

ARTÍCULOS



BOLETÍN CIENTÍFICO TECNOLÓGICO

ACADEMIA POLITÉCNICA MILITAR

DISEÑO PRELIMINAR DE UN CAJÓN DE LOS MECANISMOS MONOBLOQUE DE ALEACIÓN FERROSA PARA EL FUSIL SG 542-1 FAMAE

**MAY. ÓSCAR PASTOR ESCALONA
DR. AQUILES SEPÚLVEDA OSSES**



DISEÑO PRELIMINAR DE UN CAJÓN DE LOS MECANISMOS MONOBLOQUE DE ALEACIÓN FERROSA PARA EL FUSIL SG 542-1 FAMAE

MAY. Óscar Pastor Escalona¹

Dr. Aquiles Sepúlveda Osses²

Resumen: desde hace unos 30 años, FAMAE produce el fusil SG 542-1 calibre 7,62x51 mm, para cuyo cajón de mecanismos se emplean láminas plegadas, estampadas, soldadas y mecanizadas. Por otra parte, recientemente, bajo licencia IWI, FAMAE ha fabricado el respectivo cajón del fusil Galil ACE 22 NC, calibre 5,56x45 mm, sobre la base de un monobloque de acero 4340 trabajado en centros de mecanizado CNC. Así, el objetivo de este trabajo es describir el diseño preliminar de un cajón de mecanismos monobloque en acero 4340, para el fusil SG 542-1 calibre 7,62x51 mm FAMAE. Ello en la perspectiva de disminuir tiempos y costos de manufactura.

Palabras clave: fusil, cajón de mecanismos, diseño asistido por computador, diseño de ingeniería, manufactura, monobloque.

Abstract: for about 30 years, FAMAE has produced the SG 542-1 7,62x51 mm caliber FAMAE rifle, with a receiver made of stamped, folded, welded and machined steel plates. Moreover, recently and under IWI license, FAMAE has fabricated the receiver of the Galil ACE 22 NC 5,56x45 mm caliber rifle, from a 4340 steel mono-block worked in CNC machining centers. Thus, the present work objective is to describe the preliminary design of a mono-block receiver, made of 4340 steel, for the SG 542-1 7,62x51 mm caliber rifle. Reductions of fabrication time and costs are expected.

Keywords: rifle, receiver, computer aided design, computer aided engineering, manufacturing, mono-block.

-
- 1 Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas, mención Armamento. Jefe del Departamento de Ingeniería e I2D del Instituto de Investigación y Control del Ejército.
 - 2 Doctor-Ingeniero, Universidad de París VI; Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile; Profesor de la Universidad de Chile y de la Academia Politécnica Militar; Asesor de Ingeniería del Instituto de Investigación y Control del Ejército.



1. INTRODUCCIÓN

Los procesos y configuraciones establecidos para la manufactura de las armas de fuego han evolucionado constantemente desde los albores del siglo XV. Lo anterior se manifiesta en forma progresiva y acorde a la innovación tecnológica existente en cada época. Es esta una búsqueda constante de conocimiento específico que permite acortar las brechas existentes con relación al armamento de uso en los distintos ejércitos modernos. Es así como desde los inicios de nuestra historia patria y, por la necesidad de contar con un organismo capaz de dar satisfacción a los requerimientos de aquel entonces, se fundaron las Fábricas y Maestranzas del Ejército (FAMAE), heredera de la primera empresa de defensa de América Latina. Esta plataforma industrial, la que forma parte de la administración del Estado, ha contribuido permanentemente al desarrollo de la industria nacional y a la modernización de las Fuerzas Armadas, particularmente al Ejército de Chile. En el presente, su área de operaciones se encuentra principalmente orientada a satisfacer las necesidades que permitan contar con una mayor autonomía y abastecimiento en el mantenimiento y actualización de procesos, con especial orientación al armamento menor, municiones, optrónica, pirotecnia, productos químicos, desmilitarización, etc.

Entre las muchas competencias que posee FAMAE en el ámbito del armamento menor, corresponde señalar la fabricación del fusil de asalto liviano modelo SG 542-1 calibre 7,62 mm FAMAE, fabricado bajo licencia de la empresa SIG SAUER desde 1988. Esta arma a la fecha presta servicios al Ejército de Chile. En particular, el cajón de los mecanismos del referido fusil se fabrica a partir de planchas de acero, que son estampadas, plegadas y soldadas, procesos que requieren intensivamente de mano de obra especializada y personal de control de calidad en línea. Por otra parte, recientemente FAMAE ha estado fabricando el cajón de mecanismos del fusil Galil ACE 22 NC, calibre 5,56x45 mm, bajo licencia IWI, sobre la base de un monobloque de acero 4340 trabajado en centros de mecanizado de control numérico hoy disponibles en esa empresa nacional. Entre los dos métodos de fabricación expuestos en relación con cajones de mecanismos, existe una clara brecha tecnológica en favor de la manufactura a partir de un monobloque mecanizado en centros de mecanizado.

En el contexto expuesto, el objetivo de este trabajo es describir el diseño preliminar de un cajón de los mecanismos monobloque de acero 4340 para fusil el SG 542-1 FAMAE. Esto en la perspectiva de disminuir costos y tiempos de fabricación, haciendo uso de modernas técnicas de diseño mecánico y de los equipos de control numérico disponibles en FAMAE.



2. DIAGNÓSTICO DEL ARMAMENTO

2.1 Descripción general del fusil SG 542-1 FAMAE

El fusil de asalto FAMAE, modelo SG 542-1, es un arma automática de trayectoria tensa, con sistema de retroceso por toma de gas y con cierre giratorio. Es alimentada por cargadores tipo cajetilla con capacidad para 20 tiros, la munición puede ser de guerra, fogeo o de proyección para granada de fusil. El arma puede emplearse en cualquier posición, para tiro individual, semiautomático y para disparar ráfagas. El firme apoyo del bípode aumenta considerablemente la precisión del tiro. El tromblón cubrellamas que está fijado en la boca del cañón sirve para disparo de granadas y para armar la bayoneta.

