



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de culata para fusil de asalto mediante optimización
topológica*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Gonzalo Fernández-Bravo Ortiz de Lanzagorta

DIRECTORES: Pablo Falcón Oubiña
Andrés Suárez García

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de culata para fusil de asalto mediante optimización
topológica*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

Este TFG surge como una oportunidad para explorar el campo de la optimización topológica. Muchos de los diseños que se obtienen por este método no han sido viables por problemas técnicos y de rentabilidad económica hasta el reciente auge de la impresión 3D.

El propósito de este trabajo es obtener una culata de un fusil de asalto por optimización topológica. Este elemento está sujeto frecuentemente a cargas de retroceso y ocasionalmente a impactos violentos en la lucha cuerpo a cuerpo o en caídas al suelo. Además, el hecho de que la culata pueda definirse con un número reducido de variables permite un análisis y valoración más pormenorizados del método en cuestión.

El fusil de asalto tomado como referencia es el HK g36 E. Se ha generado un modelo digital de su culata y se ha puesto a prueba mediante *software* de análisis de tensión. Los resultados obtenidos se utilizan para validar la culata resultante mediante varias iteraciones en un *software* generador de forma.

PALABRAS CLAVE

Optimización topológica, energía de retroceso, culata, HK g36 E, fabricación aditiva

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por ayudarme a sacar mi TFG adelante, por darme la inteligencia y la fortaleza que me hacían falta para lograrlo y nunca abandonarme en los momentos difíciles.

Gracias a mis padres por la vida y a mi familia en general por haberme transmitido los valores necesarios para completar estos seis años de Escuela Naval Militar, valores que estoy seguro de que no hubiese podido encontrar en ningún otro lugar.

Gracias a todas las personas de la Escuela Naval que han contribuido a mi formación como militar. Sin su sacrificada labor no sería la persona que soy hoy.

Gracias especialmente a todos mis compañeros de la promoción 423-153 por haberme acompañado en estos cinco años de escuela. No lo habría conseguido sin ellos.

Por último, gracias a mis tutores Andrés Suárez y Pablo Falcón por ayudarme a encauzar el TFG y estar a mi disposición para todas las dudas que me surgieron.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Contexto y motivación	6
1.2 Objetivos	7
1.3 Estructura de la memoria	7
2 Estado del arte	8
2.1 Optimización estructural	8
2.1.1 <i>Definición</i>	8
2.1.2 <i>Tipos de optimización estructural</i>	8
2.2 Problema de optimización topológica.....	11
2.2.1 <i>Introducción al entorno de optimización topológica</i>	11
2.2.2 <i>Método de elementos finitos</i>	11
2.2.3 <i>Algoritmos utilizados en el entorno MEF para la optimización topológica</i>	12
2.2.4 <i>Ejemplos de optimización topológica</i>	12
2.2.5 <i>Programas que utilizan el MEF/SIMP actualmente</i>	14
2.3 Definición matemática del problema y toma de mediciones	16
2.3.1 <i>Ecuaciones</i>	16
2.3.2 <i>Mediciones y sensores</i>	17
2.4 Proceso de trabajo	19
2.5 Fabricación.....	20
3 Desarrollo del TFG.....	22
3.1 Condiciones para el análisis.....	22
3.1.1 <i>Material</i>	22
3.1.2 <i>Cargas</i>	23
3.1.3 <i>Restricciones</i>	24
3.1.4 <i>Simplificaciones</i>	24
3.1.5 <i>Singularidades</i>	24
3.1.5 <i>Conducción del análisis MEF</i>	25
3.2 Análisis de la culata original.....	25
3.2.1 <i>Modelo de partida</i>	25
3.2.1 <i>Análisis del modelo real incluyendo el acople original</i>	28

3.2.2 <i>Análisis del modelo real: Simplificación 1</i>	32
3.2.2 <i>Análisis del modelo real incluyendo el acople modificado</i>	35
3.2.3 <i>Análisis del modelo original para cargas laterales</i>	38
3.2.4 <i>Decisión</i>	44
4 Resultados / Validación / Prueba.....	45
4.1 Iteraciones del generador de forma	45
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Líneas futuras	66
6 Bibliografía.....	67
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	71
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	72
Anexo III: Planos.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Tipos de optimización estructural.....	10
Figura 2-2 Ejemplo de malla MEF.....	11
Figura 2-3 Efecto tablero de ajedrez [3].....	12
Figura 2-4 Soporte de conector de adaptador de carga útil [9]	13
Figura 2-5 Palanca [9]	13
Figura 2-6 Entorno Inventor Nastran	14
Figura 2-7 Entorno Altair Inspire [11]	15
Figura 2-8 Entorno Ansys Discovery [12]	15
Figura 2-9 Ejemplo de implementación de sensores de presión [18].....	18
Figura 2-10 Ejemplo de sensor de aceleración [16]	19
Figura 2-11 Proceso de optimización topológica [20]	20
Figura 3-1 Aspecto simplificado 1 de culata original	25
Figura 3-2 Aspecto simplificado 2 de culata original	26
Figura 3-3 Soldado empuñando HK g36 E [35].....	27
Figura 3-4 HK g36 E [36]	27
Figura 3-5 Modelo original	28
Figura 3-6 Tensión de Von Mises	29
Figura 3-7 Desplazamiento máximo 1	30
Figura 3-8 Desplazamiento máximo 2	31
Figura 3-9 Simplificación del modelo original 1	32
Figura 3-10 Tensión de Von Mises	33
Figura 3-11 Desplazamiento máximo	34
Figura 3-12 Simplificación del modelo original 2	35
Figura 3-13 Tensión de Von Mises	36
Figura 3-14 Desplazamiento máximo	37
Figura 3-15 Modelo original bajo cargas laterales	38
Figura 3-16 Tensión de Von Mises	39
Figura 3-17 Desplazamiento máximo	40
Figura 3-18 Singularidad 1	41
Figura 3-19 Singularidad 2.....	41
Figura 3-20 Simplificación bajo cargas laterales	42
Figura 3-21 Tensión de Von Mises en simplificación.....	43
Figura 3-22 Tensión de Von Mises en modelo original.....	44

Figura 4-1 Modelo de partida para generador de forma.....	45
Figura 4-2 Modelo inicial iteración 1	46
Figura 4-3 Resultado de generador de forma de la iteración 1	47
Figura 4-4 Resultado de la iteración 1	48
Figura 4-5 Tensión de Von Mises	49
Figura 4-6 Desplazamiento máximo	50
Figura 4-7 Modelo inicial de la iteración 2	51
Figura 4-8 Resultado de generador de forma de la iteración 2	52
Figura 4-9 Resultado de la iteración 2.....	52
Figura 4-10 Tensión de Von Mises	53
Figura 4-11 Desplazamiento máximo	54
Figura 4-12 Resultado de la iteración 2 Nastran	55
Figura 4-13 Tensión de Von Mises	56
Figura 4-14 Desplazamiento máximo	57
Figura 4-15 Modelo de la iteración 3 para esfuerzo de retroceso	58
Figura 4-16 Tensión de Von Mises	59
Figura 4-17 Desplazamiento máximo deformado	60
Figura 4-18 Desplazamiento máximo sin deformar	60
Figura 4-19 Modelo de la iteración 4 para esfuerzo lateral.....	61
Figura 4-20 Tensión de Von Mises	62
Figura 4-21 Desplazamiento máximo deformado	63
Figura 4-22 Desplazamiento máximo sin deformar	63
Figura 5-1 Modelo final renderizado.....	65
Figura 5-2 Biatleta sueco y su carabina de diseño generativo.....	66
Figura A1-0-1 Bobina PolyTerra [39].....	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Propiedades del ABS	21
Tabla 2-2 Propiedades del nailon	21
Tabla 2-3 Propiedades del PETG	21
Tabla 2-4 Propiedades de la fibra de carbono	21
Tabla 2-5 Propiedades de la fibra de vidrio.....	21
Tabla 3-1 Datos para calcular la velocidad de retroceso.....	23
Tabla 3-2 Resultados de retroceso.....	23
Tabla 3-3 Configuración para modelo original	29
Tabla 3-4 Resultados de modelo original.....	29
Tabla 3-5 Configuración para simplificación del modelo original 1	32
Tabla 3-6 Resultados de simplificación de modelo original 1	33
Tabla 3-7 Configuración para simplificación del modelo original 2	35
Tabla 3-8 Resultados de simplificación de modelo original 2	36
Tabla 3-9 Configuración para modelo original bajo cargas laterales.....	38
Tabla 3-10 Resultados de modelo original bajo cargas laterales	39
Tabla 3-11 Configuración para simplificación bajo cargas laterales	42
Tabla 3-12 Resultados de simplificación bajo cargas laterales	43
Tabla 4-1 Configuración para iteración 1.....	47
Tabla 4-2 Configuración para resultado de la iteración 1	48
Tabla 4-3 Resultados de análisis lineal estático	48
Tabla 4-4 Configuración para la iteración 2.....	51
Tabla 4-5 Configuración para resultado de la iteración 2	53
Tabla 4-6 Resultados de análisis lineal estático	53
Tabla 4-7 Configuración para resultado de la iteración 2 Nastran.....	55
Tabla 4-8 Resultados de análisis no lineal estático	56
Tabla 4-9 Configuración para modelo de la iteración 3 para analizar el esfuerzo de retroceso.....	58
Tabla 4-10 Resultados de análisis no lineal estático	59
Tabla 4-11 Configuración para modelo de la iteración 3 para analizar el esfuerzo lateral	61
Tabla 4-12 Resultados de análisis no lineal estático	62
Tabla 4-13 Resumen esfuerzo de retroceso.....	64
Tabla 4-14 Resumen esfuerzo lateral	64
Tabla 4-15 Comparativa de masas	64

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

Las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado se diferencian de otros organismos gubernamentales en que emplean las armas para llevar a cabo su cometido. Como reza el artículo 104 de la Constitución española: “Las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad, bajo la dependencia del Gobierno, tendrán como misión proteger el libre ejercicio de los derechos y libertades y garantizar la seguridad ciudadana.”

Por otra parte, la sofisticación de las armas ha aumentado notablemente en estos últimos tiempos: desde los dispositivos no letales de uso comúnmente policial, hasta las armas de destrucción masiva de alcance global. En las FF. AA. hay predominio de armas letales, en su mayoría armas de fuego. Las más relevantes a nivel Ejército son las que se encuentran en las baterías terrestres, o en los sistemas de combate de navíos y cazas. A nivel individual, la más relevante es el fusil. El modelo más extendido en las FF. AA. españolas es el HK g36 E.

El diseño de un arma tan versátil como esta no es simple. Los requisitos que un fusil como este deben cumplir se pueden dividir en 3 categorías:

1. Transporte. El fusil debe ser ligero y resistente a la suciedad y a los cambios de temperatura.
2. Mantenimiento. El fusil debe ser simple de montar y desmontar para facilitar su cuidado.
3. Desempeño en combate. El fusil debe tener poco retroceso para maximizar la precisión, ser letal a la máxima distancia posible y ser resistente a impactos.

Por tanto, conseguir sustituir una sola pieza de un fusil semejante que cumpla todos los requisitos sin tener la experiencia de una empresa dedicada a este propósito puede resultar ser una tarea ardua, si no imposible.

En un contexto bélico, sin embargo, aumenta la probabilidad de que el material sufra daños por estar expuesto a una serie de situaciones caóticas, y también de que las líneas de comunicaciones se vean afectadas y que el reaprovisionamiento no sea posible temporalmente. El Ejército español puede beneficiarse en un escenario como este de poder generar, mediante medios de impresión 3D, imitaciones o sustitutos de un componente del armamento, aunque sus capacidades sean más limitadas que las del original.

Mediante el uso de *software* CAE, este trabajo pretende proporcionar un conocimiento más preciso de los efectos del retroceso sobre la culata del fusil HK g36 E para realizar un diseño de culata imprimible en 3D orientado a la categoría de desempeño en combate: que soporte las cargas de retroceso y las cargas laterales correspondientes a su empleo como objeto contundente.

En operaciones militares no siempre se puede tener la certeza de contar con medios de aprovisionamiento, y menos una fuerza expedicionaria como la Infantería de Marina. Actualmente no se explotan lo suficiente los medios de impresión 3D para paliar el problema de la falta de aprovisionamiento. Generar un modelo de culata que pueda imprimirse en 3D y que pueda sustituir al actual, asegurando al menos su desempeño en combate, supone una mejora considerable.

1.2 Objetivos

El objetivo de este TFG es obtener un diseño de culata para fusil de asalto mediante un proceso de optimización topológica. Para ello, se han establecido tres objetivos intermedios, manteniendo las condiciones de uso:

- La culata diseñada debe soportar tensiones internas iguales o inferiores a la original.
- La culata diseñada debe mostrar deformaciones iguales o inferiores a la original.
- La diferencia de masa entre la culata diseñada y la original debe suponer como máximo un 10 % de la masa total del fusil.

Los dos primeros objetivos proporcionan la certeza de que la culata diseñada cumpla con un coeficiente de seguridad al menos igual de estricto que el de la original. El tercer objetivo evita que se emplee un exceso de masa para cubrir las deficiencias de diseño.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria se estructura en 5 capítulos, seguidos de 1 bibliografía y 3 anexos. Son los siguientes:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. En este capítulo se expondrán los objetivos del proyecto y se proporcionará un contexto para justificar su relevancia.
- Capítulo 2: Estado del arte. Este capítulo muestra las técnicas actuales para cada una de las fases de diseño y fabricación, así como la teoría que hay detrás del método. Esto incluye tipos de optimización, método de trabajo, método de toma de mediciones, ecuaciones para definir el retroceso y técnicas de fabricación.
- Capítulo 3: Desarrollo del TFG. Este capítulo contiene los datos necesarios sobre el modelo, materiales, fuerzas y restricciones para establecer el marco del trabajo. También recoge un análisis del modelo de culata original con el que comparar el nuevo diseño.
- Capítulo 4: Resultados/Validación/Prueba. Este capítulo contiene las iteraciones que se han llevado a cabo en el *software* generador de forma, hasta alcanzar el resultado final. También contiene una evaluación comparativa entre el nuevo diseño y el original.
- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras. En este capítulo se exponen las implicaciones de los resultados, así como posibles caminos para continuar la investigación en este campo.
- Bibliografía. En esta sección quedan recogidas todas las referencias empleadas para el desarrollo de este trabajo.
- Anexos. En este TFG hay 3 anexos. Los 2 primeros versan sobre las implicaciones medioambientales y sociales del TFG. El último recoge los planos del modelo original de culata y del nuevo diseño.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se proporcionará una definición para la optimización estructural y se explicará qué parte tiene la topológica dentro de esta. Posteriormente se expondrán los distintos métodos que existen para dar solución al problema de optimización topológica y se explicará por qué el método de elementos finitos es el más apropiado para este proyecto. A continuación, se hará un recorrido de los *softwares* CAD que emplean el método de elementos finitos disponibles a día de hoy y se justificará la elección del utilizado en este trabajo. Más adelante, se explorará la forma teórica y experimental de abordar el evento de retroceso. Por último, se describirán métodos de trabajo empleados para proyectos similares y se analizará la fabricación aditiva como método óptimo para materializar el diseño.

2.1 Optimización estructural

2.1.1 Definición

El profesor de mecánica estructural Behrooz Hassani en su libro *Homogenization and Structural Topology Optimization*, describe la optimización estructural como: “el proceso para encontrar la mejor estructura que cumpla con todos los requisitos impuestos por la funcionalidad y condiciones de manufactura” [1].

2.1.2 Tipos de optimización estructural

La optimización estructural se subdivide en dos categorías, según métodos y tipos [2]:

1. Los métodos pueden ser incrementales o heurísticos. Los primeros asumen que hay una solución única y definida alcanzable con los medios disponibles; los segundos asumen que, o no hay solución única y definida, o que no es alcanzable con los medios disponibles, por lo que establecen unos límites de medios v. g. temporales, y buscan la mejor solución posible dentro de esos límites.

Los tipos pueden ser paramétricos, de forma o topológicos. Los primeros tienen como variable la sección transversal, los segundos la forma geométrica de la parte exterior de la malla, los terceros todo el dominio de la malla. La malla es el conjunto de elementos en los que se divide el volumen del objeto de estudio. La diferencia entre la optimización topológica y la de forma es que en la primera se generan cavidades en el proceso y en la segunda solo puede variar la morfología del contorno. En la ado

El aspecto clave para obtener un buen diseño utilizando una herramienta de *software* como Inventor ha sido definir detalladamente el problema: indagar sobre las ecuaciones existentes que tratan el retroceso y elegir la más apropiada, y establecer las restricciones. Existen muchas maneras de entender el evento de retroceso, y todas tienen su aplicación según el ámbito de trabajo. En este caso se ha considerado que entender la fuerza como resultado de la desaceleración de la energía de retroceso era lo más apropiado para evaluar la estructura.

A la luz de los resultados, el *software* de optimización topológica demuestra ser un capacitador clave que permite obtener resultados significativos y tener una fiabilidad suficiente en un espacio de tiempo relativamente corto. Además, permite transferir fácilmente el modelo a formato imprimible en 3 dimensiones. Por tanto, la metodología empleada en este TFG podría demostrar ser de gran ayuda para las fuerzas militares desplegadas en el extranjero y con líneas de comunicaciones que pueden verse afectadas en cualquier momento.

2.2 Líneas futuras

Las tecnologías de optimización topológica parten de un diseño humano y eliminan la materia que no aporta valor estructural. A día de hoy, este tipo de tecnología está dando paso a otro tipo más dependiente de la informática: el diseño generativo. Con este método se introducen valores de fuerza y límites espaciales debidos a las piezas colindantes en un *software* que genera hasta cientos de posibles diseños. El ingeniero luego puede decidir cuál escoger y pulir. Las estructuras que surgen de este tipo de programas suelen ser porosas e irregulares y, por tanto, no rentables con métodos de fabricación tradicionales. La evolución de la impresión 3D abre un nuevo abanico de posibilidades y hace viables estos proyectos.

Una posible continuación de este proyecto sería poner a prueba el diseño generativo como método para elaborar la culata de un fusil de asalto. Este es un campo que se está comenzando a explorar como se puede apreciar en la Figura 5-2.



2. Figura 5-2 Biatleta sueco y su carabina de diseño generativo se encuentra una descripción gráfica de estos tres tipos.

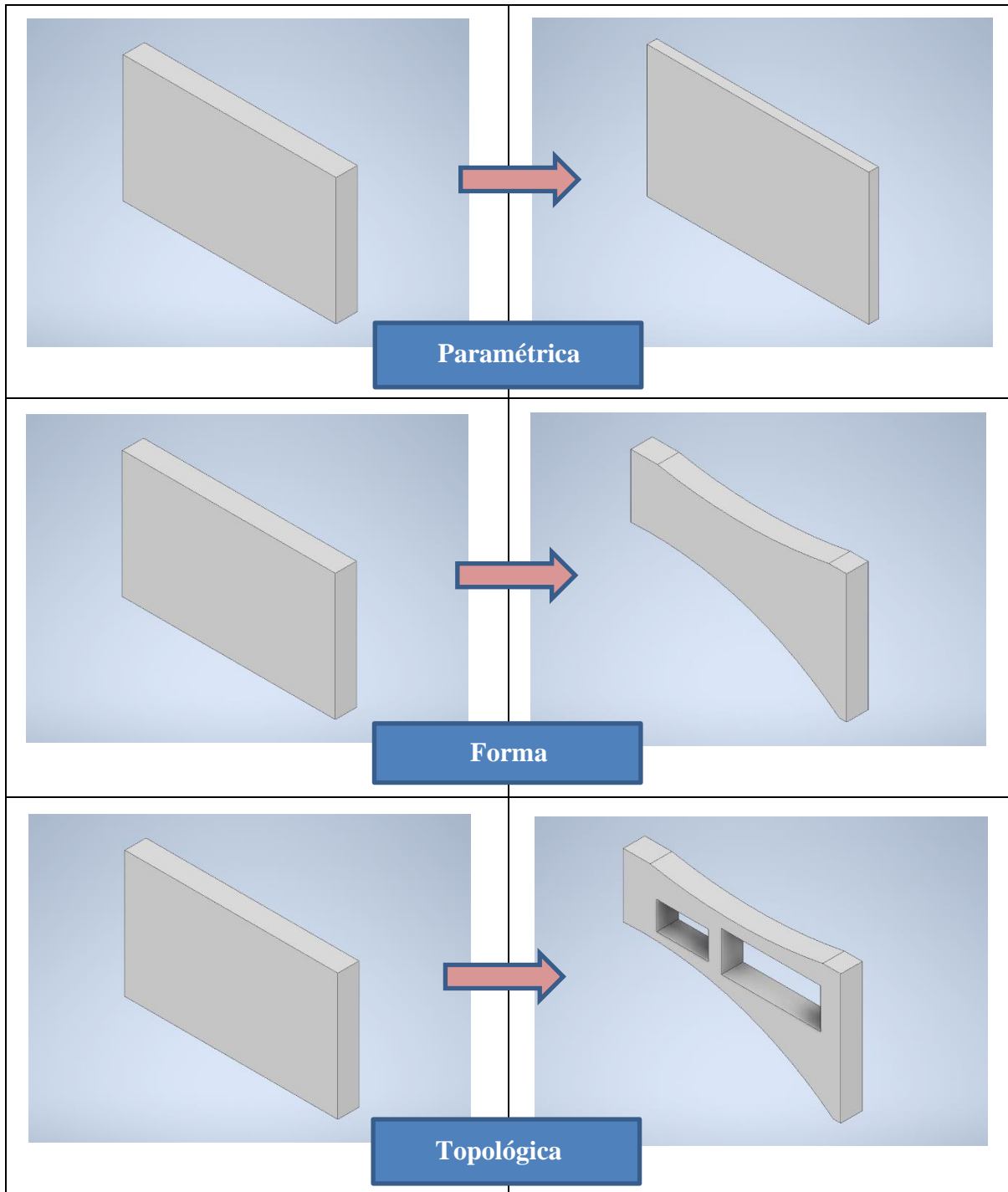


Figura 2-1 Tipos de optimización estructural

2.3 Problema de optimización topológica

2.2.1 Introducción al entorno de optimización topológica

Clásicamente, las tensiones de un conjunto se analizaban mediante el método matricial. Este se volvía inmensamente complejo al añadir una tercera dimensión; sin un ordenador potente, los cálculos son prácticamente imposibles de hacer. Además, lleva un tiempo considerable procesar la solución. Hoy en día, el método más extendido para fines de diseño e ingeniería es el de los elementos finitos.

