de comparación y evaluación futura.

Referencias

Algarni, M. y Ghazali, S. (2021). Comparative study of the sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's mechanical properties to FDM printing process parameters. *Crystals, 11*(8), 995. https://doi.org/10.3390/cryst11080995

Alvarez, K., Lagos, R. y Aizpun, M. (2016). Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación, 36*(3), 110-116. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n3.56610

Asamblea Nacional del Ecuador. (2024). *Ley de Armas, Municiones, Explosivos y Materiales Relacionados*. Cuarto Suplemento del Registro Oficial 680.

Colorado, H., Cardenas, C., Gutierrez-Velazquez, E., Escobedo, J. y Monteiro, S. (2023). Additive manufacturing in armor and military applications: Research, materials, processing technologies, perspectives, and challenges. *Journal of Materials Research and Technology, 27*, 3900-3913. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.212

Fonseca, C. y Miranda, P. (2018). *Diseño e implementación de un prototipo de impresora 3D de cinco ejes para el ahorro de material y mejoramiento de la resistencia mecánica en piezas fabricadas mediante el método de deposición de material fundido* [Trabajo de titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio ESPE.

Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Education.

Rodríguez-Panes, A., Claver, J. y Camacho, A. (2018). The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis. *Materials, 11*(8), 1333. https://doi.org/10.3390/ma11081333

Wortmann, N., Deters, T. y Gomes, A. (2022). Industrial-scale vacuum casting with silicone molds: A review. *Applied Research*. https://doi.org/10.1002/appl.202100012

Apéndice