El fusil de asalto liviano SG 542-1 FAMAE es un arma automática de carga por sistema de gas con cierre giratorio, es decir, la presión interior desarrollada por los gases, producto de la deflagración de la pólvora del cartucho, actúa sobre la cabeza del cierre ocasionando un movimiento violento de este hacia atrás, girando su cabeza y expulsando la vainilla. Terminada la secuencia anterior y liberando el cierre de la presión de los gases, vuelve a la posición inicial introduciendo un nuevo cartucho en la recámara.

2.2 Descripción general del fusil GALIL ACE 22 NC

A lo largo de los años, el Fusil GALIL ACE 22 NC ha sido probado en combate y es una de las armas más fiables en condiciones adversas y extremas. Es un arma individual, liviana, de trayectoria tensa, enfriada por aire, accionada por gases, en cabezal de pistón, bloqueo de cerrojo giratorio, alimentada por cargador NATO tipo cajetilla curvo, con capacidad para 35 y 50 cartuchos (5.56x45 mm).

El arma puede emplearse en cualquier posición con selector de tiro por ambos lados, con tres posiciones (seguro, tiro-tiro, ráfaga). Fácil de operar, la palanca selectora de tiro y el retén del cargador se pueden accionar desde cualquier lado del arma, de modo que es fácil de utilizar tanto por soldados diestros como zurdos. El arma está dotada con culata retráctil de 4 posiciones, además cuenta con cinco rieles Picatinny, que permiten instalar una amplia variedad de accesorios, tales como linterna, mira, bípode de mira telescópica, etc.

3. PRUEBAS, ENSAYOS Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 Solicitud de pruebas, ensayos y caracterización experimental

Las pruebas, ensayos y caracterización experimental, en una primera etapa, estuvieron a cargo del Laboratorio de Ensayos Mecánicos del Departamento de Sistemas de Armas



del Instituto de Investigaciones y Control del Ejército de Chile (IDIC). Para lo anterior, se entregó una muestra correspondiente a un cajón de mecanismos del fusil SG 542-1.

La muestra fue sometida a las siguientes actividades (Figura N° 1: Control dimensional; Ensayo de dureza; Ensayo de tracción; Análisis químico; Análisis metalográfico).



Figura N° 1: "Probetas para ensayos mecánicos SG 542-1".

Fuente: archivo del autor.

Para realizar los diferentes ensayos se utilizaron las siguientes Normas ASTM:

- Norma ASTM A370-15 "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products".
- Norma ASTM E18-15 "Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials".
- Norma ASTM E3-11 "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens".

3.1.1 Ensayo de tracción cajón de mecanismos SG 542-1

Este ensayo fue realizado con el objeto de determinar las propiedades mecánicas del acero del cajón de mecanismos del fusil SG 542-1.

3.1.2 Prueba masa reculante

Esta prueba considera la medición de la fuerza que ejerce la masa reculante sobre la placa posterior del cajón de mecanismos, dato necesario para la posterior simulación del cajón de mecanismos monobloque que se quiere diseñar.

3.1.2.1 Medición de fuerza masa reculante fusil SG 542-1 en IDIC

La prueba se realizó en el Departamento de Sistemas de Armas del Instituto de Investigación y Control, con el objeto de determinar la fuerza que ejerce la masa reculante



sobre la placa posterior del fusil SG 542-1 FAMAe. Para la toma de datos, se empleó una máquina de ensayos uniaxial marca Instron 4465, número de serie 4465P1793, con fecha de calibración 20 de enero de 2017, para cargas de tracción de 5 a 50 kgf. La prueba se realizó a una temperatura ambiente de 21 °C y una humedad relativa de 65%. Para lo anterior, se emplearon treinta fusiles de asalto liviano SG 542-1.

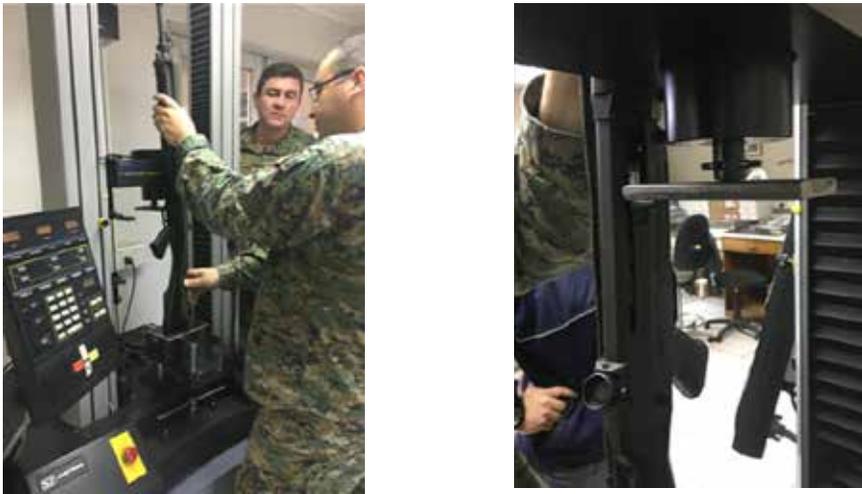


Figura N° 2: "Medición fuerza masas reculante fusil SG 542-1, en IDIC".

Fuente: archivo del autor.

En la Figura N° 2 se observan las pruebas realizadas para obtener las mediciones estadísticas. Entre estas, es importante destacar la media aritmética obtenida correspondiente a 11,635 Kgf. (114,14 N). El valor obtenido sirve como dato de entrada inicial para posteriores mediciones en el diseño del cajón de mecanismos monobloque.