2.2.2 Método de elementos finitos

En otros métodos, la geometría de la pieza se define como la suma de infinitas partes más pequeñas que constituyen un dominio continuo. El MEF propone que ese número infinito de variables desconocidas resultante de las cargas y restricciones de cada punto del continuo sean sustituidas por un número limitado, discretizando así el espacio al dividirlo en un número de elementos finitos. Las reglas de este método son las siguientes:

1. Los elementos adoptan la forma más conveniente según el problema, normalmente triangular o cuadrangular.
2. Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos llamados nodos.
3. El conjunto de elementos es la malla.

Esta simplificación del problema conduce a que las ecuaciones se resuelvan de manera aproximada. Cuantos más nodos tenga la malla, más exacta será la solución. Es posible hallar un número de nodos que permita una solución lo suficientemente precisa en un tiempo de procesado computacional aceptable, a diferencia de los métodos clásicos mencionados. La Figura 2-2 muestra un ejemplo de mallado MEF de elementos triangulares.

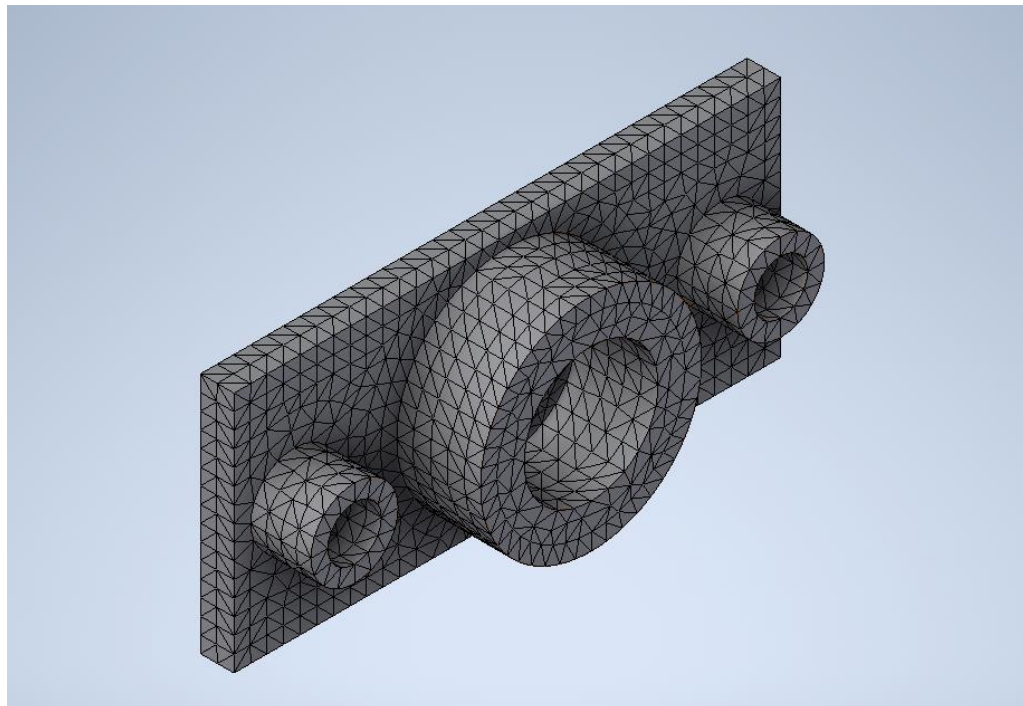


Figura 2-2 Ejemplo de malla MEF

2.2.3 Algoritmos utilizados en el entorno MEF para la optimización topológica

Los problemas de optimización se resuelven mediante algoritmos. La RAE define algoritmo como “conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema” [7]. En computación, sin embargo, un algoritmo se entiende como cualquier procedimiento que consista en aplicar una secuencia finita de procesos computacionales a unos datos de entrada para conseguir una solución [6].

Uno de los algoritmos más comunes en *software* CAE y que opera en un entorno MEF es el SIMP (Solid Isotropic Material Penalization). Este algoritmo es aplicable a materiales sólidos e isotrópicos, como es generalmente el caso de los materiales usados en impresión 3D. En este tipo de algoritmos, el dominio se divide en una malla de elementos finitos, llamadas microestructuras sólidas isotrópicas. Tradicionalmente, la función de densidad de estos elementos era discreta y binaria. Su valor era 1 donde hacía falta material y 0 donde no hacía falta material. Esta función pasó a ser continua y a estar comprendida entre un valor mínimo y 1. Los valores inferiores a 1 corresponden a regiones porosas y el valor mínimo, a la densidad mínima a partir de la cual se asigna realmente material. En estos casos, la función de densidad queda elevada a un valor de penalización p , cuyo objetivo es que la función tienda a 0 o 1 para simplificar el resultado. La función objetivo en estos casos suele ser maximizar la rigidez a pesar de la reducción de masa.

Antes de finalizar el proceso se realiza un análisis de sensibilidad. Este se expresa matemáticamente como la derivada de la función objetivo con respecto a la densidad de material y su propósito es descartar los elementos que tienen un factor de densidad bajo porque no aportan valor estructural. Además, se deben tomar medidas para evitar discontinuidades como el efecto tablero de ajedrez, como el que se muestra en la Figura 2-3. Este efecto puede tener lugar cuando se considera cada elemento independientemente, es decir, sin tener en cuenta la relación de conectividad entre elementos. La solución es filtrar el resultado inicial teniendo en cuenta áreas de influencia de cada elemento y asignando un valor medio por zona en vez de uno individual [8].

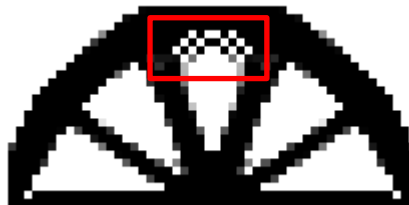


Figura 2-3 Efecto tablero de ajedrez [3]

2.2.4 Ejemplos de optimización topológica

La industria aeroespacial es de las que más utiliza la optimización topológica, por su necesidad de eliminar todo material que aporte peso a la estructura sin contribuir a soportar cargas. La Figura 2-4 y la Figura 2-5 muestran dos piezas de esta industria que han sido optimizadas. En estas imágenes se aprecia claramente cómo las zonas sometidas a más estrés, las rojas, se conservan en el modelo optimizado, mientras que las otras desaparecen, o se sustituyen por refuerzos simples y menos voluminosos de las zonas principales.

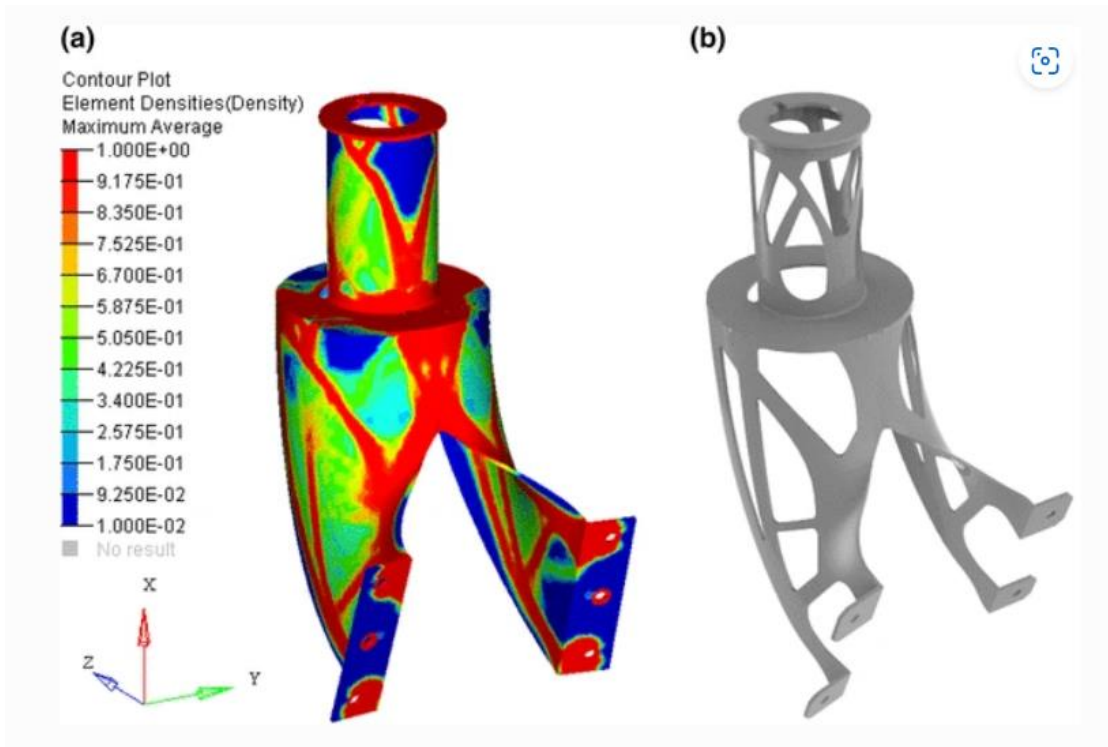


Figura 2-4 Soporte de conector de adaptador de carga útil [9]

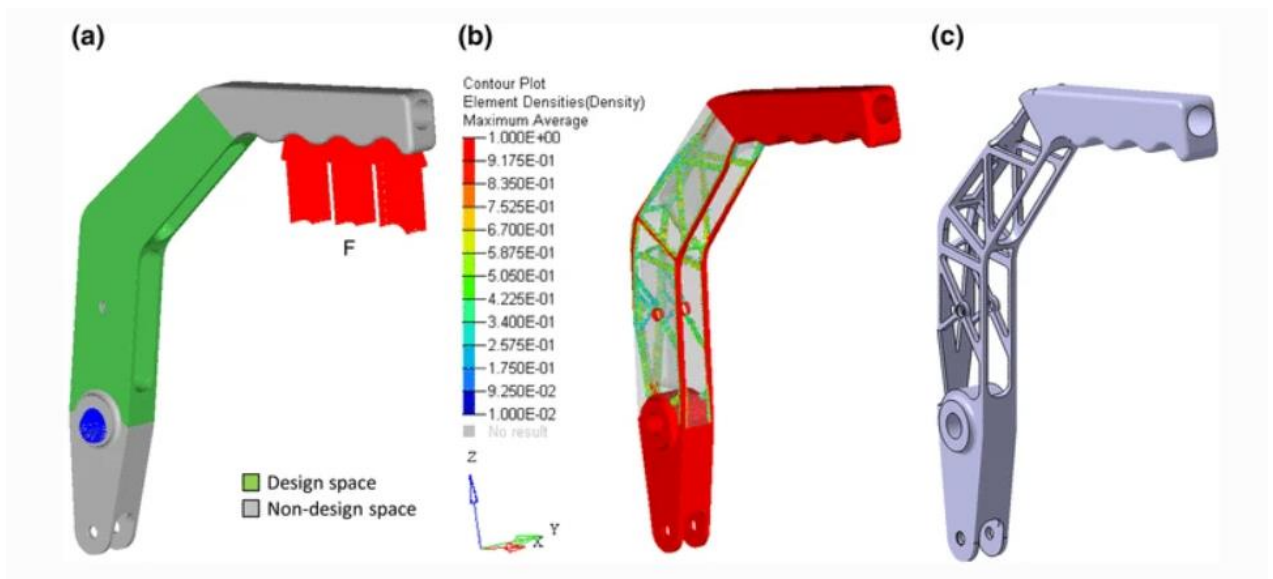


Figura 2-5 Palanca [9]

2.2.5 Programas que utilizan el MEF/SIMP actualmente

Hoy en día existen numerosos *softwares* que permitan realizar una optimización topológica. Estos son *softwares* CAD y CAE que proporcionan al usuario la capacidad de realizar diseños de piezas en 3 dimensiones y evaluarlos con diferentes tipos de análisis y simulaciones. En este proyecto, se han considerado tres: Altair Inspire, Ansys Discovery, Autodesk Inventor con Inventor Nastran.

En Autodesk Inventor se puede hacer el diseño inicial, optimizarlo y realizar un análisis de esfuerzo estático y modal, todo en un mismo *software*. La parte de optimización y análisis se hace en un entorno propio del programa. Sin embargo, la instalación del entorno Inventor Nastran permite un mayor control sobre los parámetros y capacidad computacional para resultados más precisos. La Figura 2-6 ilustra este entorno.

La ventaja de Altair Inspire respecto de Inventor es que es un *software* específico para diseño y optimización topológica. Sin embargo, es más difícil de adquirir y menos intuitivo, por lo que no es conveniente para un proyecto de corta duración. La Figura 2-7 ilustra este entorno.

Ansys Discovery es una herramienta potente orientada a la fase de diseño. Sin embargo, su aportación clave es la fidelidad de las simulaciones de conjuntos o sistemas complejos. Por ejemplo, Ansys Discovery permite simular el funcionamiento de un motor de cuatro tiempos, o el flujo de un líquido en una sección de tubería. Es una herramienta que está orientada a propósitos más complejos que el análisis de tensión de una pieza aislada. La Figura 2-8 ilustra este entorno.

En conclusión, Inventor es un *software* de calidad que permite realizar el proceso de diseño y análisis del producto sin cambiar de interfaz. No solo ofrece un cálculo potente y exacto de resultados gracias al entorno Inventor Nastran, sino que también el tiempo de aprendizaje es corto por ser intuitivo para el usuario.

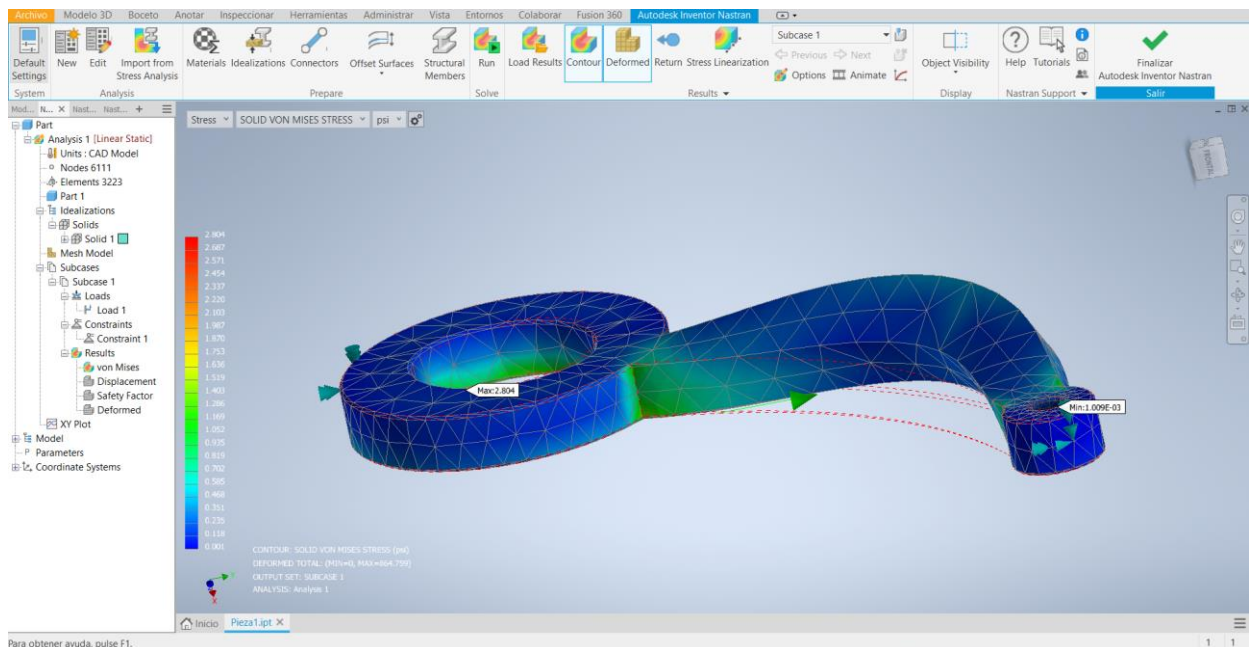


Figura 2-6 Entorno Inventor Nastran

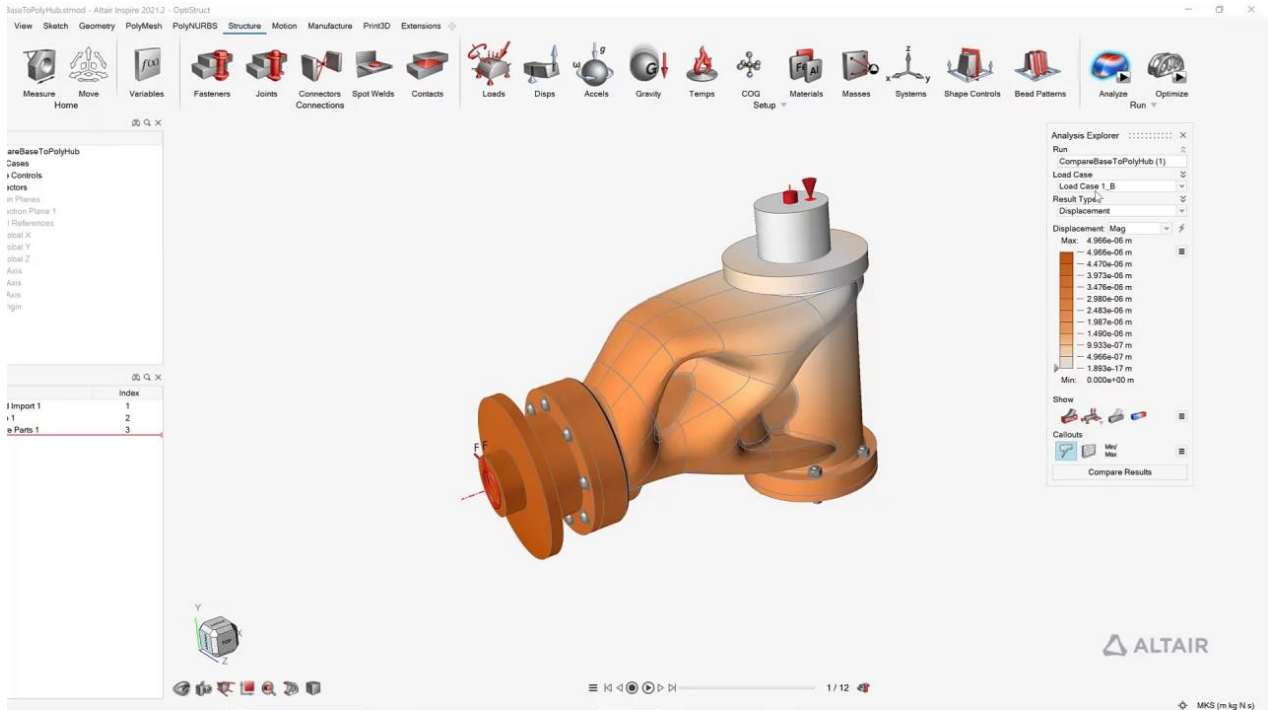


Figura 2-7 Entorno Altair Inspire [11]



Figura 2-8 Entorno Ansys Discovery [12]

2.4 Definición matemática del problema y toma de mediciones

2.3.1 Ecuaciones

Para saber si una culata soportará las cargas que genera cada disparo, previamente se deben conocer con exactitud la magnitud y dirección de estas cargas. El retroceso es un esfuerzo que ocurre en el eje longitudinal de un fusil y es fruto de la energía liberada al hacer fuego. El retroceso se puede deducir teóricamente mediante una ecuación que relacione los parámetros que influyen en el proceso de disparo.

Una método ampliamente utilizado para este propósito se basa en el principio de conservación del momento lineal y en la definición matemática de energía cinética [27]. En la ecuación (1) se muestra la relación de conservación de momento lineal entre la velocidad de retroceso (v_r) y la masa de la bala (m_b), la masa de la pólvora (m_p), la velocidad de salida de la bala (v_s) y la masa del fusil (m_f). Se puede apreciar que a la pólvora se le aplica un factor que aumenta su valor. Este corresponde a la mayor velocidad a la que se propaga. Una clara manifestación de ello es que, a pesar de que la masa de la pólvora es significativamente inferior a la de la bala, el retroceso percibido no ocurre hasta después de que esta haya abandonado el cañón, cuando los gases propelentes se liberan. Para generar mayor momento con menos masa, debe viajar a más velocidad. En la ecuación (2), se relaciona la energía retroceso (E_r) con la masa del fusil y la velocidad de retroceso.

Otra manera de entender el retroceso es calculando directamente la fuerza que se transmite al rifle como si estuviera en el vacío. Este método se basa en la tercera ley de Newton, la de acción y reacción. En la ecuación (3) se relaciona la fuerza de retroceso (F_r) con la masa de la bala, la masa de la pólvora y la aceleración de salida de la bala (a_s).