3.2 Pruebas dinámicas en fusil SG 542-1 FAMAe

Para esta segunda etapa de medición, se realizaron pruebas dinámicas al fusil SG 542-1 en colaboración con el Departamento I2D y Planta de Armamento Menor de FAMAe. Los objetivos de esta medición fueron determinar la aceleración que se produce en el cajón de mecanismos, producto del retroceso de su masa reculante, y la fuerza puntual que ejerce el cierre en el momento que impacta sobre la placa posterior del cajón de mecanismos del fusil. Por lo específico y ocasional de esta prueba, a continuación se detalla su procedimiento.

3.2.1 Celda de carga (Figura N° 3)

Las celdas de carga piezoeléctricas de cuarzo, serie 9712B, ofrecen una amplia medición de las fuerzas de compresión y tracción, que se generan en el interior del



cajón de mecanismos del fusil SG 542-1 FAMA. Estos sensores de fuerza ofrecen alta sensibilidad, rigidez, respuesta rápida y son capaces de soportar sobrecargas de compresión del 20 al 400%.



Figura N° 3: "Posición celda de carga en placa posterior".

Fuente: archivo del autor.

3.2.2 Sensor de aceleración (Figura N° 4)

Para las pruebas, se utilizó el sensor de aceleración de cuarzo serie 8742A, de baja sensibilidad, alta frecuencia de resonancia y amplio ancho de banda. Estos sensores son ideales para las mediciones de impacto de metal a metal. Permiten medir los impulsos de corta duración y golpes por choque, que se generen en el interior del cajón de mecanismos del fusil SG 542-1.



Figura N° 4: "Posición de sensor de aceleración en palanca de preparar".

Fuente: archivo del autor.



3.2.3 Medición en polígono subterráneo (Figura N° 5)

La prueba se realizó en dependencias de FAMAE, en el polígono subterráneo, junto a personal de I2D y personal de seguridad, para operar la ejecución del tiro, conforme a lo siguiente:

Se realizaron cinco tiros por prueba (aceleración, fuerza sobre placa posterior), lo que entregó datos para graficación correspondientes a cinco mil puntos. Los datos obtenidos se cargaron en el *software* Labview para la obtención de máximos adecuados que sirvan para determinar los esfuerzos comprometidos.



Figura N° 5: "Ejecución pruebas dinámicas para obtención de datos".

Fuente: archivo del autor.

3.2.4 Revisión de los resultados obtenidos en pruebas dinámicas

Conforme a medición obtenida en IDIC, en un universo de treinta fusiles SG 542-1 FAMAE, se obtuvo una media de 11.6 Kgf. Lo que es equivalente a 114,1 N. Dicha medición entrega un dato inicial del movimiento de la masa reculante producto de una fuerza de compresión ejercida por la máquina Instron calibrada en 50 kgf.

Por otra parte, se hicieron mediciones en dependencias de FAMAE, mediante celdas de carga y sensores de aceleración, elementos que se ubicaron conforme a orientaciones y planimetría dispuesta por I2D en el sector de la placa posterior del cajón de mecanismos del fusil SG 542-1. Dichas pruebas marcaron un precedente no menor, ya que es primera vez que se realizaron a este fusil, entregando datos más exactos y reales que los que hasta la fecha se consideraban para los diferentes estudios realizados a los fusiles de asalto liviano de uso en la Institución. El valor obtenido corresponde a 29 Kgf, equivalente a 286 N. y una aceleración promedio de 1619,4 m/s². De acuerdo con



lo anterior, para realizar los posteriores estudios estáticos y de diseño, correspondientes al cajón de mecanismos monobloque, será empleada 286 N, dato obtenido por la medición de las pruebas dinámicas al fusil.

4 SIMULACIÓN Y DISEÑO FUNCIONAL

4.1 Análisis de diseño planimétrico del fusil SG 542-1

Para el análisis de diseño planimétrico del fusil SG 542-1 (Figura N° 6), se contó con los planos CAD del fusil, los que fueron proporcionados por el departamento I2D de FAMA E. Dichos planos se encontraban en formato del programa de diseño Autodesk Inventor, con extensión .ipt, lo que hizo necesario transformarlos a formato Solidworks, con extensión .sldsam. Hecha la transformación, se definieron los parámetros claves, los que consideran las dimensiones (cotas) y las relaciones geométricas esenciales para definir el modelo tridimensional.

El análisis planimétrico permitió establecer los datos iniciales para la construcción del cajón de mecanismos monobloque que se necesitaban crear.

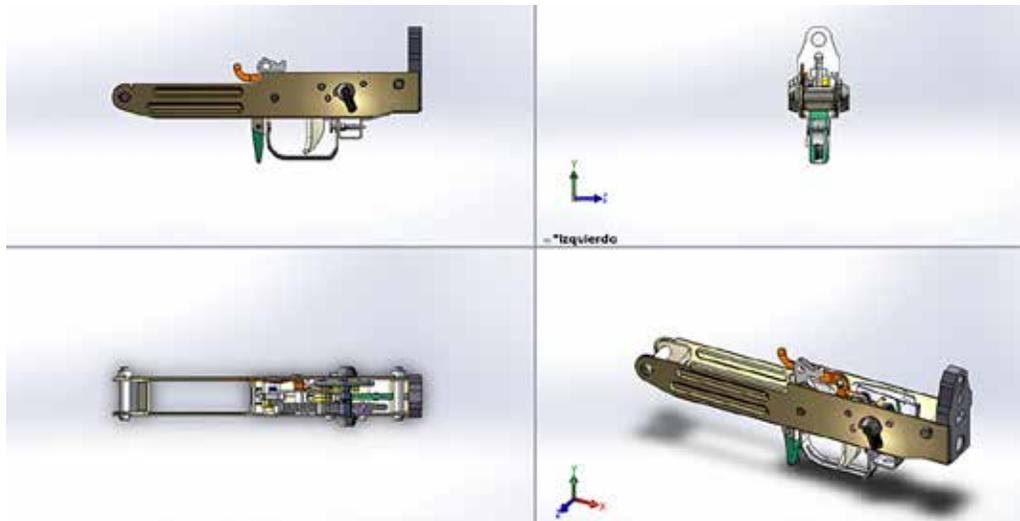


Figura N° 6: "Imagen CAD SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

4.2 Diseño gráfico CAD del cajón de mecanismos monobloque

Para el diseño gráfico CAD (Diseño asistido por computador) del cajón de mecanismos monobloque, se utilizó el programa de diseño mecánico en 3D Solidworks, el