Un tercer método consiste en tener en cuenta la deceleración a 0, no la aceleración. A partir del primer método descrito sabemos que el fusil alcanzará una cierta velocidad por la ley de conservación del momento lineal. Esa velocidad lleva asociada una energía cinética que el hombro del tirador deberá absorber hasta reducirla a 0. Para que esto ocurra, deberá decelerar esa velocidad. La fuerza asociada a esa deceleración será la empleada para someter las piezas al análisis de tensión. Para ello es necesario conocer la velocidad de retroceso, tal como ha sido calculada en la ecuación (1), y conocer el tiempo de ciclo. El tiempo de ciclo medio en rifles es de 5 ms [26]. Aplicando las ecuaciones (4) y (5) se puede obtener un valor de fuerza de retroceso.

$$v_r = \frac{(m_b + 1.75 \cdot m_p) \cdot v_s}{m_f} \quad (1)$$

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot m_f \cdot v_r^2 \quad (2)$$

$$F_r = (m_b + 1.75 \cdot m_p) \cdot a_s \quad (3)$$

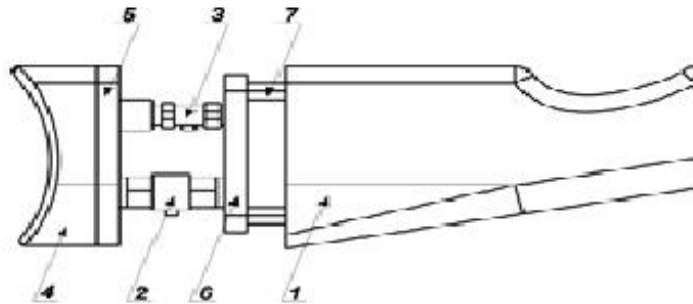
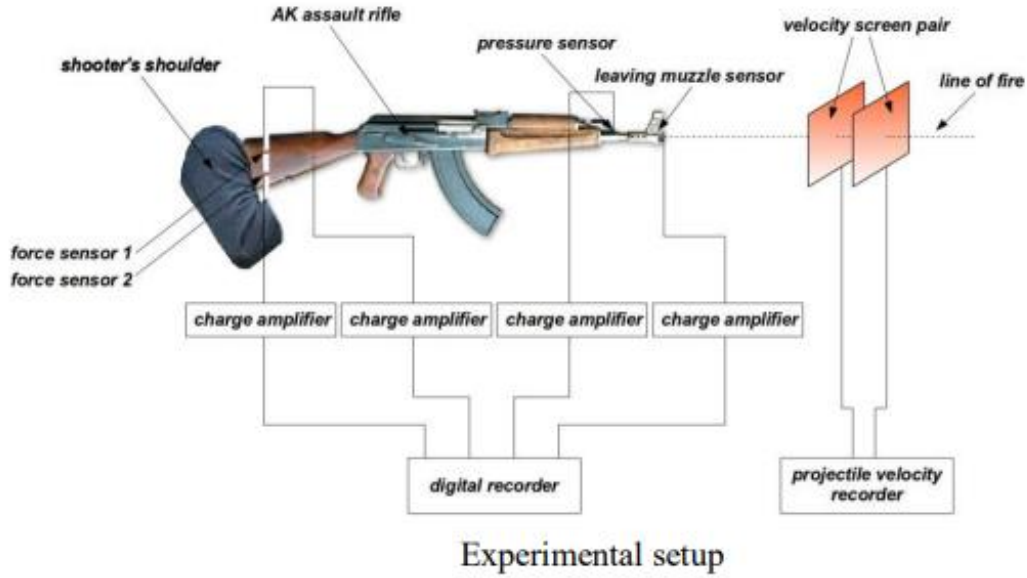
$$a = \frac{v}{t} \quad (4)$$

$$F = m \cdot a \quad (5)$$

2.3.2 Mediciones y sensores

Por otra parte, el retroceso se puede obtener de forma empírica. Mediante el empleo de sensores es posible tener una idea más precisa del comportamiento del fusil al disparar, y con los valores numéricos obtenidos deducir la magnitud del retroceso. Los sensores son transductores. Los transductores son capaces de transformar un tipo de energía de entrada en otro distinto de salida, generalmente en una señal eléctrica proporcional. Esta señal se puede medir y asociar a un valor equivalente a la magnitud física medida. Los sensores más comúnmente utilizados en este tipo de experimento son los de presión y los acelerómetros.

La desventaja de los sensores de presión radica en que su montaje es muy complejo y suele ser necesario hacer modificaciones en el arma. A continuación, la Figura 2-9 muestra un ejemplo de un proyecto de medición del retroceso del Kalashnikov con supresor. En la imagen se puede apreciar cómo se ha extraído una sección perpendicular al eje longitudinal para dividir la culata en dos y poder situar entre ambas partes los sensores sin modificar la longitud de la culata. Un sensor de presión que en vez de estar situado dentro de la culata se encuentre entre la culata y el hombro del tirador modificaría la postura del tirador. Sería como disparar con un arma distinta. Por tanto, el experimento no tendría validez.



Modified rifle butt: 1 – rifle butt, 2 – load cell model 9321, 3 – load cell model 9311, 4 – recoil pad, 5 – flat no. 1, 6 – flat no. 2, 7 – fixing

Figura 2-9 Ejemplo de implementación de sensores de presión [18]

Los sensores de aceleración, sin embargo, solo necesitan acoplarse al exterior del fusil. Así se muestra en la Figura 2-10. El acelerómetro se mueve solidario al fusil y permite conocer las aceleraciones en los tres ejes. Su instalación es mucho más simple, permite que no se altere la postura del tirador y que uno de los ejes esté alineado con el cañón, o al menos con el eje longitudinal del arma. Por tanto, la implementación de este tipo de sensor para un trabajo como este resulta idónea por su simplicidad y por la pertinencia de los resultados, ya que con la masa del rifle y su aceleración se puede deducir el esfuerzo que soporta la culata.



Figura 2-10 Ejemplo de sensor de aceleración [16]

2.5 Proceso de trabajo

La industria aeronáutica es la que más experiencia tiene en el ámbito de optimización topológica. Esta industria utiliza la metodología expuesta en el recuadro superior de la Figura 2-11 para obtener piezas más livianas con las mismas prestaciones. Se parte de una pieza inicial que se desea optimizar. Como se trata de una de las fases iniciales de diseño, se suele realizar un modelo simplificado de la pieza para ahorrar tiempo. Con este se puede deducir hacia dónde va a estar orientada la optimización. A esta se le aplican unas restricciones, generalmente de volumen. Este se puede definir como el volumen sin cavidades más pequeño que pueda contener la pieza. También puede haber restricciones de forma en los lugares donde se acople a otras piezas, por ejemplo manteniendo un agujero para alojar un perno. Después se define una malla para la pieza y se ejecuta el *software* de optimización. A partir del resultado, se rediseña la pieza y se comprueba si soporta los esfuerzos en un análisis de tensión. Existen muchos tipos: lineal estático, no lineal estático, modal, etc. Los diseñadores deben decidir cuáles se adaptan mejor al proyecto y evaluar la pieza según esos análisis. El proceso descrito es iterativo y finalizará cuando la pieza obtenida cumpla con los requisitos del fabricante.

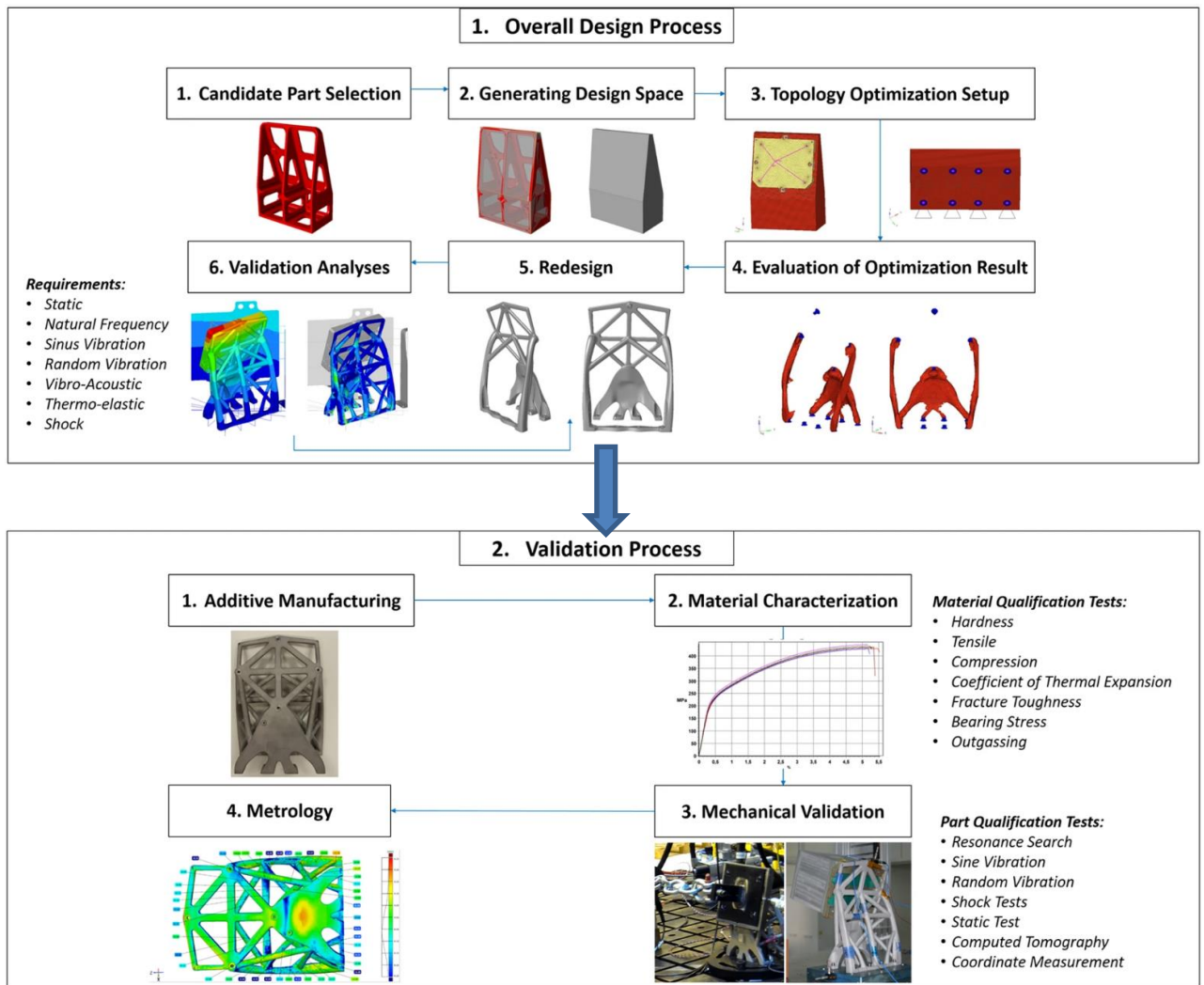


Figura 2-11 Proceso de optimización topológica [20]

2.6 Fabricación

Uno de los métodos más innovadores para construir piezas es la fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D. La razón de que se denomine aditiva es que rompe con el concepto tradicional de partir del material en bruto para sustraer materia hasta obtener la pieza. En fabricación aditiva se genera la pieza fabricando sección sobre sección a lo largo de un eje. La impresión 3D es particularmente apropiada para la fabricación de piezas que han pasado por un proceso de optimización topológica, ya que estas suelen tener una estructura compleja repleta de cavidades que sería muy difícil de realizar por sustracción de material. Las dificultades a la hora de emplear la fabricación aditiva dependen de tres factores [22]: el nivel de resolución, el acabado superficial y la resistencia mecánica.

1. El nivel de resolución es siempre mayor a lo largo del eje Z porque las impresoras tienen mayor precisión en este eje. Esto se debe a que en los ejes X, Y, la precisión se ve limitada por el ancho de la boquilla.
2. El acabado superficial depende principalmente de la necesidad de generar voladizos. Los voladizos perjudican el acabado en el momento de sustraerse. No ponerlos cuando son necesarios compromete la resistencia estructural.
3. La resistencia mecánica es mínima para vectores de fuerza contenidos en los planos perpendiculares al eje Z, es decir, en toda fuerza que provoque la separación de las capas. Esto se debe a que la resistencia de la unión entre capas es mucho menor a la resistencia del material en sí.

Por otro lado, se debe considerar que la impresión 3D no se puede realizar con cualquier material. Algunos de los materiales más utilizados en impresión 3D para la elaboración de piezas sometidas a esfuerzos mecánicos son el ABS, el nailon y el PETG. Las tablas Tabla 2-1, Tabla 2-2, Tabla 2-3, Tabla 2-4 y Tabla 2-5 muestran las propiedades básicas de cada uno de estos materiales y de sus dos refuerzos más frecuentes: la fibra de vidrio y la fibra de carbono.

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Resistencia a esfuerzos	Refuerzo de fibra de carbono o vidrio para funcionar como elemento mecánico
Resistencia a altas temperaturas	Altas temperaturas de impresión

Tabla 2-1 Propiedades del ABS

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Puede emplearse como elemento mecánico	Sensible a la humedad
	Altas temperaturas de impresión

Tabla 2-2 Propiedades del nailon

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Puede emplearse como elemento mecánico	Sensible a la humedad

Tabla 2-3 Propiedades del PETG

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Mejora las propiedades mecánicas	Dañino para el cabezal de impresión
Aporta ligereza	

Tabla 2-4 Propiedades de la fibra de carbono

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Mejora las propiedades mecánicas	Dañino para el cabezal de impresión

Tabla 2-5 Propiedades de la fibra de vidrio

3 DESARROLLO DEL TFG

En esta sección se pondrán de manifiesto los elementos que funcionarán como base para obtener el nuevo diseño de la culata por optimización topológica. Con estos parámetros y unas simplificaciones definidas, se puede realizar un análisis de tensión con un *software* CAE. Los empleados en este TFG han sido el *software* Inventor de la empresa Autodesk y el entorno Nastran. El criterio de éxito del nuevo diseño es alcanzar igual o menos tensiones y deformaciones que la culata original. Por eso, esta sección incluye un análisis pormenorizado de la pieza original para tener una base de datos de referencia. Se exponen también las alteraciones en el modelo para asegurar la fiabilidad de los resultados en Inventor y las simplificaciones aplicadas que diferencian la simulación de la pieza real. Por último, se enumeran a continuación los parámetros que definen cada una de las simulaciones y que se desarrollarán más adelante en el capítulo:

1. Propiedades físicas del material de la pieza.
2. Módulo, dirección y zona de aplicación de la fuerza ejercida.
3. Tipo y punto de aplicación de las restricciones.
4. Tipo y tamaño de malla.

3.1 Condiciones para el análisis

3.1.1 Material

Existe una discrepancia en las fuentes de internet sobre si el polímero del HK g36 E está reforzado con fibra de carbono o de vidrio. Si se toma de referencia la información de la página oficial de Heckler & Koch [30], se habla de refuerzo de fibra de vidrio. Sin embargo, como no se especifica en ninguna fuente cuál es el polímero que se refuerza, en un primer momento se consideró el ESTABLEND PA, una mezcla de ABS, PA6 y un 15 % de refuerzo de fibra de vidrio. Este plástico tiene alta estabilidad dimensional y alta resistencia al impacto y al calor. Estas propiedades lo hacen necesariamente similar al material usado en el fusil, pues cumple con sus prestaciones [25]. Sin embargo, este material no se encuentra en la biblioteca de Inventor.

El poliestireno de alto impacto fue el siguiente candidato. Es rígido como el original y se emplea industrialmente en la elaboración de armas y sus accesorios [32], pero al ponerlo a prueba surgían deformaciones muy por encima de las conocidas en la pieza real.

Por ello se ha optado finalmente por considerar el polímero reforzado con fibra de carbono, que es el que aparece en la página web de Heckler & Koch USA [31]. La biblioteca de entorno Inventor sí que contiene un polímero reforzado con fibra de carbono. Tiene un límite elástico de 300 MPa y un límite de rotura de 577 MPa.

3.1.2 Cargas

La primera de las cargas que se va a analizar en este trabajo corresponde a los provocados por la fuerza de retroceso del arma. Existen dos tipos de retroceso: el horizontal y el vertical. El horizontal provoca que la culata del fusil se comprima contra el hombro del tirador. Esta compresión puede potencialmente convertirse en pandeo, el cual afectaría significativamente a la integridad del arma. El retroceso de elevación genera un momento que provoca que la punta del fusil se distancie del suelo. Como la unión con el hombro no es un empotramiento, se ha despreciado como esfuerzo significativo sobre la culata.

Para obtener el valor teórico de la fuerza de retroceso horizontal se ha considerado en primer lugar la ley de conservación de momento lineal (ecuación 1): la eyección de la bala y los gases propelentes en un sentido provocarán en el fusil una velocidad equivalente de sentido opuesto. Los datos utilizados quedan recogidos en la Tabla 3-1.

Factor	Valor
Masa de la bala [28]	0.004 kg
Masa de la pólvora [28]	0.0017 kg
Masa del fusil con cargador lleno [29]	3.78 kg
Velocidad de salida de la bala [29]	920 m/s

Tabla 3-1 Datos para calcular la velocidad de retroceso

A partir de estos datos se ha podido obtener, en primer lugar, el valor de la velocidad de retroceso. A continuación se ha tenido en cuenta el tiempo de evento de retroceso como 5 ms [26], y se ha obtenido la deceleración necesaria para reducir la velocidad de retroceso a 0 en ese tiempo. Por último, entendiendo la fuerza como el producto entre masa y aceleración, se obtiene la fuerza ejercida por el hombro del tirador sobre la culata para frenarla. Los resultados numéricos se encuentran en la Tabla 3-2.

Factor	Valor
Velocidad de retroceso	1.94 m/s
Deceleración de retroceso	39.64 g
Fuerza de retroceso	1470 N

Tabla 3-2 Resultados de retroceso

Se quiere analizar también si el modelo entrará en resonancia. El rango de vibraciones a las que estará sometida la culata estará comprendido entre 0 y 12 Hz, ya que la cadencia máxima es de 720 disparos por minuto en tiro automático. Cualquier vibración que se encuentre a más de un 75 % del rango, es decir, 21 Hz, se descartará como irrelevante.

La fuerza elegida para las cargas laterales es de 1000 N, la media que es capaz de generar un ser humano en un puñetazo sin entrenamiento en artes marciales [34]. Este valor será con toda probabilidad superior al real, porque en un puñetazo se puede generar fuerza con el recorrido completo del brazo, mientras que el agarre del fusil limitará la libertad de movimiento.

Por último, los esfuerzos presentes en la pieza se evaluarán según la tensión de Von Mises. Esta es el resultado escalar de combinar las tensiones sufridas en los tres ejes del espacio. La tensión de Von Mises es ampliamente utilizada en ingeniería como criterio de validez mecánica del diseño de una pieza, especialmente para evaluar si supera el límite de fluencia [37].

3.1.3 Restricciones

Para poder entender las solicitaciones que se dan en el interior de la culata es necesario aplicar una serie de restricciones al modelo. En caso contrario, este podría moverse libremente por el espacio y no aparecerían tensiones internas. En el programa Inventor existen tres tipos de restricciones:

1. Fijas: suponen el equivalente a un empotramiento
2. De pasador: se aplica a secciones cilíndricas para evitar su deformación
3. Sin fricción: restringen el movimiento solo en el eje normal a la superficie.

En la superficie de contacto de la culata con el hombro del tirador se ha aplicado una restricción de tipo 3 y una de tipo 1 en dos nodos de esa superficie. Si se aplica una restricción fija a toda la superficie, se está considerando un empotramiento, lo que es falso, porque una fuerza de componente vertical lo suficientemente grande separaría el fusil del tirador, no provocaría su flexión. Por eso se ha aplicado la restricción sin fricción en toda la superficie mencionada, que solo limita el movimiento del fusil en su eje longitudinal. Las restricciones fijas limitan la cantidad de desplazamiento vertical y lateral porque la cantidad de desplazamiento real en esos ejes, aunque pueda darse, es mínima.

3.1.4 Simplificaciones

El comportamiento de la estructura de la culata durante el retroceso es peculiar. No se pueden encontrar fácilmente casos similares en otros ámbitos de las estructuras. Las vigas y pilares de un edificio soportan cargas estáticas y apenas se deforman. El armazón de un vehículo, cuando sufre un impacto violento, se deforma notablemente en pocos segundos. La culata sufre un esfuerzo repentino con duración de milisegundos y prácticamente no se deforma. Además, sus restricciones dependen de factores humanos: de cómo el tirador sujeta el arma, de cómo la sitúa en el hombro y de cómo controla su estructura corporal para absorber el impacto procurando desplazarse lo mínimo.

A falta de una modalidad de análisis que se adapte perfectamente a las condiciones reales, se ha utilizado el análisis lineal estático. En un análisis lineal estático se considera que se cumple la ley de Hooke, que los desplazamientos son directamente proporcionales a los esfuerzos y que la carga se aplica lentamente. Esto supone una simplificación porque el comportamiento real de la materia nunca es completamente lineal y, en este caso, la carga no se aplica gradualmente, sino de manera repentina. El análisis modal se ha empleado como adición secundaria. En este se considera si el ritmo al que se aplican las cargas, en este caso la cadencia de tiro, provoca que la pieza entre en resonancia y su estructura sufra deformaciones importantes.

Utilizar un análisis lineal estático no supone solo una simplificación, sino que es menos restrictivo que uno dinámico: lo que la culata no soporte estáticamente, no lo hará dinámicamente; pero no hay certeza de que lo que soporte estáticamente lo haga dinámicamente. Por eso para asegurar que no se diseñe una estructura insuficientemente resistente debido a esta simplificación, se ha impuesto la restricción de que las tensiones y las deformaciones en el modelo nuevo sean menores que en el original, ya que aunque los valores sean menores a los reales la proporción se mantendrá.

3.1.4 Singularidades

En ciertas simulaciones se han dado singularidades. Una singularidad mecánica es una zona donde las tensiones tienden a infinito. En una simulación de Inventor, esto puede ocurrir en ciertos vértices o aristas donde la superficie tiende a 0, ya que no son formas corpóreas, sino definidas matemáticamente. Como la tensión se expresa como una fuerza entre una superficie, donde la superficie tienda a 0, esta función tenderá a infinito. A la hora de analizar los resultados se debe tener en cuenta que los valores que muestra una singularidad no son acertados.

3.1.5 Conducción del análisis MEF

Cada análisis se definirá por: modelo, material, cargas, restricciones y malla. Con estos elementos se puede definir inequívocamente un estudio. Los resultados vendrán expresados en los valores numéricos de la tensión de Von Mises y el desplazamiento máximo, acompañados de imágenes para entender cómo están distribuidas las cargas y las deformaciones. También habrá un apartado de conclusiones donde se analicen las implicaciones de los resultados. Las preguntas empleadas para valorar cada estudio han sido:

- Si los resultados tienen sentido teniendo en cuenta lo que se conoce del comportamiento real de la pieza.
- Si la simplificación empleada es la causa de resultados anómalos.
- Si los modelos nuevos cumplen los estándares del original, especialmente en cuanto a deformación y coeficiente de seguridad.
- Cómo afecta la aparición de singularidades en la valoración del programa y si es necesario el uso de la herramienta de sonda. La sonda permite conocer el valor de la tensión en cualquier punto de la superficie.

3.2 Análisis de la culata original

3.2.1 Modelo de partida

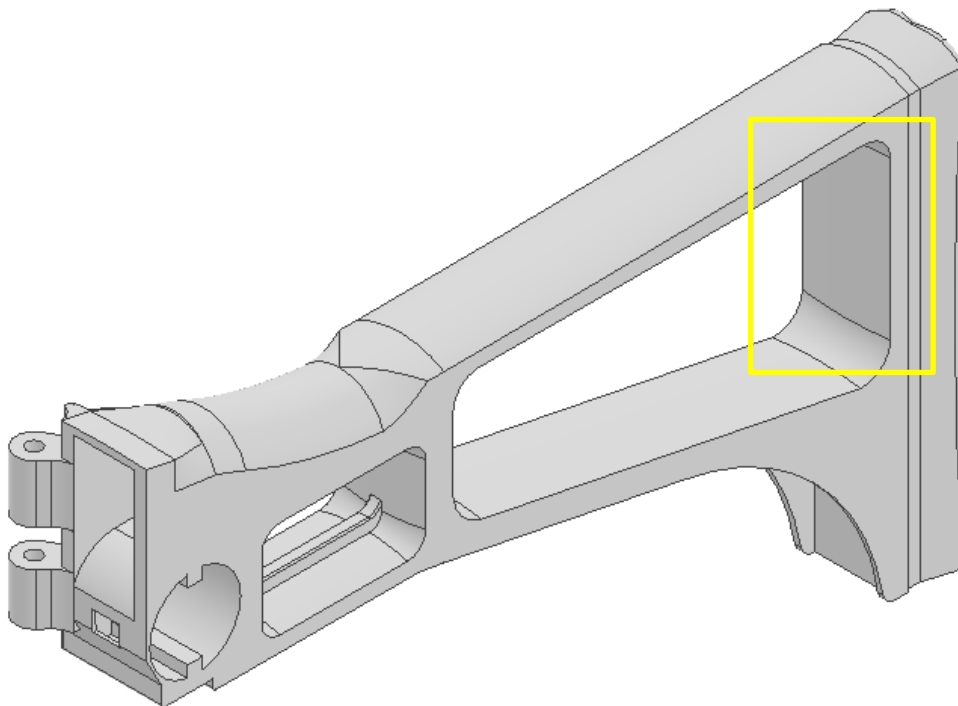


Figura 3-1 Aspecto simplificado 1 de culata original

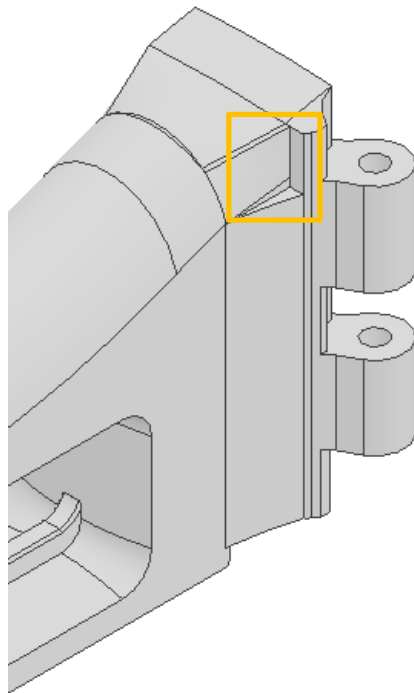


Figura 3-2 Aspecto simplificado 2 de culata original

Este modelo de culata está simplificado respecto del original. No cuenta con el nervio de la cavidad posterior (rectángulo amarillo en la Figura 3-1) ni tiene una superficie perfectamente continua cerca del acople (rectángulo naranja en la Figura 3-2). Se ha considerado que el nervio no aportaba apenas valor estructural; buscar la continuidad en la zona naranja generaba problemas en el mallado y tampoco se trata de una parte crucial de la estructura.

Para abordar el diseño de una culata hay que analizar todos los parámetros. La resistencia a la fuerza de retroceso es sin duda uno de los que se consideran, pero hay otros que no se deben obviar. Son los siguientes:

1. La ergonomía. Cómo la culata se adapta al hombro, con y sin chaleco de combate, y cómo la distancia de la culata permite al tirador poder acercar la cabeza al visor para entrar en miras sin comprometer la calidad de su posición de tiro. Se debe proceder con precaución si se busca variar los límites dimensionales de la pieza, en especial el largo, si no se desea perjudicar la ergonomía.
2. La cantidad de masa es un factor relevante, y no solo para la comodidad en el transporte. Un fusil con muy poca masa tendrá una velocidad de retroceso alta. Este es el factor que más influye en que el retroceso cause dolor al tirador. El dolor a su vez genera una reacción involuntaria de protección que perjudica el tiro. Por ello, la masa no debe reducirse indiscriminadamente.
3. La morfología de la culata determina cómo las fuerzas de retroceso se distribuyen en el hombro del tirador. No sería de extrañar que la morfología de la culata estuviese diseñada para reducir los efectos del retroceso de elevación. Como se aprecia en la Figura 3-3, el cañón está perfectamente alineado con la parte superior del fusil, que es la que soporta principalmente el retroceso frontal, como se demostrará más adelante. Pero las fuerzas que se transmiten por la parte inferior de la culata podrían contribuir a generar un momento contrario al retroceso de elevación.



Figura 3-3 Soldado empuñando HK g36 E [35]

4. La capacidad de utilizar el fusil como objeto contundente no puede ignorarse. En situaciones de espacios reducidos o de control de masas, un fusilero puede verse obligado a utilizar su fusil para golpear. Hay tres puntos con los que puede hacerlo: con la parte de la bocacha, con la zona central para empujar al enemigo, o con la culata. Por eso, la culata también se debe diseñar atendiendo a requisitos de aguante de cargas en direcciones distintas de las del retroceso.

A continuación se justificará el por qué se han hecho algunas alteraciones del modelo para analizar la culata. En la Figura 3-4 aparece en morado una línea recta que une el recorrido del ánima con el punto de la culata que está alineado con esta. Es en ese punto donde la fuerza se aplicará de forma perfectamente lineal. Aparece en rojo la fuerza de retroceso primaria que ocurre en el momento de hacer fuego y la fuerza de retroceso secundaria que ocurre por la redirección de los gases para hacer retroceder al conjunto del cierre y así poder expulsar la vaina e introducir un nuevo cartucho.



Figura 3-4 HK g36 E [36]

En un ejercicio de ingeniería inversa, se parte de la premisa de que la culata funciona y no falla por acción del retroceso. Esto se lleva poniendo de manifiesto desde 1996. Sin embargo, en los estudios realizados sobre la culata donde se consideraba que la fuerza de retroceso se aplicaba homogéneamente en toda la superficie de contacto con el cuerpo del fusil, aparecían deformaciones notables en la zona central, marcada en verde, a la altura del acople. En esta zona hay un espacio reservado para un muelle y una pieza móvil que se sitúa encima, con la que se asegura la culata al cuerpo del fusil en posición extendida. Sin embargo, sabemos que estas deformaciones no ocurren.

La Figura 3-4 muestra cómo la culata se puede dividir en tres áreas: dos naranjas, donde existe una presencia continua en el eje longitudinal de material, y una verde donde se encuentran las cavidades y la zona vulnerable que se ha mencionado. La interpretación es que los elementos que aportan valor estructural son los correspondientes a las zonas naranjas y al elemento vertical que sirve de contacto con el hombro y de nexo entre las zonas naranjas. Las razones de que haya material en algunas partes de la zona verde no guardan relación con la robustez estructural:

- El elemento que separa las cavidades se utiliza para asegurar la culata al fusil cuando esta se pliega.
- La zona vulnerable mencionada se utiliza para asegurar la culata al fusil cuando esta se encuentra desplegada.
- El nervio de la cavidad superior sirve para poder asegurar un extremo de la correa del fusil.

Por eso, uno de los modelos considerados contiene unas alteraciones en la morfología de la cara frontal que permiten aplicar la fuerza selectivamente en las zonas superior e inferior sin que la zona central sufra esfuerzos.

3.2.1 Análisis del modelo real incluyendo el acople original

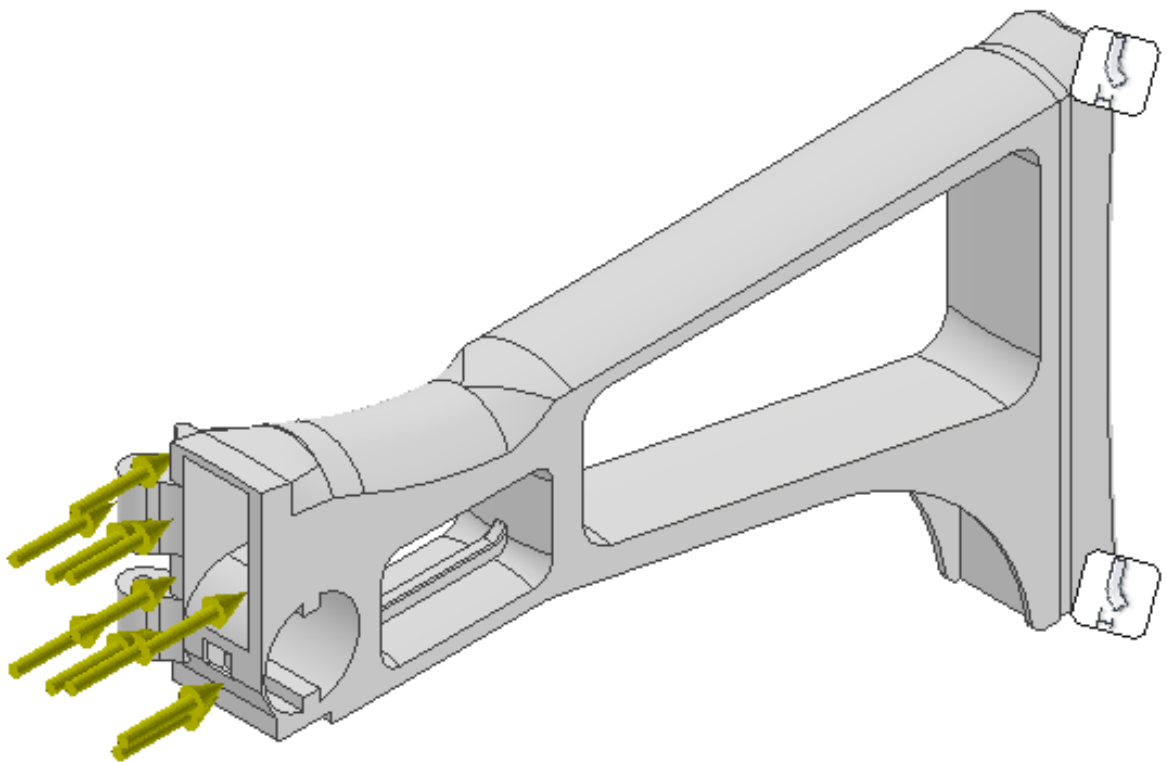


Figura 3-5 Modelo original

Justificación del modelo

En el caso de la Figura 3-5, no se ha realizado ninguna simplificación de la aplicación de fuerzas. Se ha aplicado la fuerza repartida entre todas las caras que entran en contacto con el cuerpo del fusil. La fuerza es paralela al eje longitudinal en todas las superficies, no perpendicular a estas. La configuración utilizada aparece en la Tabla 3-3.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga repartida de 1470 N
Restricciones	2 nodos fijos, la cara posterior restringida solo en el eje longitudinal
Malla	Tamaño medio de elemento 0.1
	Tamaño mínimo de elemento 0.2
	Número de elementos 6628

Tabla 3-3 Configuración para modelo original

Análisis lineal estático

Resultados del análisis lineal estático en Tabla 3-4, Figura 3-6, Figura 3-7 y Figura 3-8.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	21.48 MPa
Desplazamiento	0.12 mm

Tabla 3-4 Resultados de modelo original

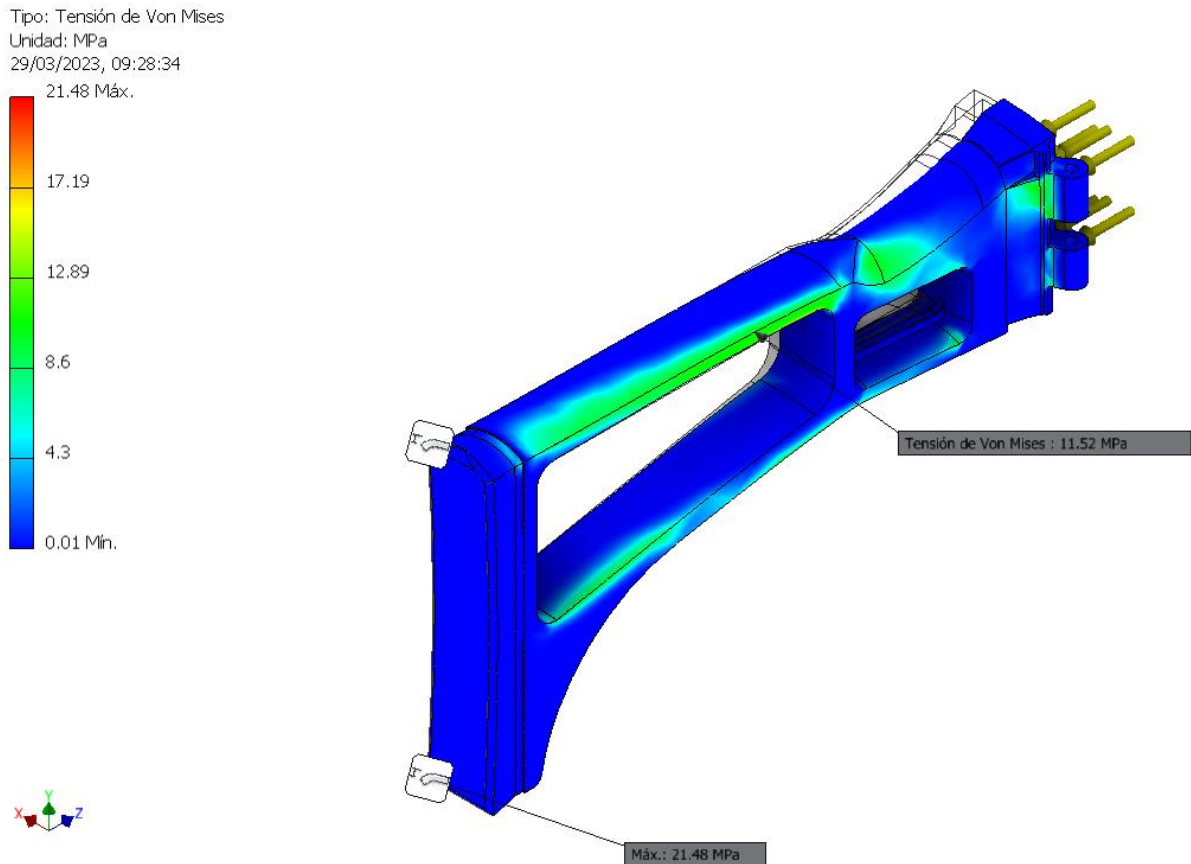


Figura 3-6 Tensión de Von Mises

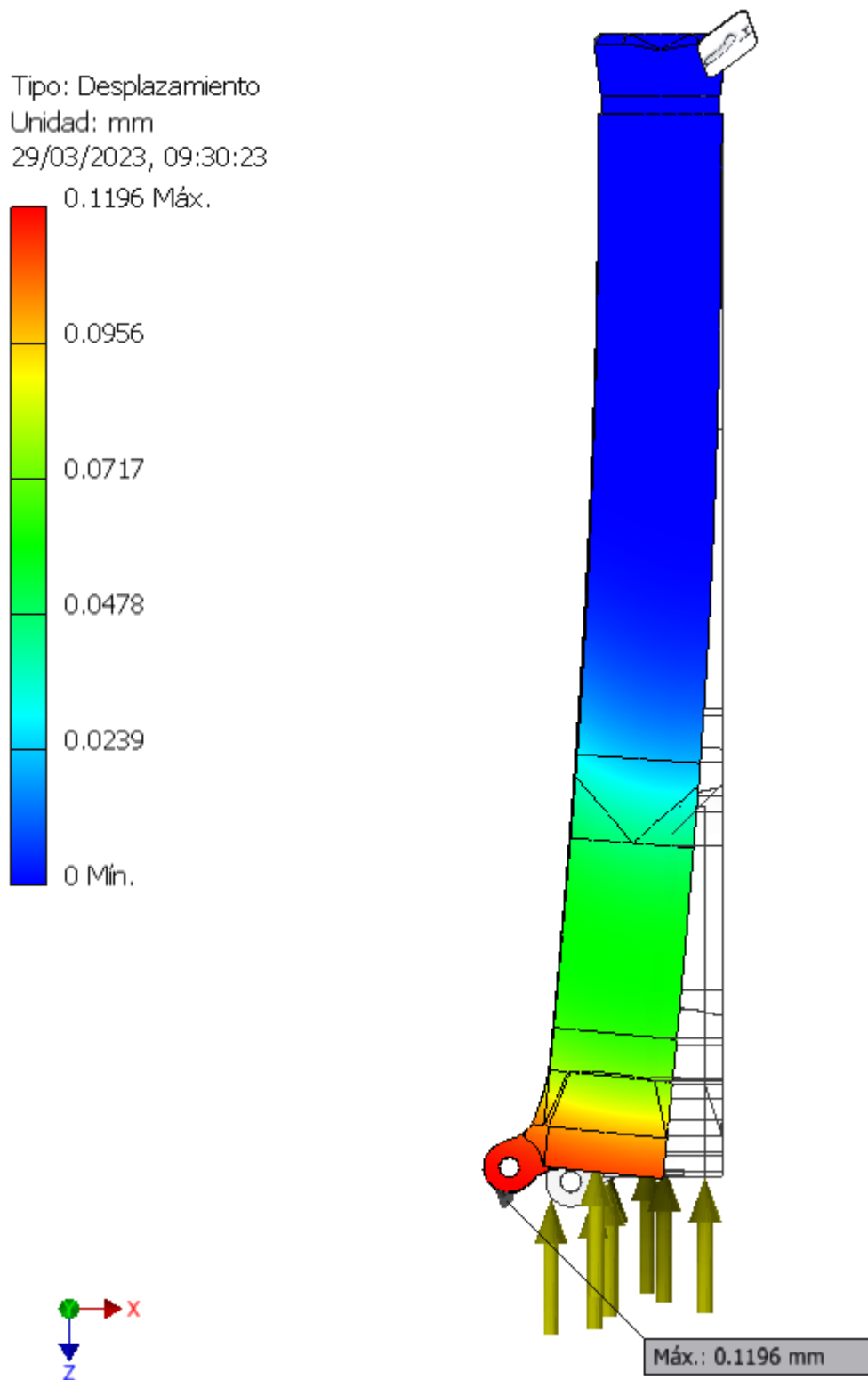


Figura 3-7 Desplazamiento máximo 1

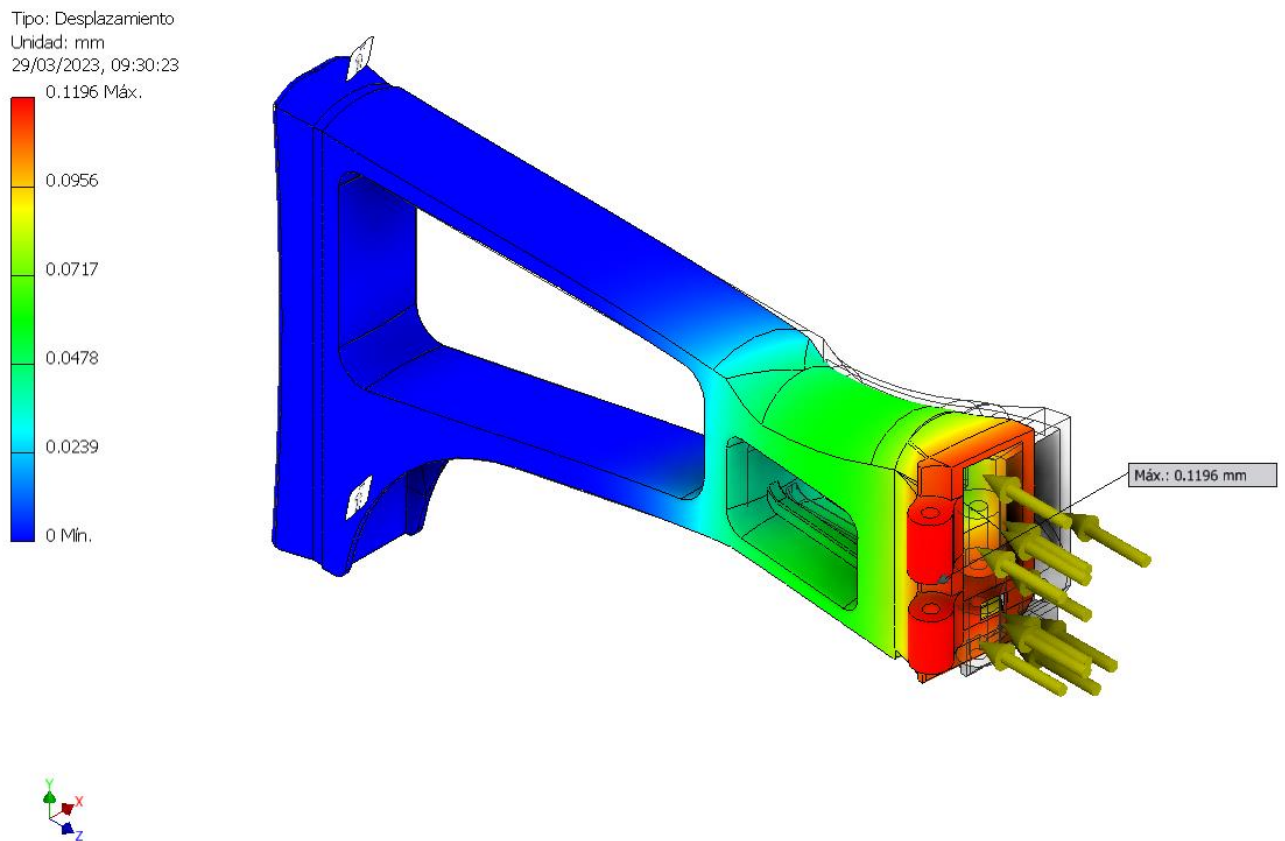


Figura 3-8 Desplazamiento máximo 2

Análisis modal

Entra en resonancia a partir de 545.97 Hz, frecuencia muy por encima de la producida por la cadencia de tiro.