que emplea un entorno gráfico basado en Microsoft® Windows®, *software* intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar las ideas de forma rápida, sin necesidad de operaciones complejas. En la Figura N° 7 se aprecia la vista de sección del modelo, logrando identificar específicamente el espesor de sus paredes laterales de 1.5 mm, dato necesario para el posterior mallado del modelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos a través del diseño, la pieza presenta una masa de 0.422605 kg, equivalente a un peso de 4.14048 N, y a un volumen de 5.38351e-005 m³. Los valores obtenidos serán utilizados para el posterior estudio estático, definiendo específicamente su mallado para efectos de los cálculos por elementos finitos.

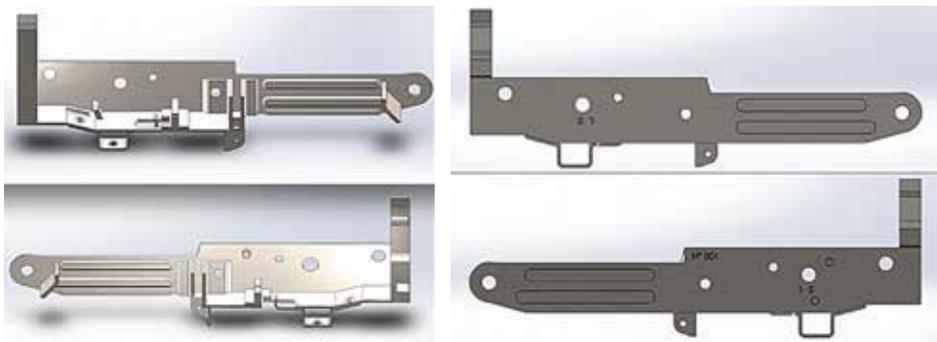


Figura N° 7: "Vistas de sección y laterales cajón de mecanismos monobloque".

Fuente: elaboración propia.

4.3 Simulación CAE de los mecanismos y componentes integrados del fusil

Solidworks Simulation es una herramienta CAE (Ingeniería Asistida por Computador) de validación de diseño integrada en Solidworks que permite simular el comportamiento de piezas y ensambles mediante la aplicación del análisis de elementos finitos (FEA). Su uso permite estudiar el comportamiento mecánico y térmico de un modelo de pieza o ensamble bajo ciertas condiciones de servicio, sin necesidad de crear un prototipo físico real del mismo. Al contarse con una perfecta integración en Solidworks, se puede modificar la geometría del modelo 3D y volver a ensayarlo bajo diferentes condiciones de contorno (distintos materiales, cargas, mallado, etc.) tantas veces como sea necesario hasta encontrar el modelo que mejor se ajuste a las necesidades requeridas.

4.3.1 Análisis estático

El análisis estático del cajón de mecanismos monobloque creado, se realizó mediante la aplicación de un sistema de ecuaciones lineales de equilibrio en cada uno de los elementos finitos establecidos por el mallado del sólido.



El cálculo inicial del análisis estático determina los desplazamientos de cada uno de los nodos de la malla. A continuación, se calcula la deformación unitaria y las tensiones para cada uno de los puntos.

4.3.1.1 Propiedades del material para simulación estática

Es importante mallar el modelo, definir las propiedades mecánicas del material, las restricciones de movimiento y las cargas a las que se someterá. Para el modelo, se considerará inicialmente un mallado estándar de sólido, un espesor de paredes laterales declarado de 1,5 mm en el diseño gráfico CAD del cajón de mecanismos monobloque y las propiedades del material del cajón. Dichos valores se presentan en Tabla N° 1.

| PROPIEDADES DEL MODELO Y DEL MATERIAL | |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Nombre | AISI/SAE 4340 Acero Normalizado |
| Tipo de modelo | Isotrópico elástico lineal |
| Criterio de fluencia (error) | Tensión de Von Mises |
| Límite elástico | 710 N/mm ² (MPa) |
| Esfuerzo de tracción | 95 kgf/mm ² |
| Coefficiente de Poisson | 0.32 |
| Densidad | 7850 kg/m ³ |
| Módulo cortante | 8e+010 N/m ² |
| Coefficiente de dilatación térmica | 1.2e-005 kelvin |
| Coefficiente de roce | 0,05 |
| Masa | 0.422605 kg |
| Volumen | 5.38351e-005 m ³ |
| Peso | 4.14048 N |
| Temperatura a tensión cero | 298 Kelvin |
| Modelo adaptativo | Tipo H |
| Nivel de precisión | 99% |
| Máximo número de bucles | 3 |

Tabla N° 1: "Propiedades AISI/SAE 4340 para simulación estática".

Fuente: elaboración propia.

4.3.1.2 Mallado, para simulación estática

El mallado tridimensional de la pieza (Figura N° 8) es una de las etapas más importantes en la realización de la simulación numérica en un computador mediante el método numérico de elementos finitos. El mallado es una operación que divide la pieza en porciones más pequeñas denominadas elementos que, a su vez, se encuentran conectados a otros elementos adyacentes mediante puntos o nodos. Este método resuelve ecuacio-



nes diferenciales en cada uno de los nodos del modelo mallado y extiende la solución, de forma aproximada y mediante interpolación, al resto de puntos que no son nodos. El proceso final permite visualizar el resultado del análisis sobre el mismo modelo 3D y en colores, por el suavizado y la interpolación de los resultados numéricos obtenidos.