Conclusiones

Cabe remarcar que el valor de 21.38 MPa corresponde a zonas puntuales cercanas a aristas de la cara restringida, y que por lo demás se encuentran tensiones de hasta 11.5 MPa. Se trata con toda probabilidad de una singularidad. El primer motivo de alarma al analizar los resultados es que se generan asimetrías tanto en los esfuerzos como en los desplazamientos. Los mayores esfuerzos aparecen en el lado de los elementos de sujeción del perno y en la parte de la cara que da al espacio cilíndrico. La deformación es mayor en el plano horizontal que en el vertical, y está orientada en la misma dirección de los esfuerzos máximos. En el plano horizontal, es de 0.11 milímetros. Aunque sea casi 10 veces inferior al milímetro, se da fuera del plano vertical, lo que sera perjudicial para la precisión del arma.

3.2.2 Análisis del modelo real: Simplificación 1

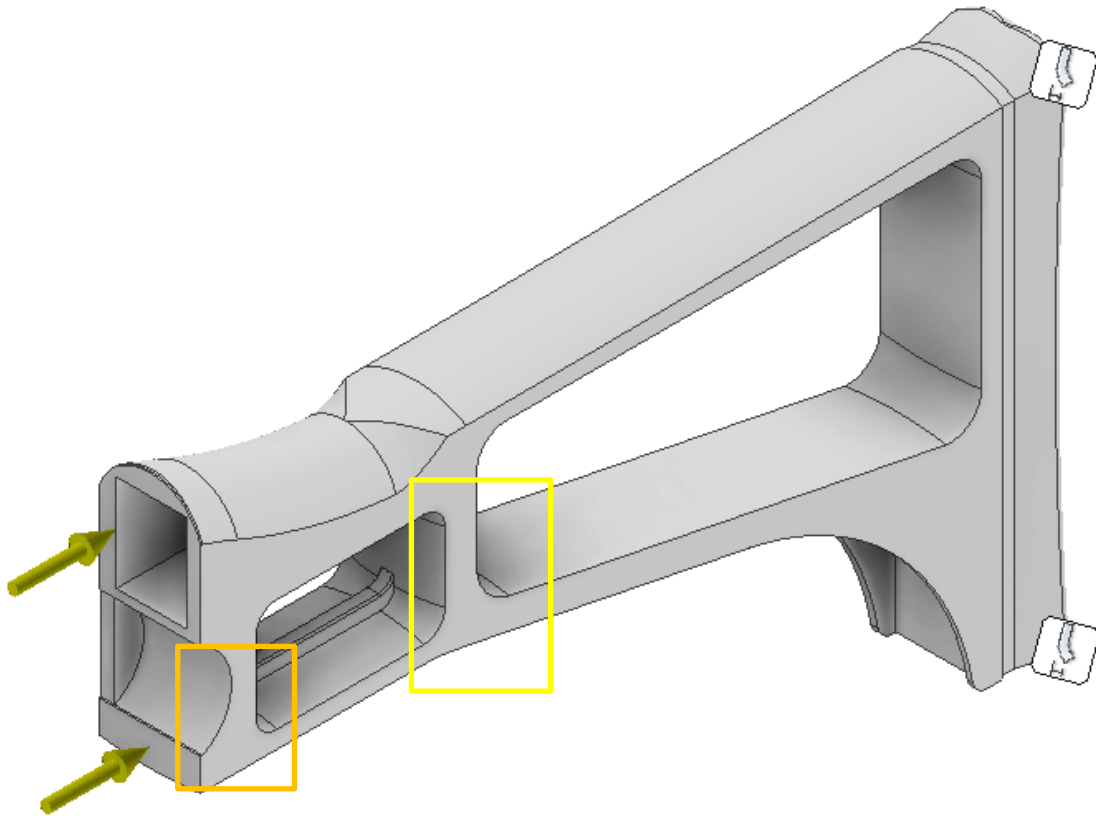


Figura 3-9 Simplificación del modelo original 1

Justificación del modelo:

El modelo de la Figura 3-9 es el resultado de realizar un corte para eliminar la zona del acople. Esto se ha decidido así porque se ha deducido que el modelo original solo necesita como soportes estructurales la parte superior e inferior del modelo, y que la parte intermedia podría quedar hueca. En la práctica no está hueco porque la separación de cavidades se utiliza para fijar la culata al fusil cuando se pliega (amarillo) y la parte más cercana al fusil aloja un elemento móvil que permite la fijación de la culata al fusil cuando se despliega (naranja). También se omite la parte de la estructura que aloja el perno que permite la rotación de la culata respecto del fusil. Esta generaría una asimetría en la distribución de esfuerzos que es imposible que se dé en la culata real. La configuración utilizada aparece en la Tabla 3-5.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga repartida de 1470 N
Restricciones	2 nodos fijos, la cara posterior restringida solo en el eje longitudinal
Malla	Tamaño medio de elemento 0.1
	Tamaño mínimo de elemento 0.2
	Número de elementos 5718

Tabla 3-5 Configuración para simplificación del modelo original 1

Análisis lineal estático

Resultados del análisis lineal estático en Tabla 3-6, Figura 3-10 y Figura 3-11.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	9.78 MPa
Desplazamiento	0.028 mm

Tabla 3-6 Resultados de simplificación de modelo original 1

Tipo: Tensión de Von Mises
Unidad: MPa
29/03/2023, 09:34:08

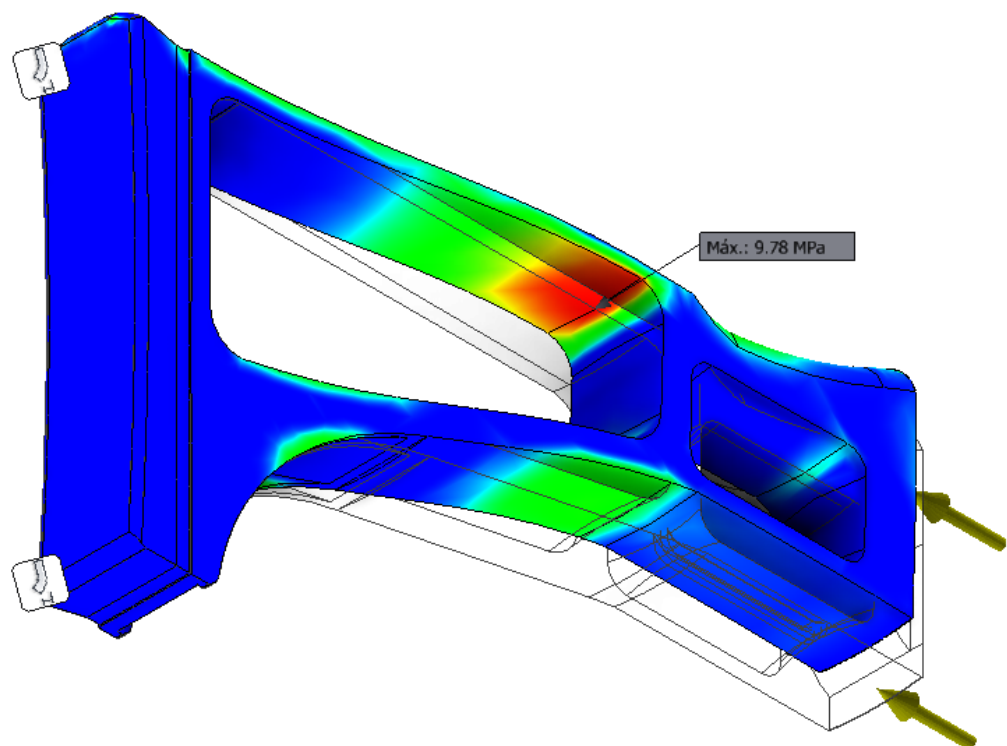
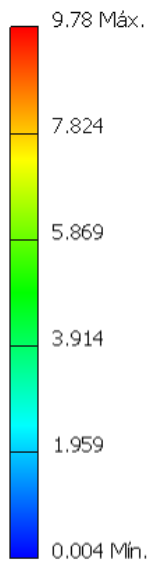


Figura 3-10 Tensión de Von Mises

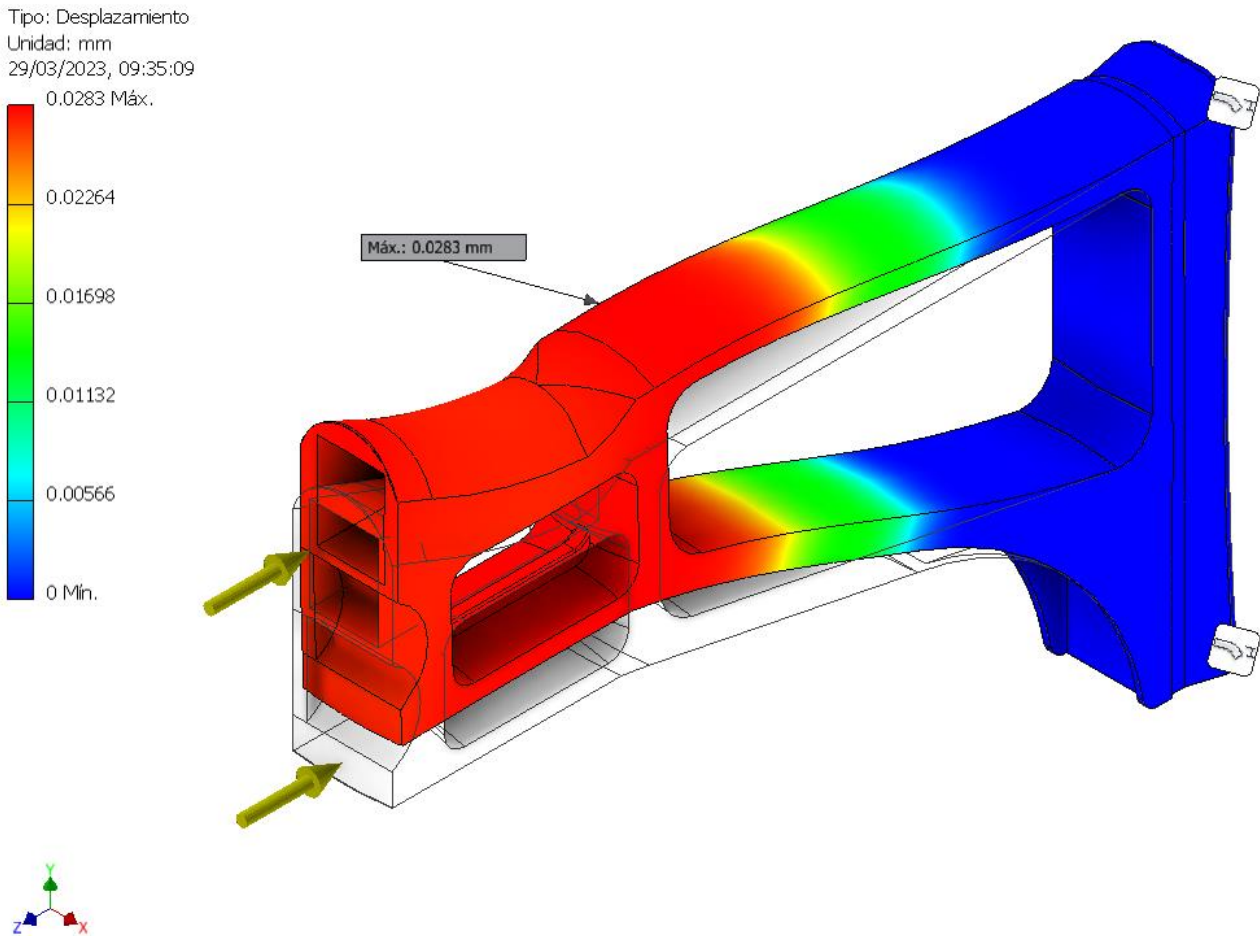


Figura 3-11 Desplazamiento máximo

Análisis modal

Entra en resonancia a partir de 689.88 Hz, frecuencia muy por encima de la producida por la cadencia de tiro.

Conclusiones

Los resultados son coherentes con el comportamiento real de la culata al disparar. El desplazamiento máximo es unas 30 veces inferior al milímetro y la tensión de Von Mises es de prácticamente 10 MPa, lo que asegura un coeficiente de seguridad de 30. Este es 3 veces superior al utilizado en cables de acero [33]. Un factor de seguridad tan grande en este análisis no implica necesariamente que la pieza esté sobredimensionada porque las esfuerzos más agresivos no ocurrirán por efecto del retroceso, sino por el uso de la culata para golpear.

3.2.2 Análisis del modelo real incluyendo el acople modificado

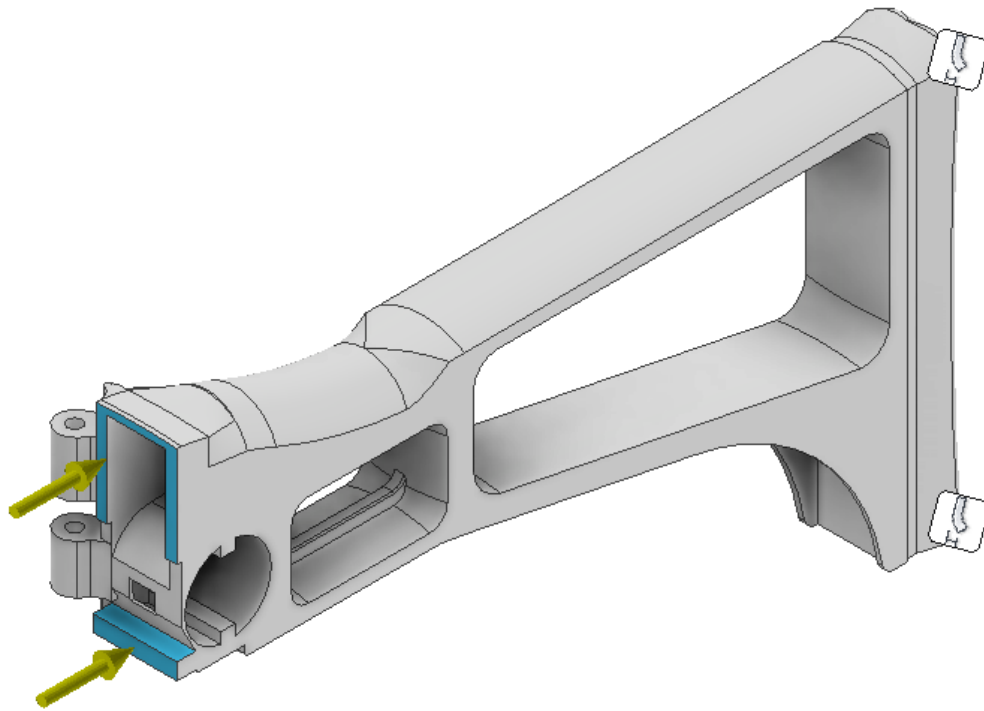


Figura 3-12 Simplificación del modelo original 2

Justificación del modelo

El modelo de la Figura 3-12 es una iteración del anterior y es más completo. Se ha añadido el acople y se sigue considerando que las cargas se transmiten únicamente por las secciones superior e inferior. Por eso se ha modificado la cara frontal, generando dos extrusiones que alargan las secciones superior e inferior para poder aplicar carga selectivamente. La configuración utilizada aparece en la Tabla 3-7.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga repartida de 1470 N
Restricciones	2 nodos fijos, la cara posterior restringida solo en el eje longitudinal
Malla	Tamaño medio de elemento 0.1
	Tamaño mínimo de elemento 0.2
	Número de elementos 5784

Tabla 3-7 Configuración para simplificación del modelo original 2

Análisis lineal estático

Resultados del análisis lineal estático en Tabla 3-8, Figura 3-13 y Figura 3-14.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	9.48 MPa
Desplazamiento	0.03 mm

Tabla 3-8 Resultados de simplificación de modelo original 2

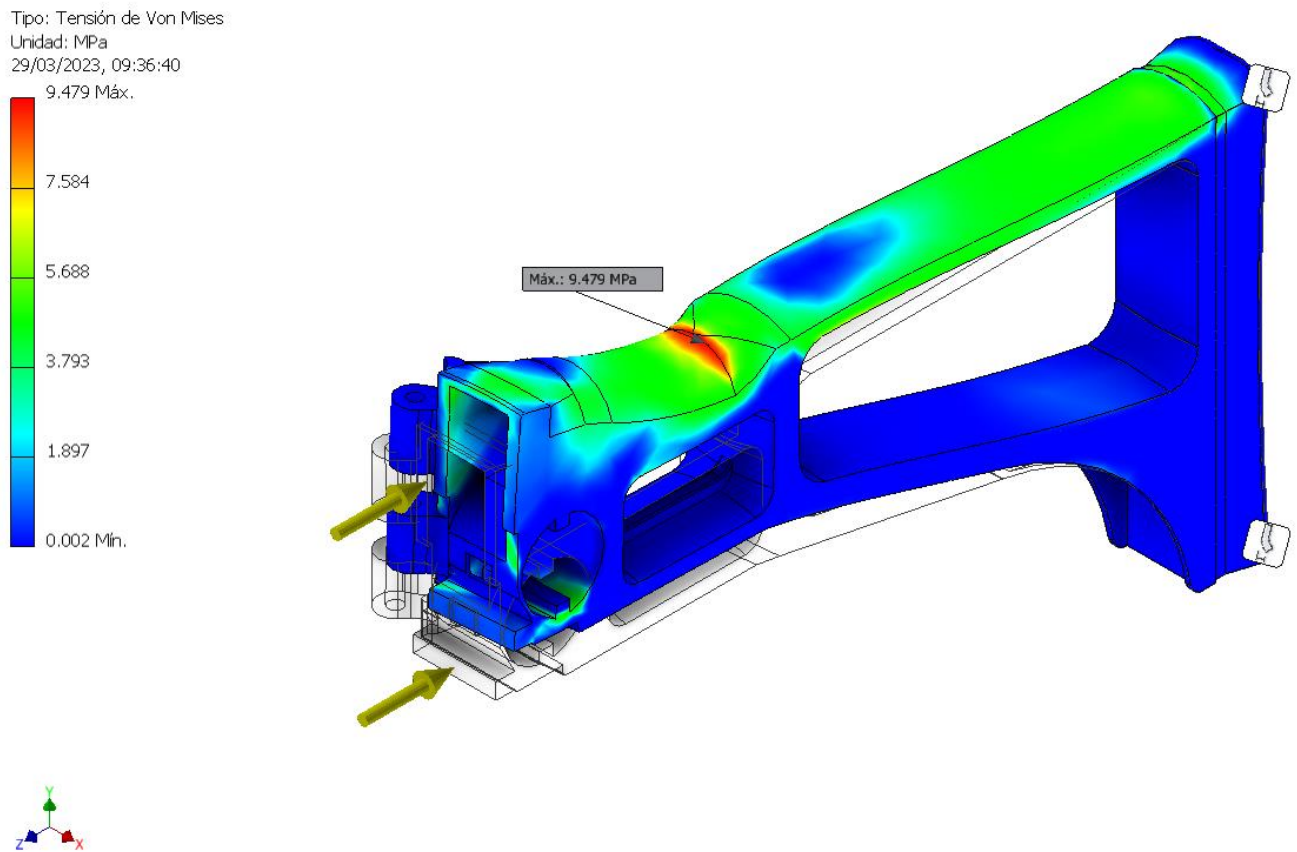


Figura 3-13 Tensión de Von Mises

Tipo: Desplazamiento
Unidad: mm
29/03/2023, 09:40:21

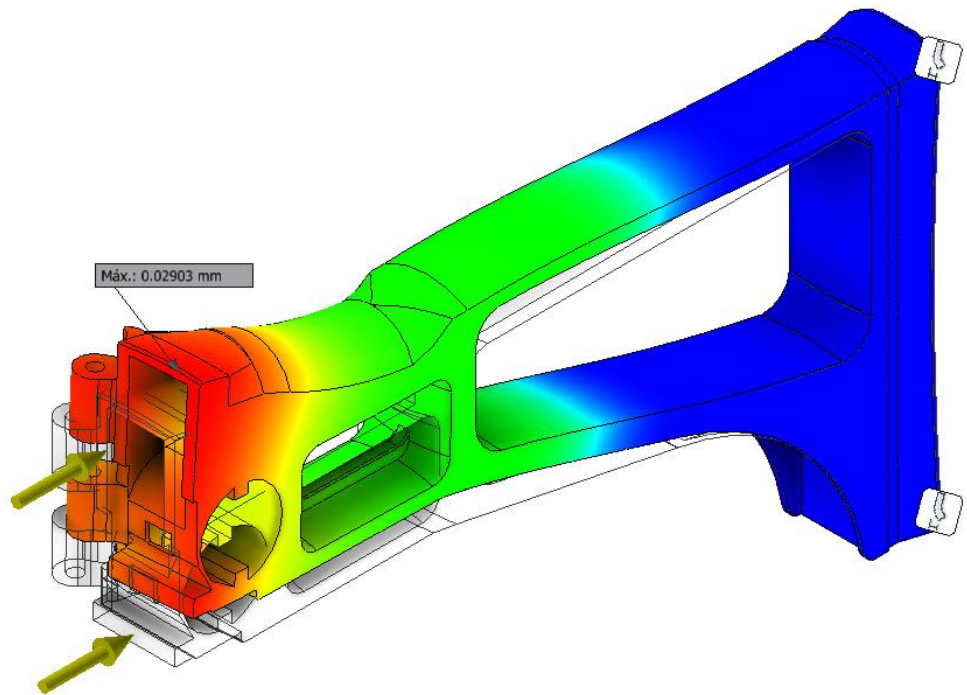
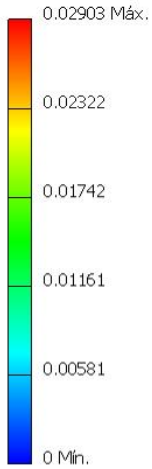


Figura 3-14 Desplazamiento máximo

Análisis modal

Entra en resonancia a partir de 536.57 Hz, frecuencia muy por encima de la producida por la cadencia de tiro.