Figura N° 8: "Mallado sólido para análisis estático monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

Según los datos resultantes del diseño gráfico CAD del cajón de mecanismos monobloque, en relación con el espesor de sus paredes laterales, 1,5 mm, correspondió establecer un tipo de malla sólida fina de alta calidad, con un tamaño de 0,75 mm y una tolerancia dependiente del tamaño de los elementos y la geometría del modelo de 0,0375 mm, conforme a Tabla N° 2, permitiendo mejores resultados, ya que los elementos se adaptan mejor a la superficie. Para el mallado se definió un método adaptativo del tipo H, el que es un método avanzado, que permite subdividir en elementos más pequeños las zonas donde existe mayor riesgo de error (zonas donde existen fuerzas mayores, o donde se produce mayor deformación).

La estimación del error se basa en la continuidad de las tensiones. Solidworks calcula la media del valor de las tensiones en todos los nodos de la malla y compara el valor de la tensión en cada uno de los nodos. El error es la diferencia entre el valor medio y el valor en cada nodo.

| INFORMACIÓN MALLA | |
|-------------------|-----------------------|
| Tipo de malla | Malla sólida, tipo H. |
| Malla utilizada | Malla estándar |
| Puntos jacobianos | 4 |



| INFORMACIÓN MALLA | |
|--|-------------------------------------|
| Tamaño de elementos | 0,75 mm |
| Tolerancia | 0.0375 mm |
| Calidad de malla | Elementos cuadráticos de alto orden |
| Número total de nodos | 1.409.180 |
| Número total de elementos | 909476 |
| Coficiente máximo de aspecto | 23.993 |
| % de elementos con cociente de aspecto es < 3 | 99.5 |
| % de elementos con cociente de aspecto es > 10 | 0.0274 |

Tabla N° 2: "Información malla para simulación estática mediante elementos finitos".

Fuente: elaboración propia.

4.3.1.3 Cargas y sujeciones para simulación estática

Para la carga, se consideró una fuerza de 218 N, dato obtenido conforme a promedio de pruebas dinámicas obtenidas a través de la ejecución del tiro de polígono y el uso de celdas de carga, en dependencias de FAMA E. Para evitar que el modelo se desplazase luego de que una carga actúe sobre ella, se definió un comportamiento conforme a ocho aristas del tipo geometría fija, fijando, de esta manera, los grados de libertad de traslación y rotación, como cero en el sólido seleccionado. Este tipo de sujeción no requiere seleccionar la dirección en que se aplica la restricción, ya que restringe todos los grados de libertad (tres grados de libertad de traslación y tres grados de libertad de rotación) (Figura N° 9).

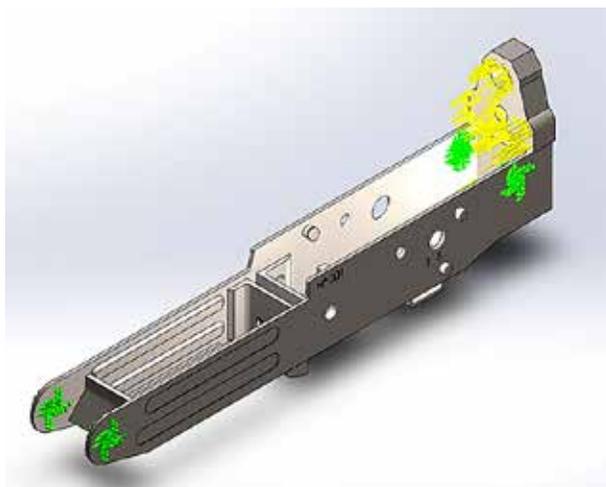


Figura N° 9: "Asignación de cargas/sujeciones monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

4.3.1.4 Resultados del estudio estático

A continuación se presentan los resultados del estudio estático, representados por cinco elementos: tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias, factor de seguridad y percepción de diseño.

En la Figura N° 10, se observa el resultado de las tensiones producto del análisis estático desarrollado, los resultados del modelo deformado y los colores que definen los errores. Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las mayores tensiones, mientras que los colores más fríos (azules, verdes), representan las menores tensiones en el modelo, de acuerdo con los resultados el modelo simulado presenta muy bajas tensiones.

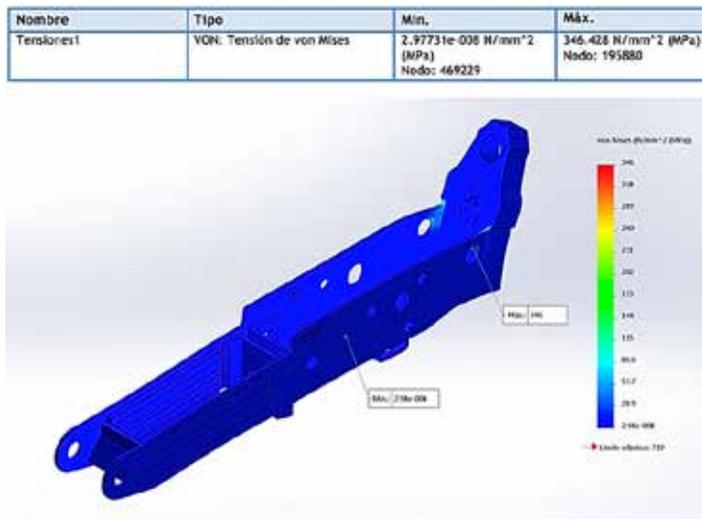


Figura N° 10: "Resultado de tensiones monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

En la Figura N° 11 se aprecian los resultados y los colores que definen los desplazamientos resultantes (URES) de cada uno de los nodos (mm) producto de las restricciones establecidas. Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las zonas con mayores desplazamientos, mientras que los colores más fríos (azules, verdes) representan las zonas que prácticamente no se han desplazado. El valor mínimo observado ocurre en el nodo 1398 con 0 mm de desplazamiento resultante y un valor máximo de 0,0065835 mm en el nodo 201.742.