Conclusiones

Los resultados son prácticamente iguales a los del estudio anterior: el desplazamiento es 30 veces inferior al milímetro y la tensión de Von Mises no alcanza los 9.5 MPa. Cabe remarcar que el espacio cilíndrico próximo al frente y los soportes del perno sufre la deformación máxima, pero, como se ha establecido antes, esta es tan pequeña que se considera aceptable. La gran diferencia que existe entre este modelo y el anterior es que en el presente la geometría prácticamente no se ha alterado. Las extrusiones de la cara frontal no tienen el propósito de modificar la calidad de la estructura, sino permitir la aplicación selectiva de las cargas.

3.2.3 Análisis del modelo original para cargas laterales

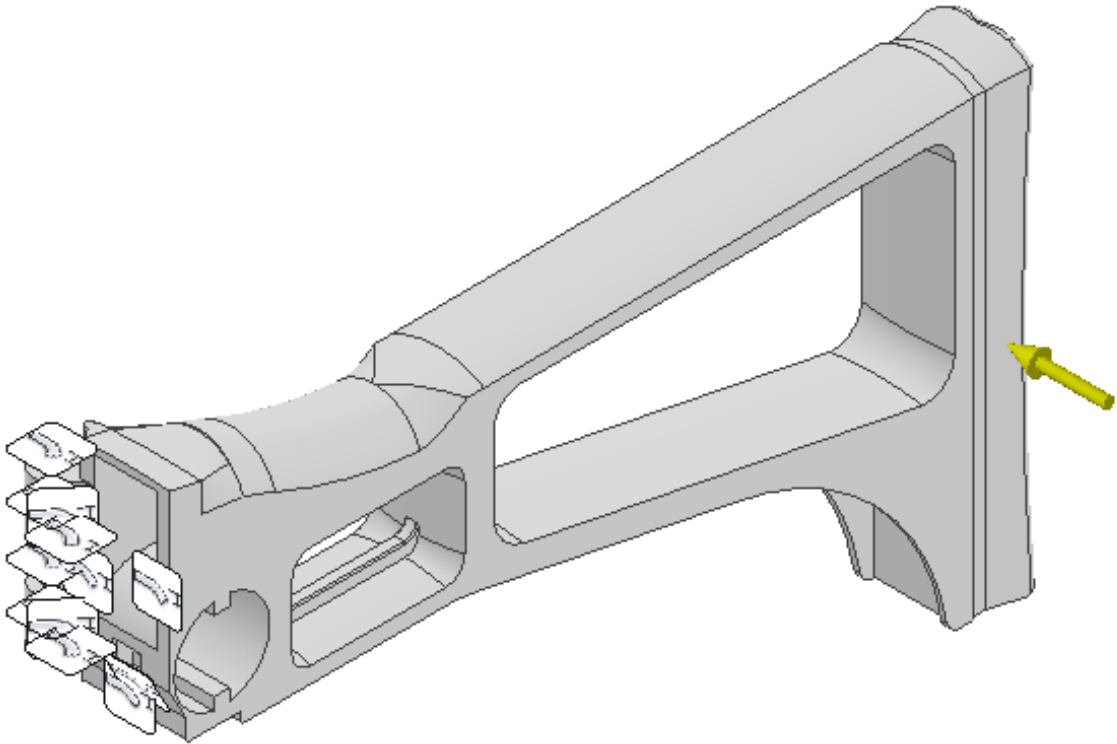


Figura 3-15 Modelo original bajo cargas laterales

Justificación del modelo

El análisis de los esfuerzos laterales no presenta dificultades a la hora de aplicar las fuerzas y las restricciones. Como se muestra en la Figura 3-15, la cara del acople queda completamente restringida, pues no tendrá movimiento relativo respecto del cuerpo del fusil en ningún sentido. La fuerza se aplica en la zona más alejada del acople, donde generará mayores sollicitaciones y donde es más probable que suceda el impacto realmente. La configuración utilizada aparece en la Tabla 3-9.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1000 N
Restricciones	Cara frontal restringida en todos los ejes
	Tamaño medio de elemento 0.1
Malla	Tamaño mínimo de elemento 0.2
	Número de elementos 6628

Tabla 3-9 Configuración para modelo original bajo cargas laterales

Análisis lineal estático

Resultados del análisis lineal estático en Tabla 3-10, Figura 3-16 y Figura 3-17.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	197.8 MPa
Desplazamiento	1.5 mm

Tabla 3-10 Resultados de modelo original bajo cargas laterales

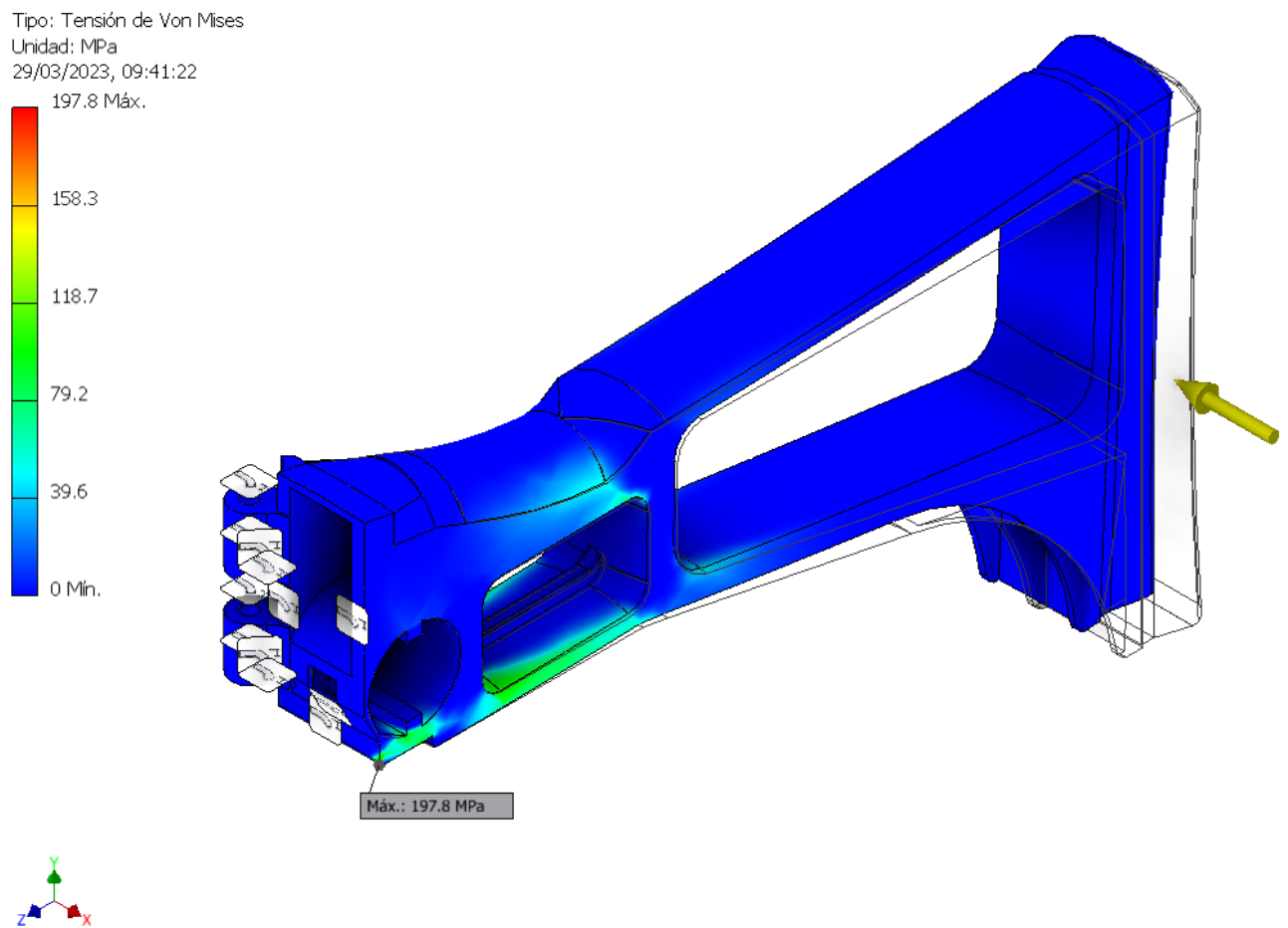


Figura 3-16 Tensión de Von Mises

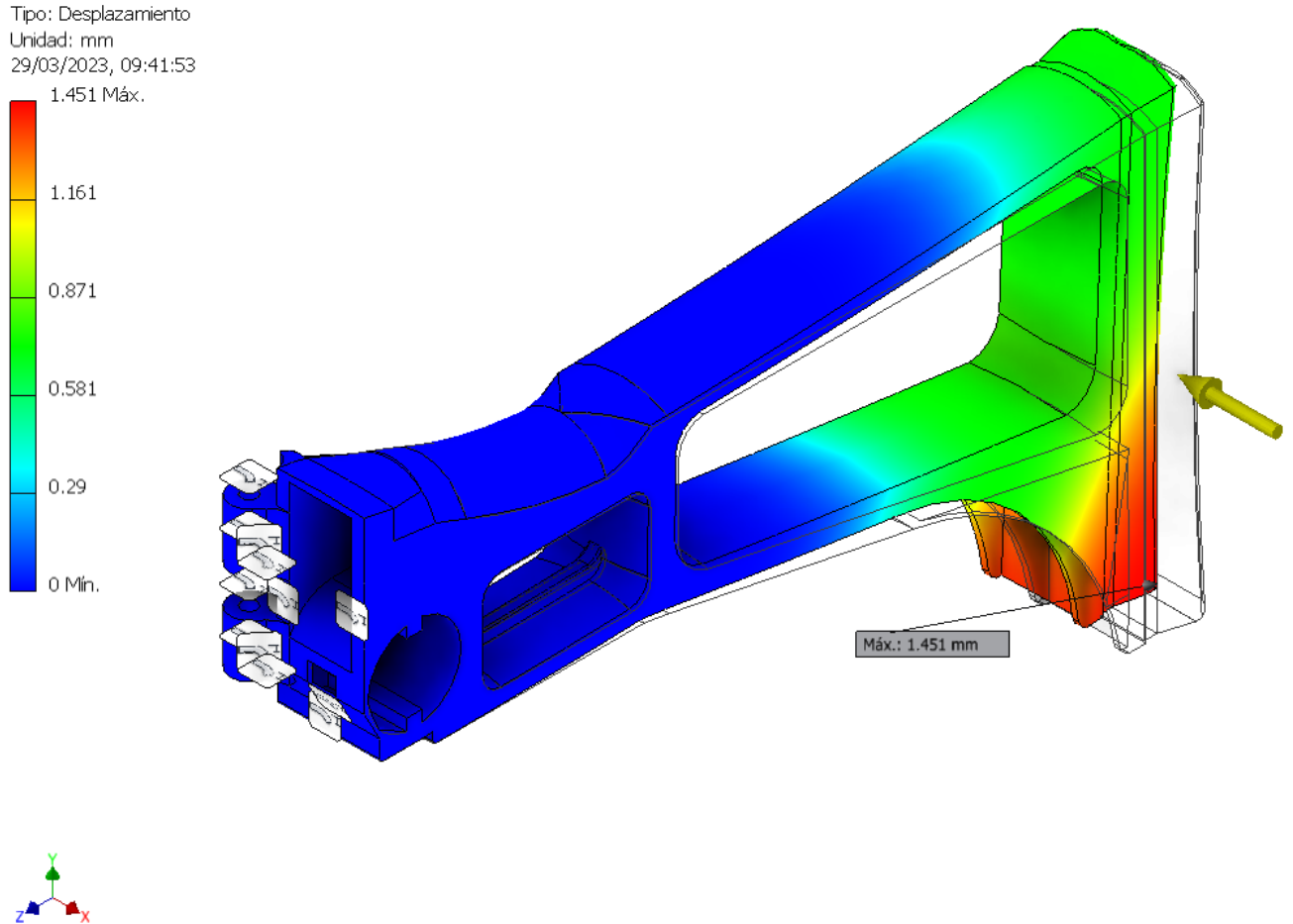


Figura 3-17 Desplazamiento máximo

Conclusiones

La aparición de singularidades en los resultados tiene gran influencia en este estudio. Se puede apreciar en la Figura 3-18 que la tensión máxima solo aparece en la convergencia de aristas, pero que no es característica de las zonas circundantes. Si aumentamos el número de nodos, se aprecia que el tamaño de la singularidad disminuye, pero que su valor aumenta (Figura 3-19). El valor de la singularidad no describe el comportamiento de la pieza porque aquella es producto de que el *software* considera la convergencia de aristas una entidad matemática de superficie nula, lo que no coincide con la realidad. Lo más acertado es tomar el valor de las zonas cercanas a la singularidad, donde la sollicitación ocurre en una superficie. Para asegurar la validez de este método, se realizará un modelo de la culata simplificado para reducir el número de aristas y así poder comparar resultados (Figura 3-20).

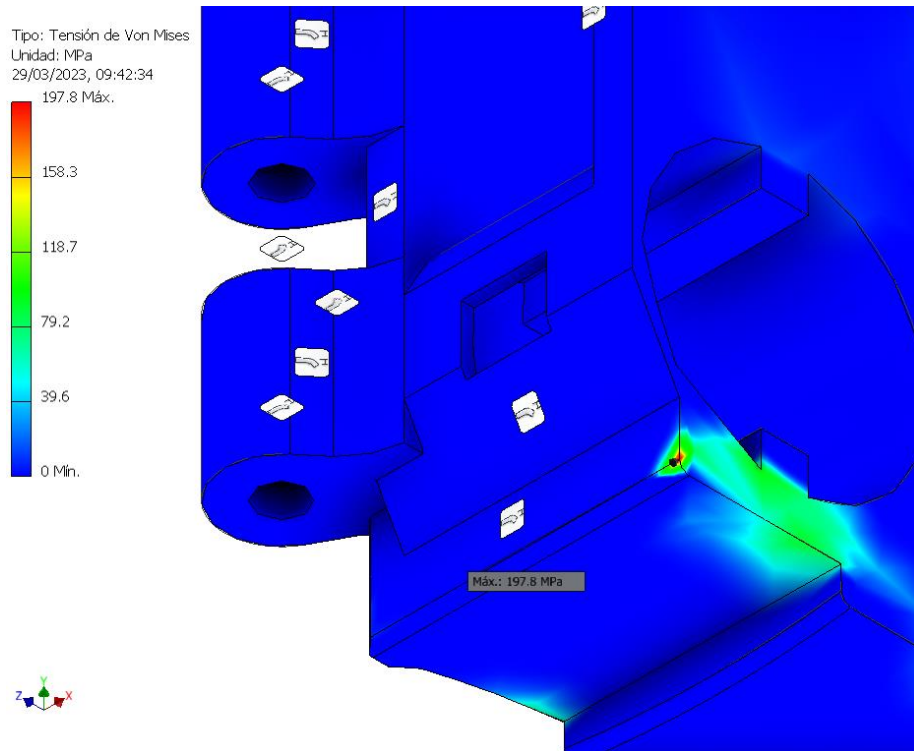


Figura 3-18 Singularidad 1

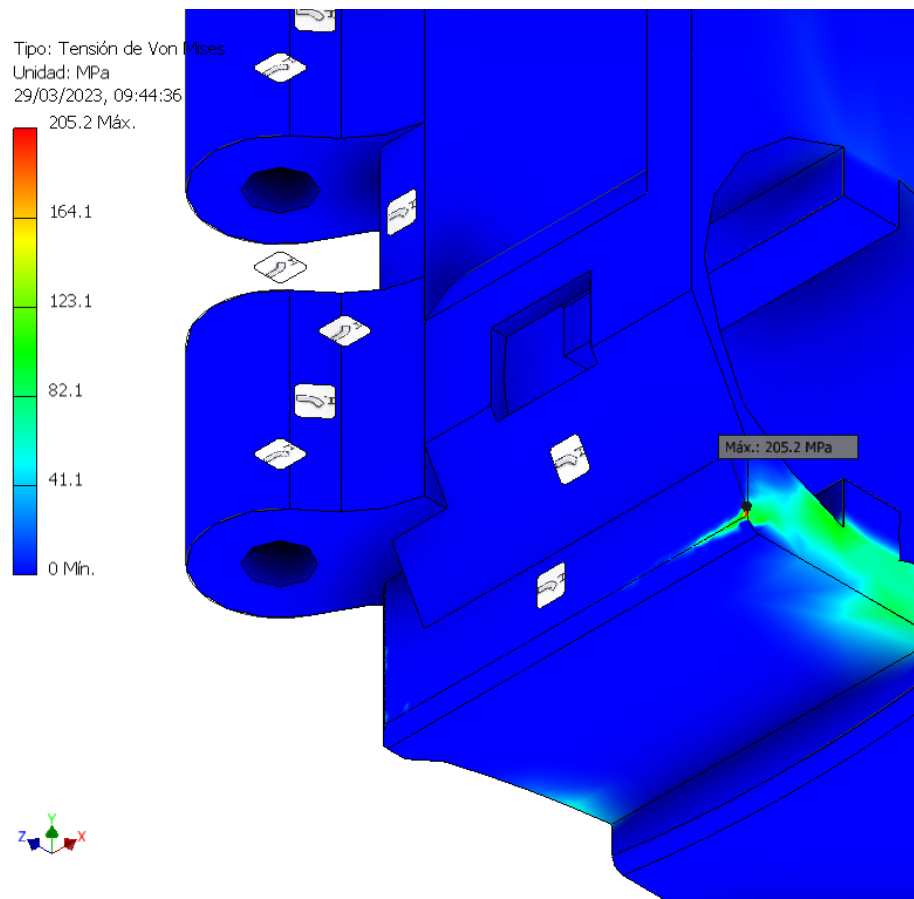


Figura 3-19 Singularidad 2

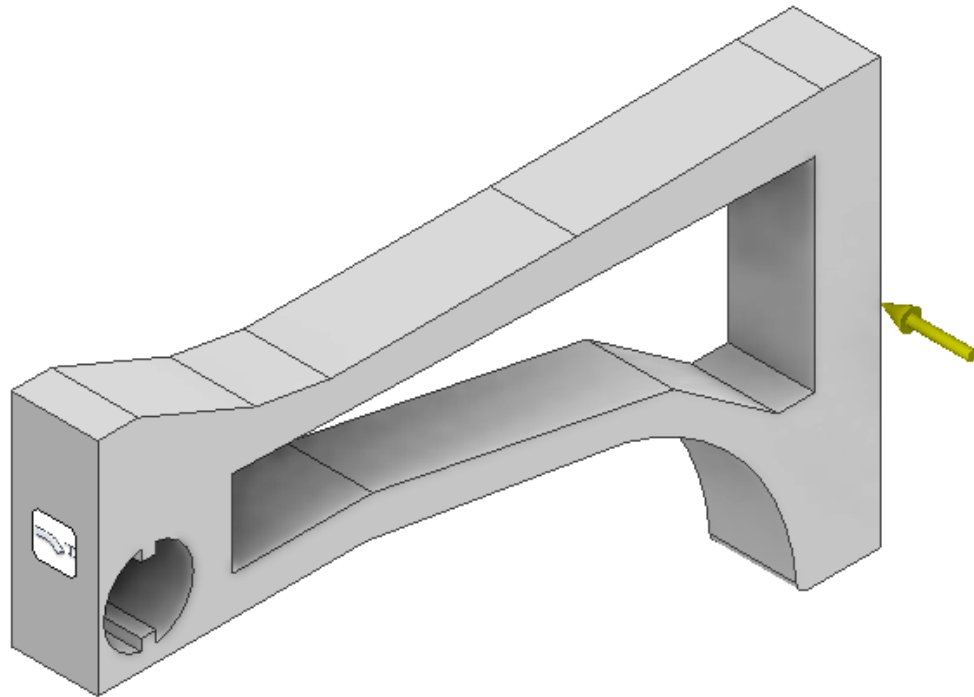


Figura 3-20 Simplificación bajo cargas laterales

La configuración utilizada aparece en la Tabla 3-11.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1000 N
Restricciones	Cara frontal restringida en todos los ejes
	Tamaño medio de elemento 0.1
Malla	Tamaño mínimo de elemento 0.2
	Número de elementos 407

Tabla 3-11 Configuración para simplificación bajo cargas laterales

Análisis lineal estático

Resultados del análisis lineal estático en Tabla 3-12, Figura 3-21 y Figura 3-22.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	91.03 MPa
Desplazamiento	1 mm

Tabla 3-12 Resultados de simplificación bajo cargas laterales

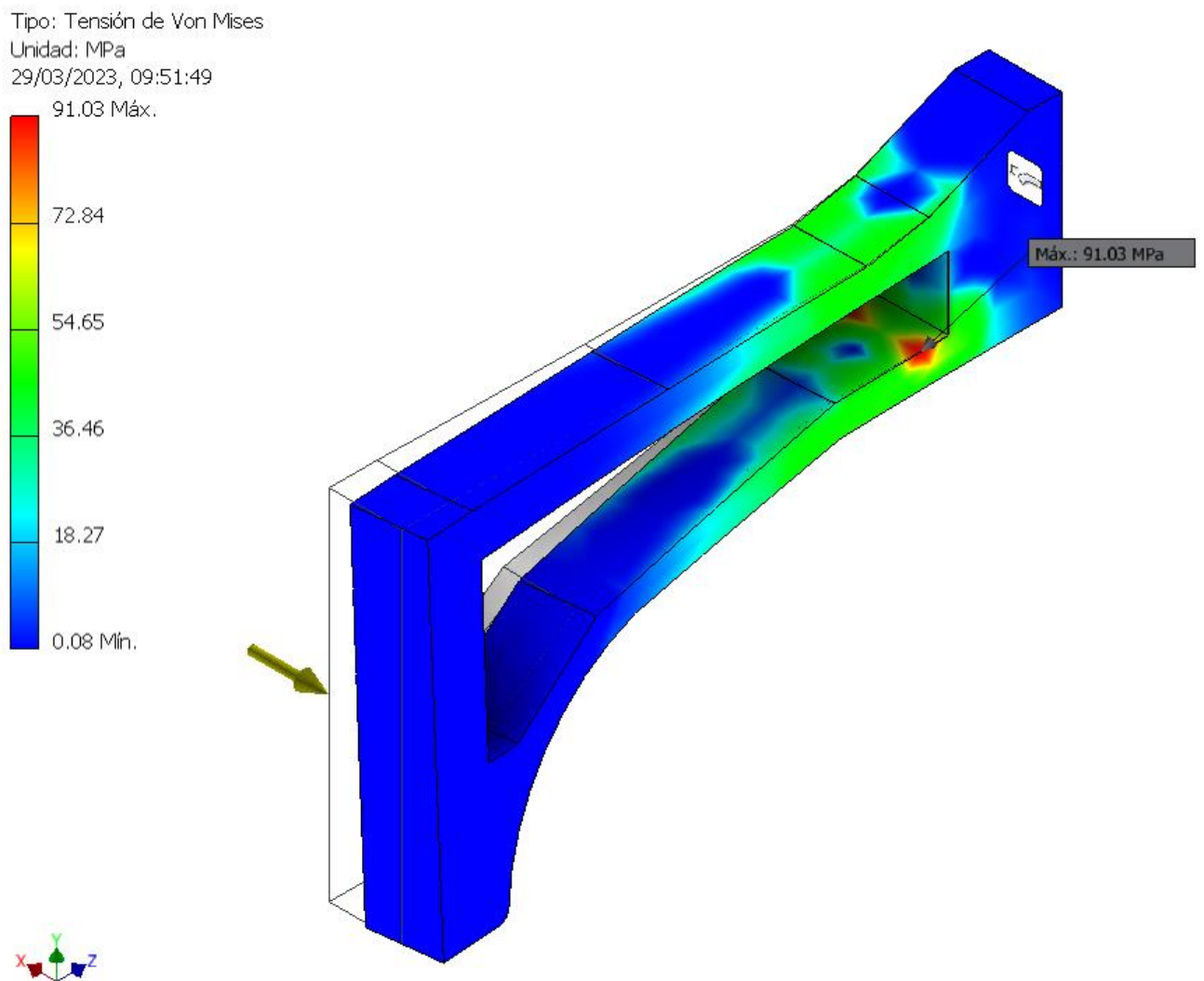


Figura 3-21 Tensión de Von Mises en simplificación

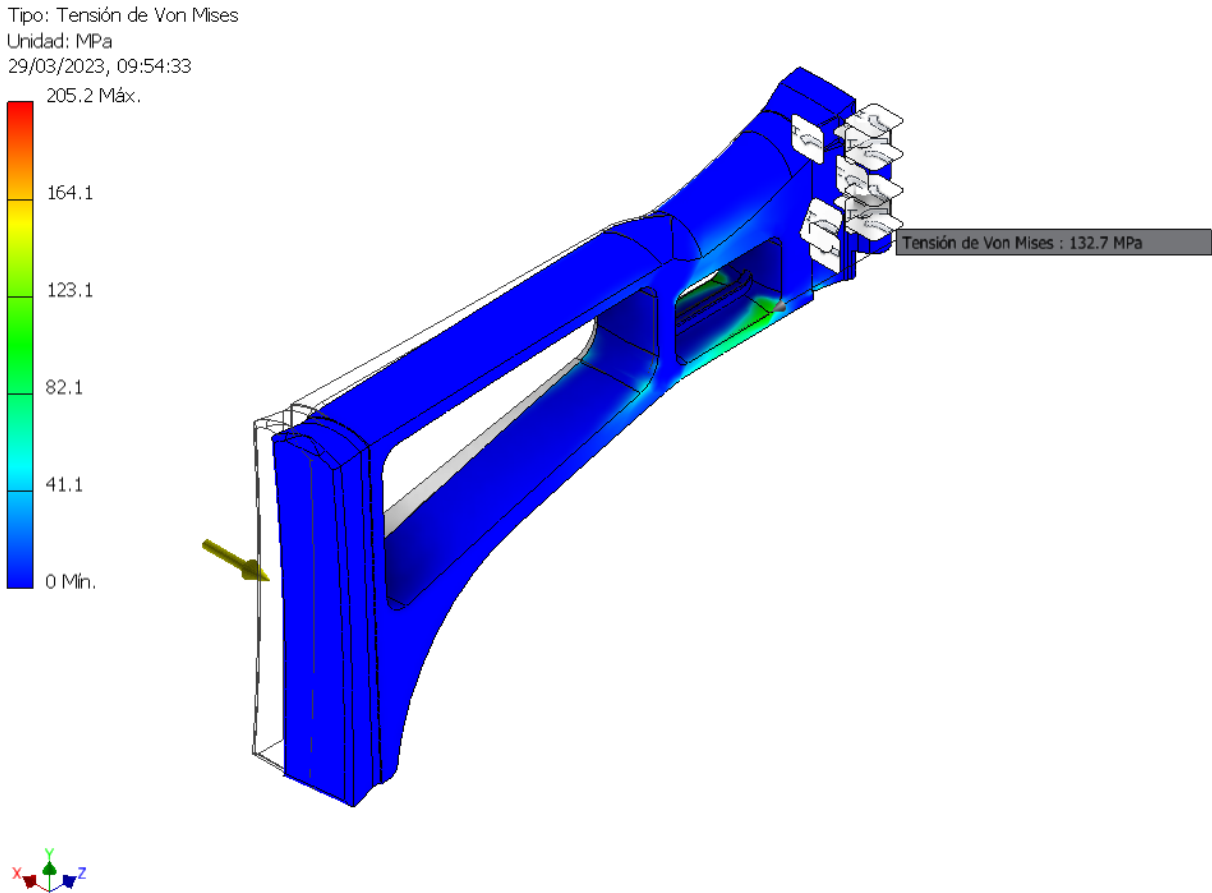


Figura 3-22 Tensión de Von Mises en modelo original

Conclusiones

Los resultados obtenidos obedecen a lo esperado en una estructura semejante: las mayores tensiones ocurren en la sección de menor tamaño y lo más cerca del empotramiento. Los resultados obtenidos en la zona equivalente a la anterior son de 132.7 MPa (Figura 3-22). Esto sigue garantizando un coeficiente de seguridad de 2.3 respecto del límite elástico.

3.2.4 Decisión

De los tres modelos sometidos a los esfuerzos de retroceso, el tercero es el que produce resultados más coherentes con el comportamiento ya conocido de la culata. Presupone que el esfuerzo se aplica de una manera específica en la cara frontal, no de manera constante en toda el área de contacto.

En el modelo primero se puede apreciar que la deformación es significativamente mayor y que aparecen esfuerzos laterales que no son coherentes en armas de fuego, diseñadas para que un tirador adiestrado consiga un rango de precisión particularmente elevado en el eje horizontal. Esto es así porque un blanco humano es más alto que ancho, por lo que el margen de error puede ser mayor en el eje vertical que en el horizontal. El segundo modelo simplifica excesivamente la transmisión de esfuerzos al no considerar en absoluto el acople. Por tanto, se empleará el tercer modelo como referencia en cuanto a esfuerzos de retroceso y el original en cuanto a esfuerzos laterales.

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

En esta sección se describirá el proceso desde el modelo de la culata inicial hasta la nueva versión. Los resultados finales son producto de un proceso de optimización topológica. Para este, es necesario definir una malla, unas fuerzas, unas restricciones de movimiento y las regiones que se desean conservar. Con estos datos el *software* Inventor es capaz de dar un resultado numérico inicial. A partir de este, se diseña un nuevo modelo. Se realizan iteraciones poniendo el modelo optimizado a prueba en un análisis de tensión para posteriormente hacer correcciones que se analizan de nuevo.

4.1 Iteraciones del generador de forma

3.4.1 Modelo de partida

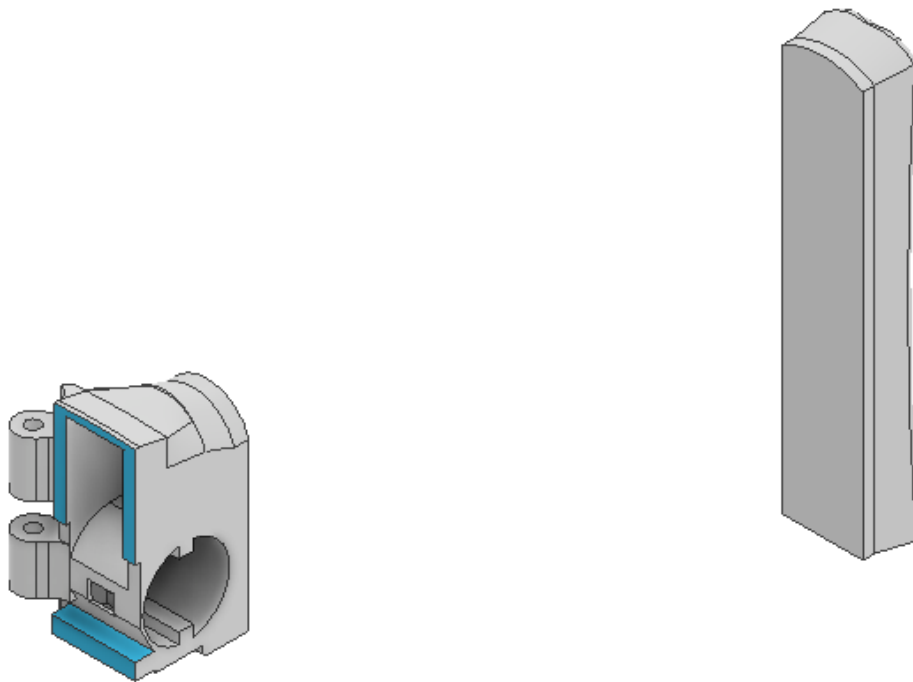


Figura 4-1 Modelo de partida para generador de forma

Justificación del modelo

Se ha tomado la simplificación del modelo original 2 y se ha eliminado toda la materia entre la zona del acople y el punto de apoyo con el hombro (Figura 4-1). El acople debe de mantenerse para poder unirse al cuerpo del fusil. El punto de contacto con el hombro se debe conservar para asegurar que la pieza sea verdaderamente práctica, pues es esta parte la que distribuye la fuerza en el hombro del tirador. Cambiar su forma teniendo en cuenta solamente requisitos estructurales podría impactar negativamente en la ergonomía; también reducir la superficie de contacto podría generar molestia o incluso dolor en el tirador, influyendo negativamente en su precisión.

3.4.2 Iteración 1

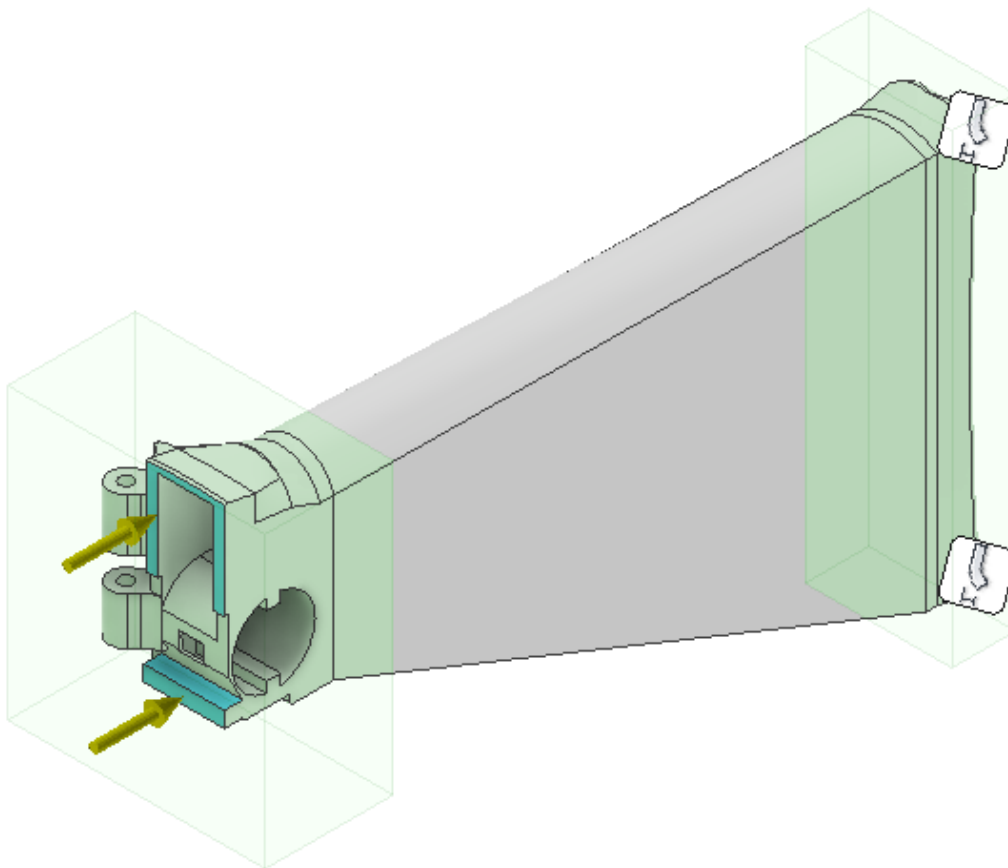


Figura 4-2 Modelo inicial iteración 1

Justificación del modelo

En la Figura 4-2, se ha generado una operación de elevación entre las dos caras. El componente nuevo es completamente macizo. Como se puede apreciar, se han conservado las dos regiones mencionadas anteriormente y se han aplicado las mismas cargas y restricciones que en la simplificación del modelo original 2. La configuración utilizada aparece en la Tabla 4-1.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1470 N repartida
Restricciones	2 nodos fijos, la cara posterior restringida solo en el eje longitudinal
Malla	Tamaño medio de elemento 0.0025
	Tamaño mínimo de elemento 0.2
Generador de forma	Número de elementos 19406
	Reducción de masa en un 60 %

Tabla 4-1 Configuración para iteración 1

Los resultados se muestran en la Figura 4-3 y en la Figura 4-4.

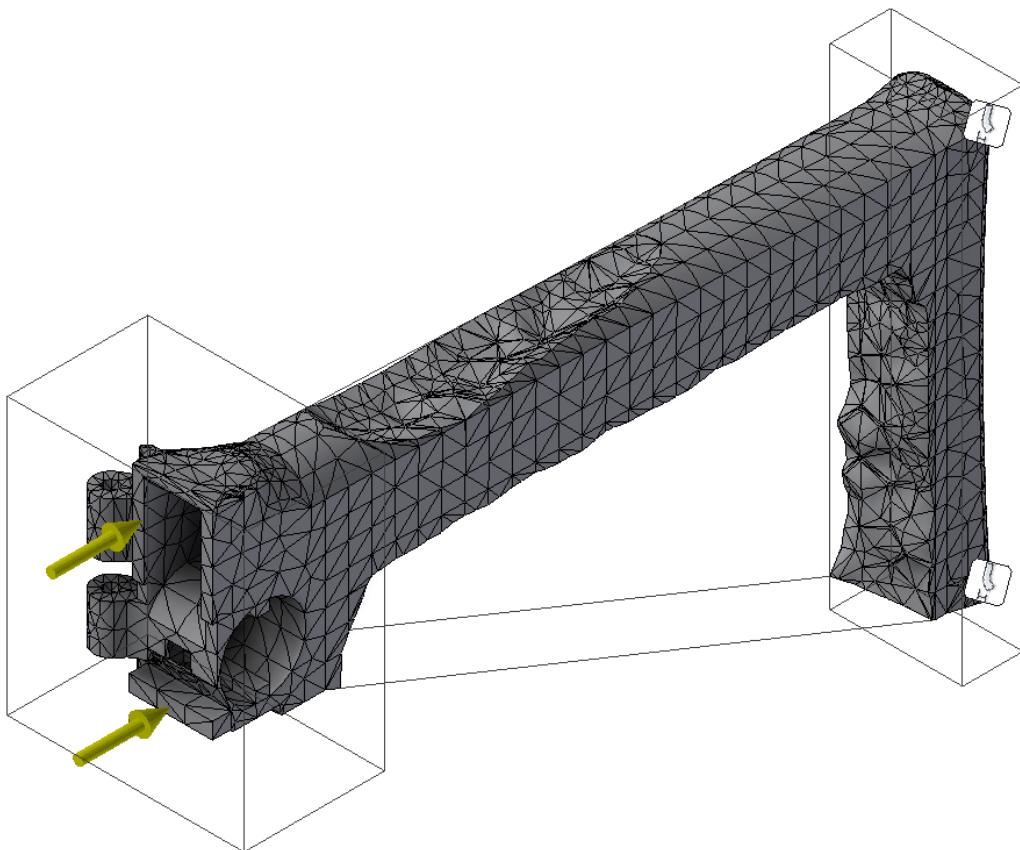


Figura 4-3 Resultado de generador de forma de la iteración 1

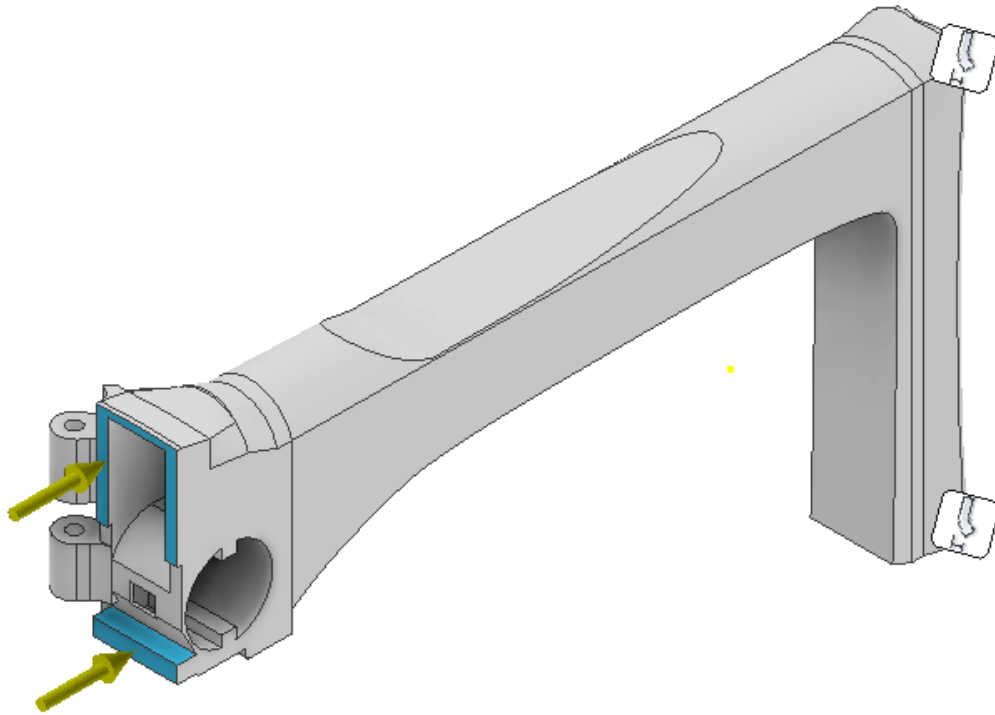


Figura 4-4 Resultado de la iteración 1

Análisis del resultado

La configuración utilizada para el análisis del resultado aparece en la Tabla 4-2.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1470 N repartida
Restricciones	2 nodos fijos, la cara posterior restringida solo en el eje longitudinal
Malla	Tamaño medio de elemento 0.1
	Tamaño mínimo de elemento 0.2
	Número de elementos 4406

Tabla 4-2 Configuración para resultado de la iteración 1

Análisis lineal estático

Resultados del análisis lineal estático en la Tabla 4-3, Figura 4-5 y Figura 4-6.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	9.22 MPa
Desplazamiento	0.007 mm