En la Figura N° 12 se aprecian los resultados de las deformaciones unitarias sobre el modelo simulado. Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las zonas con mayores



deformaciones mientras que los colores más fríos (azules, verdes) representan las zonas que prácticamente no se han deformado.

Se concluye que los resultados obtenidos de la simulación muestran que las tensiones y deformaciones a las que se sometió el cajón de mecanismos monobloque diseñado a través de las sujeciones establecidas y una carga en la placa posterior correspondiente a 218,13 N, son aceptables y no presentan ningún tipo de problema; por lo tanto, el diseño se considera adecuado y en condiciones de iniciar su validación.

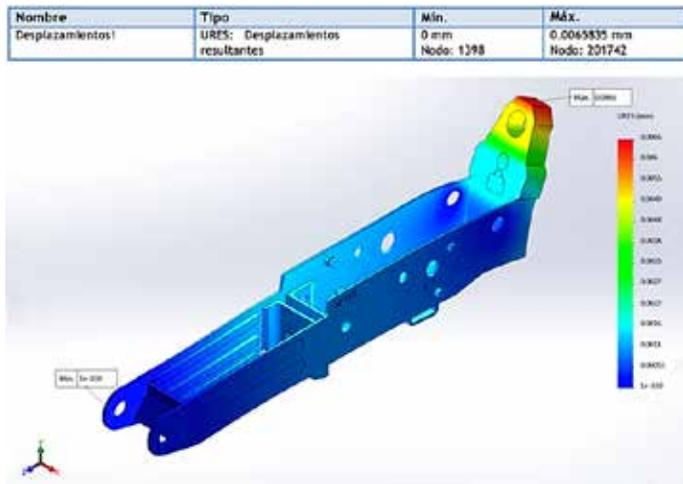


Figura N° 11: "Resultado de desplazamiento monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.

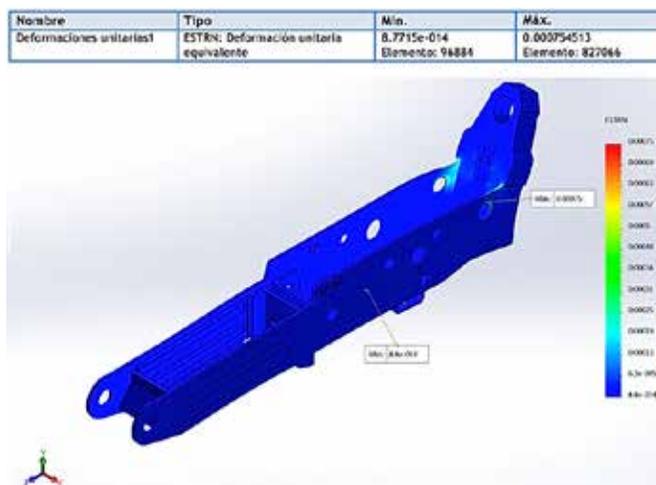


Figura N° 12: "Resultado de las deformación unitaria monobloque SG 542-1".

Fuente: elaboración propia.



5. VALIDACIÓN Y DISEÑO PRELIMINAR

5.1 Evaluación funcional del diseño simulado (Figura N° 13)

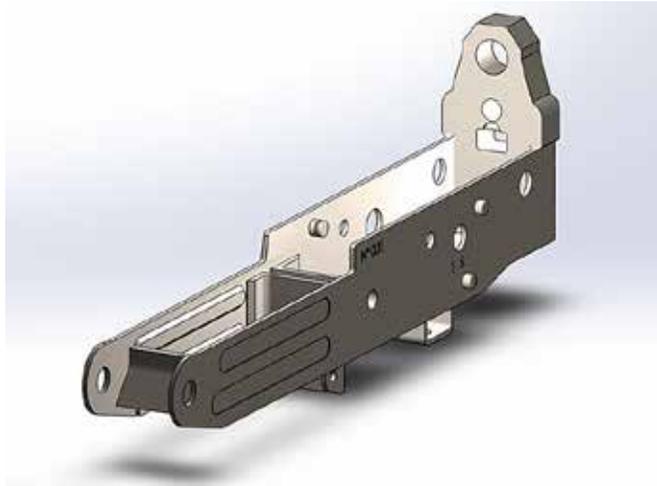


Figura N° 13: “Modelo cajón de mecanismos monobloque SG 542-1”.

Fuente: elaboración propia.

Para la evaluación funcional del diseño simulado, se utilizó la herramienta de Solidworks Simulation Fatiga, la que considera la aplicación de sucesos de fatiga, a través de las concentraciones de tensiones sobre la pieza, la definición parametrizada por curva S-N y un método Soderberg, conforme a acero SAE 4340 normalizado. De acuerdo con lo anterior, se considerarán pruebas cíclicas con carga aleatoria de amplitud constante, conforme a la siguiente Tabla N° 3.

| PARÁMETROS VALIDACIÓN ESTUDIO DE FATIGA | |
|---|----------------------------|
| Cajón de Mecanismos Monobloque SG 542-1 | |
| Propiedades Volumétricas | Valor |
| Masa | 0,422595 Kg |
| Volumen | 5,3833e-005 m ³ |
| Densidad | 7850 Kg/m ³ |
| Peso | 4.14143 N |
| Propiedades del Material | |
| Nombre | Características |
| Acero AISI 4340 | Normalizado |
| Tipo de modelo | Isotrópico elástico lineal |
| Criterio de error | Tensión de Von Mises |
| Tipo de curva S-N | AISI/SAE 4340 |



| PARÁMETROS VALIDACIÓN ESTUDIO DE FATIGA | | | |
|---|----------------------|--------------------|--------------------------|
| Propiedades del Estudio | | | |
| Tipo de Análisis | | Observaciones | |
| Factor de reducción (Kf) | | 0,5 | |
| Tensión equivalente | | Von Mises | |
| Interacción entre sucesos | | Sin interacción | |
| Corrección de tensión media | | Soderberg | |
| Factor de escala | | Tipo 1 | |
| Resultado del Estudio | | | |
| Nº | TIPO PRUEBA (CICLOS) | TIPO DE CARGA | RESULTADOS |
| 1 | 20.000 | Base en 0 (LR = 0) | No hay rotura por fatiga |

Tabla Nº 3: "Parámetros validación estudio de fatiga".

Fuente: elaboración propia.

5.1.1.1 Análisis de resultados validación por ciclos

Del análisis de la simulación de fatiga, se concluye que los colores representan el porcentaje de vida consumido por la fatiga en cada una de las zonas. A los 20.000 ciclos (Figura Nº 14), se observa que el cajón diseñado resiste completamente a las pruebas de fatiga sometidas. El factor de daño está representado por el porcentaje de daño que acumula el modelo de la pieza simulada. Un factor de daño menor a uno indica que la pieza ha fallado durante el tiempo determinado de la carga aleatoria.

El trazado de vida, representa el número de ciclos de carga que produce el modelo simulado de rotura por fatiga. El estudio comenzó con una prueba de 20.000 ciclos, ensayo que fue resistido completamente; este valor, en general, se considera como vida útil infinita.

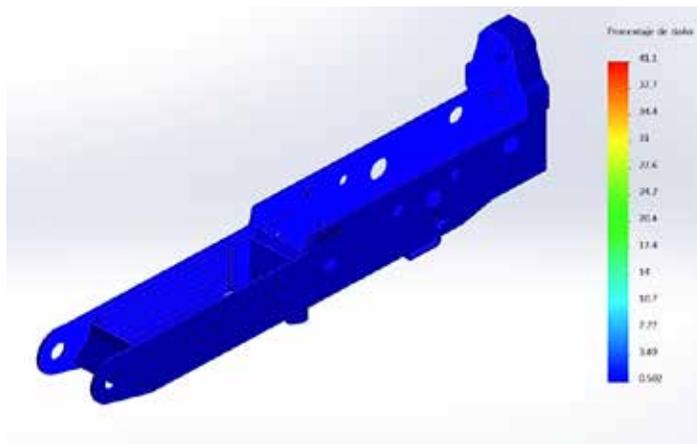


Figura Nº 14: "Imagen % de daño 20.000 ciclos monobloque

Fuente: elaboración propia.



5.2 Determinación de ajustes finales del modelo

5.2.1 Integración de componentes internos

El análisis de ensamble permite estudiar las interferencias, el choque entre componentes, simular el conjunto mecánico y analizarlo dinámicamente. Su objetivo final es detectar diseños inadecuados y ajustarlos para obtener un óptimo funcionamiento del mecanismo. A continuación se integran los componentes internos del cajón de mecanismos monobloque, a través de la herramienta de ensamble de Solidworks para el fusil SG 542-1, de acuerdo a Figura N° 15.

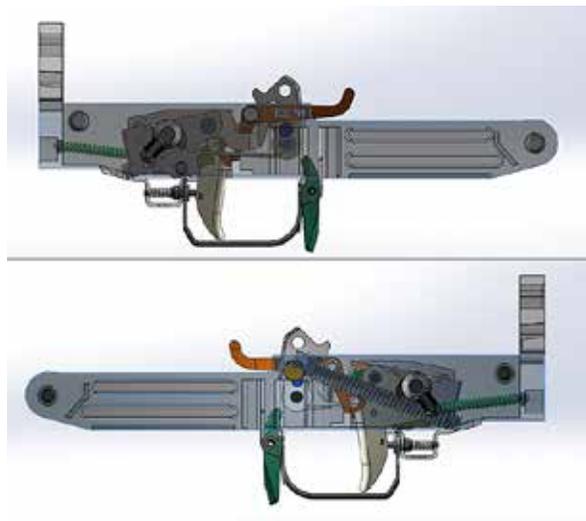


Figura N° 15: "Vistas de sección laterales ensamble componentes internos".

Fuente: elaboración propia.

5.3 Impresión 3D de prototipo final

La tecnología actual de prototipado permite imprimir modelos 3D en materiales muy variados, a partir de la reproducción de un archivo con extensión .Stl. La pieza diseñada a través de la herramienta computacional debe ser sólida y hermética para que pueda ser impresa. Existen variados materiales en el mercado, de acuerdo con propiedades mecánicas requeridas para lograr los objetivos del diseño.

El material seleccionado para la impresión 3D del prototipo fue ONYX, el que cuenta con el doble de resistencia que el ABS o PLA, lo que permite piezas más resistentes, lisas y opacas, características relevantes para la posterior mecanización e integración de componentes internos.



5.3.1 Prototipo preliminar

La impresión del prototipo se realizó en la empresa Tresdp, donde se empleó una impresora de alta resistencia Markforged, con una resolución de 100 micras (Figura N° 16). Los prototipos impresos en 3D en material ONYX, terminados, se presentan en la Figura N° 17.

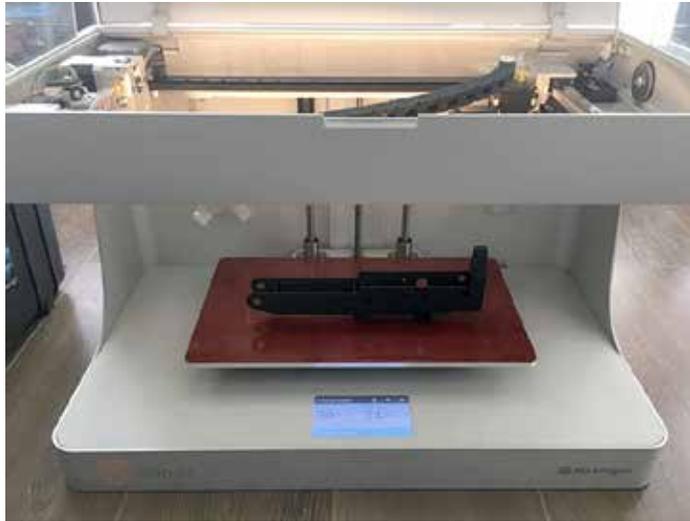


Figura N° 16: "Prototipo impresión 3D en Onyx, impresora Markforged".

Fuente: archivo del autor.



Figura N° 17: "Imagen prototipos impresión 3D en Onyx".

Fuente: archivo del autor.



5.3.2 Ajuste de prototipo en fusil SG 542-1

El prototipo en ONYX del cajón de mecanismos diseñado se ensambló (sin sus componentes internos) al fusil SG 542-1, número de serie 38403, conforme a Figura N° 18, en dependencias de la Sala de Armamento de la Academia Politécnica Militar.



Figura N° 18: "Ajuste prototipo impresión 3D en Onyx con fusil SG 542-1".

Fuente: archivo del autor.

5.3.3 Ensamble de componentes internos en prototipo

Se verificó el ensamblaje y funcionalidad de los componentes internos del prototipo sin disparar (manualmente), en la Planta de Armamento Menor en FAMAe, conforme a Figura N° 19.



Figura N° 19: "Vista lateral ensamble componentes internos en prototipo".

Fuente: archivo del autor.



6. CONCLUSIONES

Como se logró evidenciar, el diseño preliminar de un cajón de los mecanismos para el fusil SG 542-1, de estructura monobloque en acero SAE 4340, trabajado en centros de mecanizado CNC, fue el resultado del desarrollo de diversas etapas que tuvieron prósperos resultados.

En primer lugar, se analizaron los antecedentes técnicos y de fabricación de, por una parte, el actual fusil SG 542-1 calibre 7,62 x 51 mm FAMAE, cuyo cajón de mecanismos es fabricado, desde hace casi cuatro décadas, empleando láminas plegadas, soldadas y mecanizadas y, por otra, del cajón de mecanismos del fusil Galil ACE 22 NC, calibre 5,56x45 mm IWI, fabricado recientemente por FAMAE, bajo licencia IWI, sobre la base de un monobloque de acero trabajado en centros de mecanizado.

Posteriormente se determinaron, de forma experimental, los esfuerzos dinámicos, al cargar el arma y al disparar, sobre el cajón de mecanismos del fusil SG 542-1, mediante celdas de carga y sensores de aceleración. A partir de lo anterior y, de la geometría verificada de tal cajón, se determinaron las fuerzas actuantes sobre distintas partes de este último.

El análisis planimétrico del fusil SG 542-1 permitió establecer los datos de entrada esenciales para modelar el cajón de mecanismos de esta arma, ahora en versión monobloque, considerando acero 4340 como materia prima. De acuerdo con lo anterior, se diseñó, mediante el uso de *softwares* de diseño (CAD) y de ingeniería (CAE, método de elementos finitos), el cajón de mecanismos monobloque del fusil SG 542-1, en su planimetría y resistencia mecánica (incluyendo fatiga), así como en la funcionalidad de los mecanismos que debe contener.

Luego se fabricó, mediante impresión 3D en plástico ONIX, un prototipo del cajón de mecanismos diseñado, con el que se validó su compatibilidad geométrica y funcional (sin disparo) con los otros componentes del mecanismo de disparo del fusil SG 542-1.

El valor de uso del presente trabajo se expresa bajo diferentes formas. Primero, los resultados podrían ser considerados directamente por FAMAE para la modernización (upgrade) de los fusiles SG 542-1 actualmente de cargo en la Institución. Segundo, la metodología empleada, basada en la aplicación de modernas herramientas de diseño asistido por computador (CAD), ingeniería asistida por computador (CAE) y prototipado rápido por impresión 3D, es utilizable para la modernización de la manufactura de los cajones de mecanismos de otras armas livianas fabricadas por FAMAE. Por último, cabe destacar que esta metodología es aplicable al diseño eficiente de una amplia variedad de componentes mecánicos.



BIBLIOGRAFÍA

- Academia Politécnica Militar (2015). *Manual de Memorias, Tesis o Actividad Equivalente*. Santiago, Chile: Academia Politécnica Militar.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM A370-15: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM E18-15: Stantard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials. *ASTM E45-13: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials (2013). *ASTM E112-13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 28 páginas. Estados Unidos.
- American Standart for Testing and Materials (2013). *ASTM E140-12b: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*. 25 páginas. Estados Unidos.
- División Educación (2011). *Guía para la redacción de citas bibliográficas*. Santiago, Chile: División Educación.
- Ejército de Chile (2004). CA.Is.C.(P)880. *Cartilla de Instrucción FUSIL SG 542 FAMA E*. Santiago, Chile: Fábricas y Maestranzas del Ejército.
- González, S. G. (2017). *El gran libro de Solidworks SIMULATION* (1ª edición, Vol. I). Barcelona, España: Marcombo.
- González, S. G. (2015). *El Gran libro de Solidworks* (2ª edición). Ciudad de México, México: Alfaomega-Marcombo.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación*. Ciudad de México, México: Infagon.



Israel Weapon Industries (IWI) Ltd. (s.f.). Manual de Mantenimiento de Niveles A y B. Galil ACE Modelo: 22 NC Fusil de asalto de 5,56 mm, 72. Recuperado de: www.iwi.net.

Pastor, Ó. (2017). *Diseño preliminar de un cajón de los mecanismos monobloque de aleación ferrosa para el fusil SG 542-1 FAMAE*. (Memoria para optar al título de Ingeniero Politécnico Militar, Mención Armamento). Academia Politécnica Militar, Santiago de Chile.