Tabla 4-3 Resultados de análisis lineal estático

Tipo: Tensión de Von Mises

Unidad: MPa

29/03/2023, 09:57:07

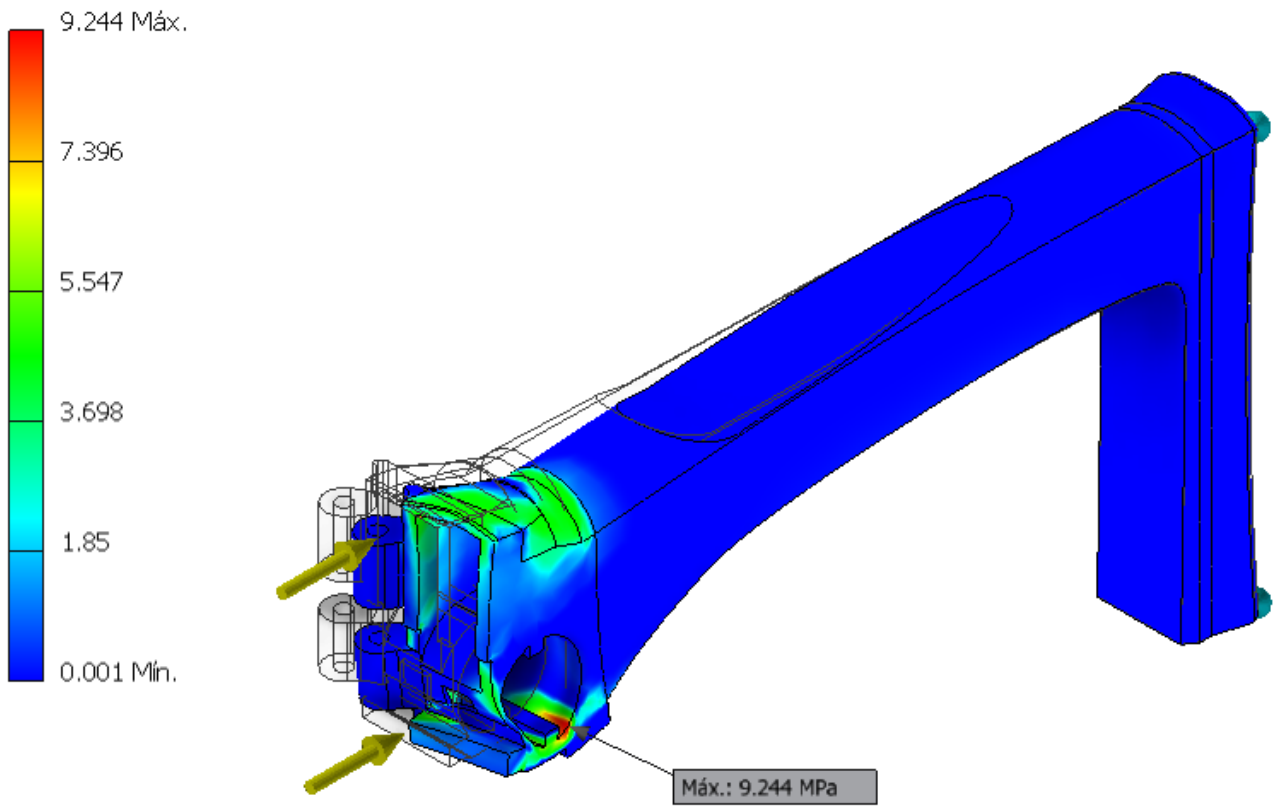


Figura 4-5 Tensión de Von Mises

Tipo: Desplazamiento
Unidad: mm
29/03/2023, 09:57:40

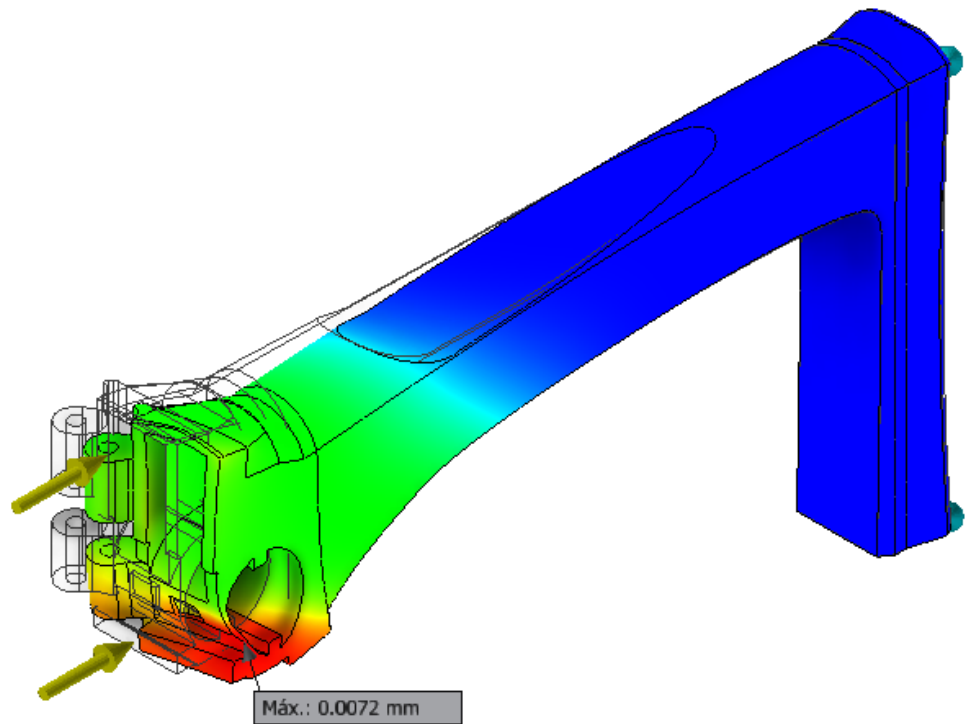
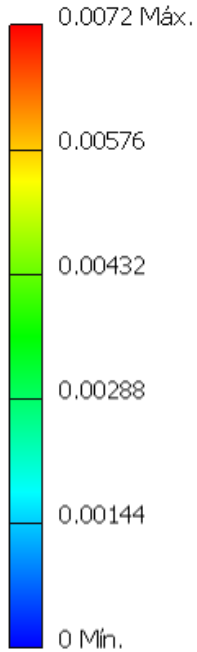


Figura 4-6 Desplazamiento máximo

Conclusiones

Los resultados obtenidos son aceptables si se comparan con los de la culata original. La deformación es mayor que en el original, pero se mantiene en el mismo orden de magnitud. El modelo obtenido parece indicar que la culata solo necesita el elemento estructural superior para hacer frente al retroceso. En la siguiente iteración se va a investigar sobre qué resultados ofrece el generador de forma para la acción de una fuerza lateral, como pueda darse al utilizar el fusil para golpear.

3.4.2 Iteración 2

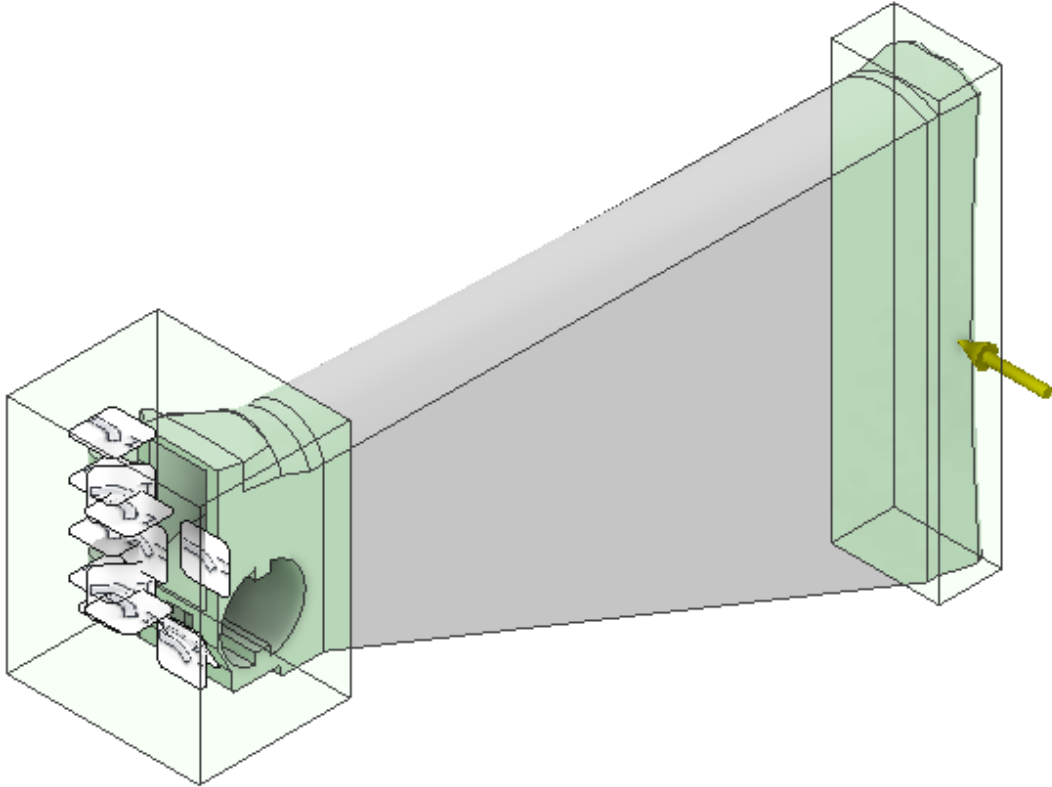


Figura 4-7 Modelo inicial de la iteración 2

En la Figura 4-7 se ha conservado el modelo inicial anterior, pero considerando la cara frontal como un empotramiento y aplicando una fuerza lateral en el extremo opuesto de la culata, donde se pueden dar solicitaciones más grandes. La configuración utilizada aparece en la Tabla 4-4.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1000 N
Restricciones	Empotramiento aplicado en la cara frontal
Malla	Tamaño medio de elemento 0.0025
	Tamaño mínimo de elemento 0.2
Generador de forma	Número de elementos 19406
	Reducción de masa en un 70 %

Tabla 4-4 Configuración para la iteración 2

Los resultados se muestran en la Figura 4-8 y en la Figura 4-9.

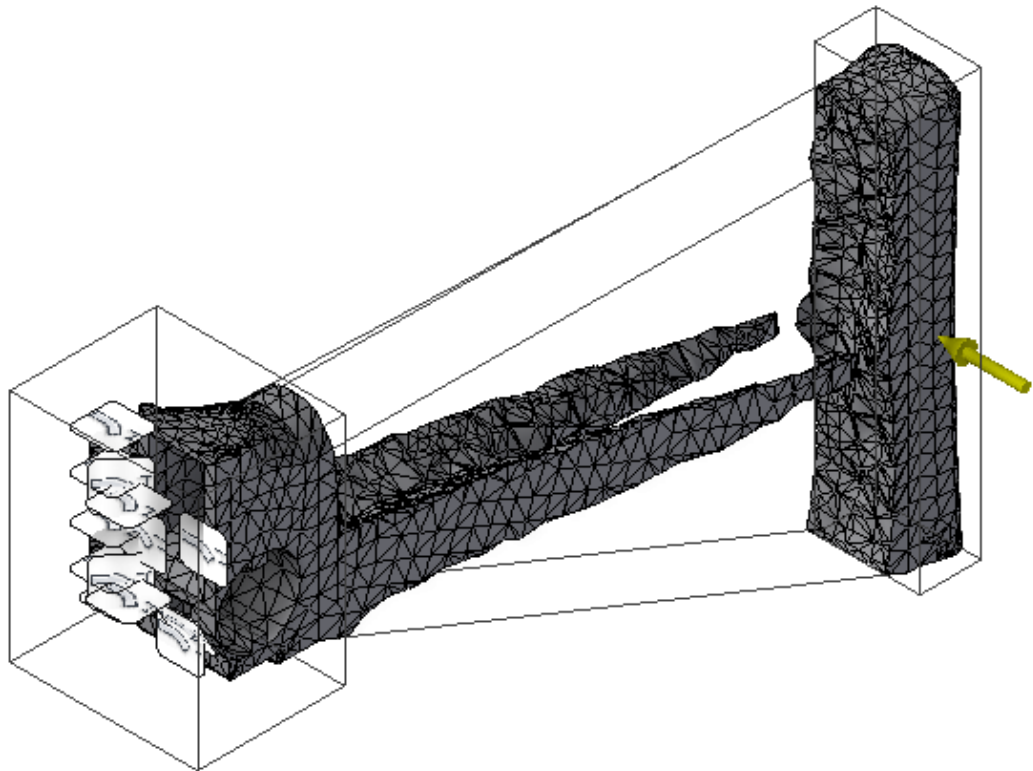


Figura 4-8 Resultado de generador de forma de la iteración 2

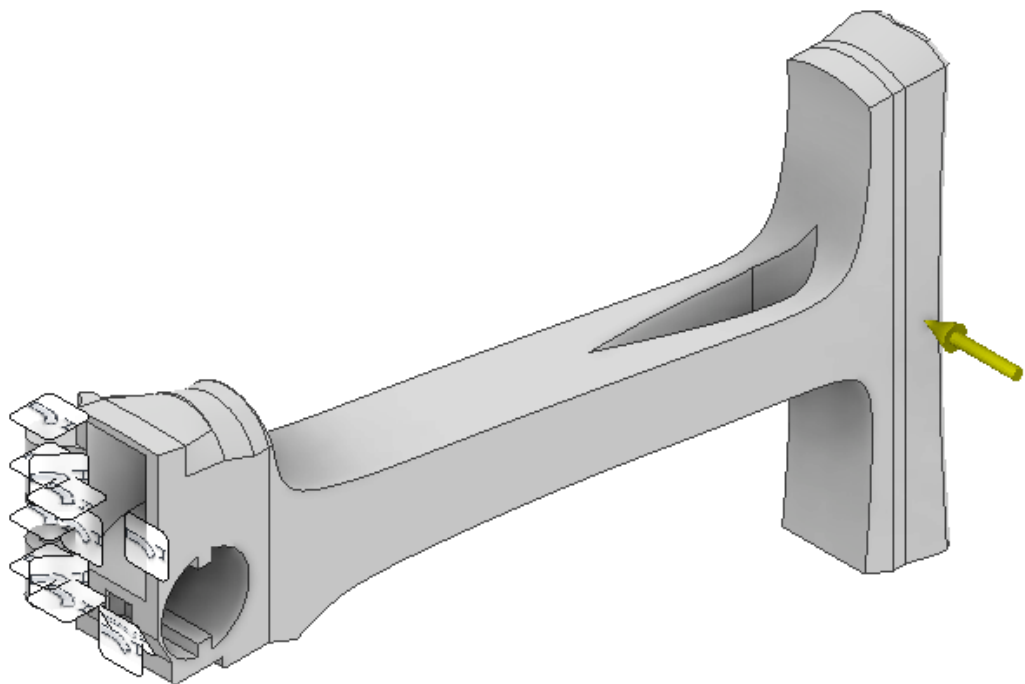


Figura 4-9 Resultado de la iteración 2

Análisis del resultado

La configuración utilizada para el análisis del resultado aparece en la Tabla 4-5.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1000 N
Restricciones	Empotramiento aplicado en la cara frontal
	Tamaño medio de elemento 0.1
Malla	Tamaño mínimo de elemento 0.2
	Número de elementos 4097

Tabla 4-5 Configuración para resultado de la iteración 2

Análisis lineal estático

Resultados del análisis lineal estático en Tabla 4-6, Figura 4-10 y Figura 4-11.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	453.6 MPa
Desplazamiento	0.96 mm

Tabla 4-6 Resultados de análisis lineal estático

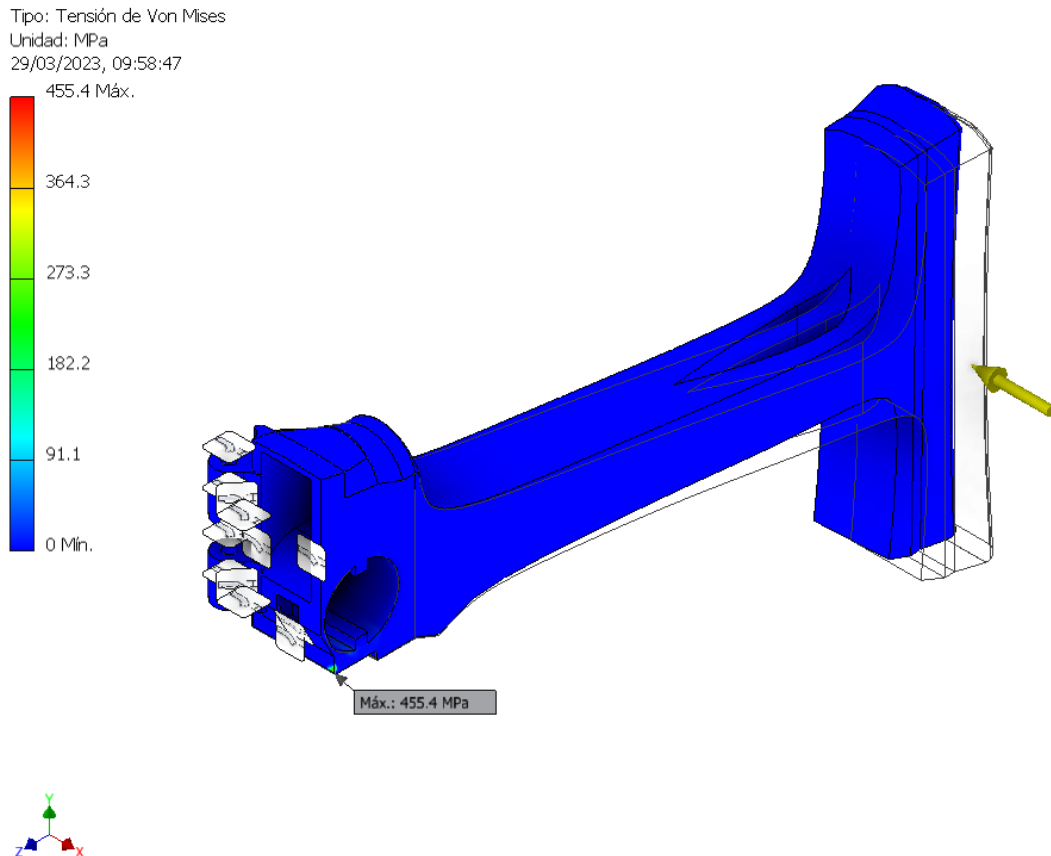


Figura 4-10 Tensión de Von Mises

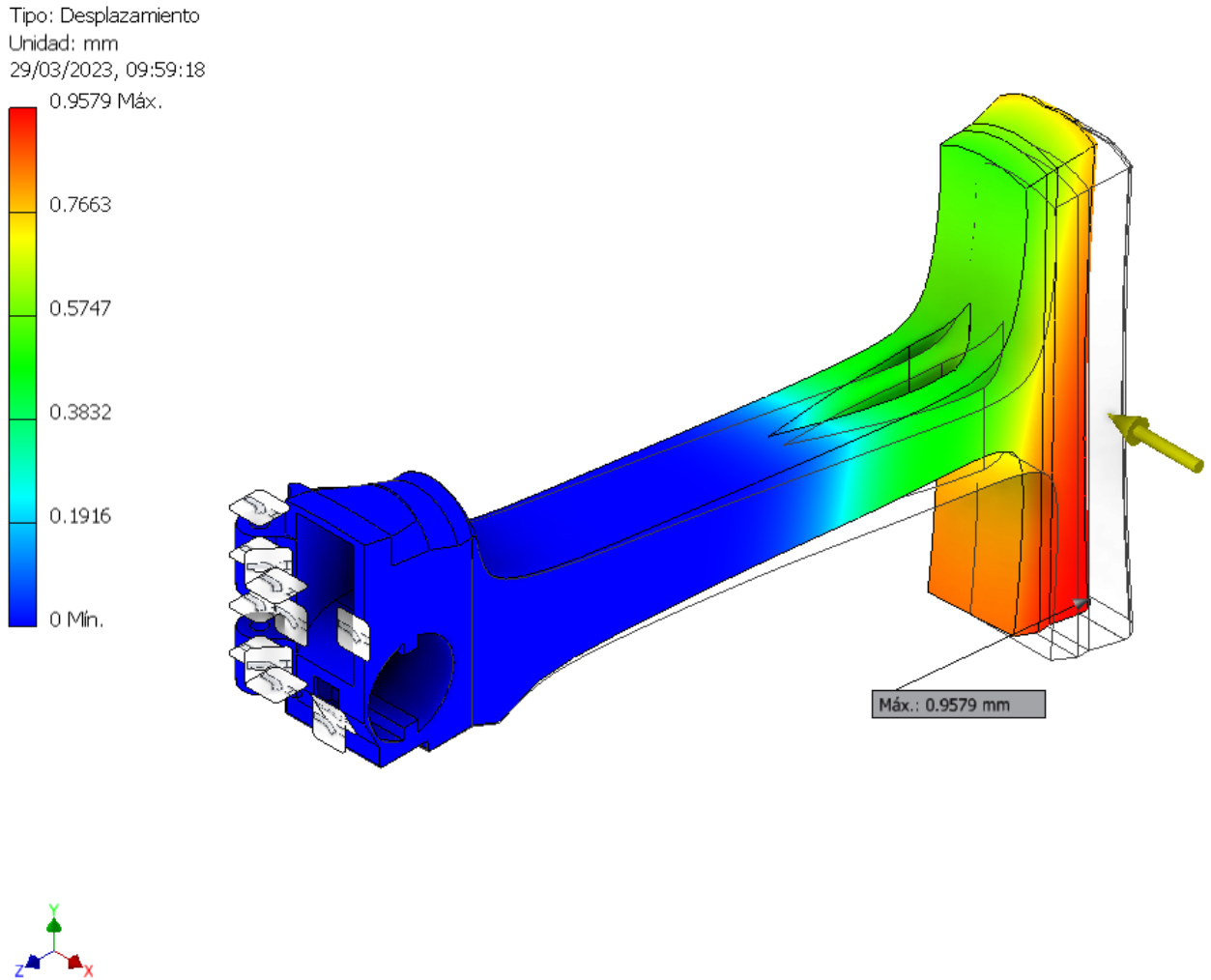


Figura 4-11 Desplazamiento máximo

Conclusiones

Cabe remarcar la influencia de una única singularidad en los resultados de tensión, en la esquina inferior derecha. La singularidad impide hacer una lectura productiva de los resultados, pues eclipsa el resto de variaciones de tensión. No se puede llevar a cabo el mismo proceso que con la pieza original porque en este caso no se puede apreciar la distribución de la tensión en otra zona que no sea la de la singularidad.

Se ha decidido llevar la simulación al entorno Nastran y emplear el análisis no lineal estático. El análisis es más exigente, tiene en cuenta que la pieza se deforma según se aplica la carga y que la deformación la vuelve más vulnerable al estrés. Por otra parte, el entorno Nastran permite ser más exacto al establecer los parámetros y se espera que así se eviten los efectos indeseados de las singularidades.

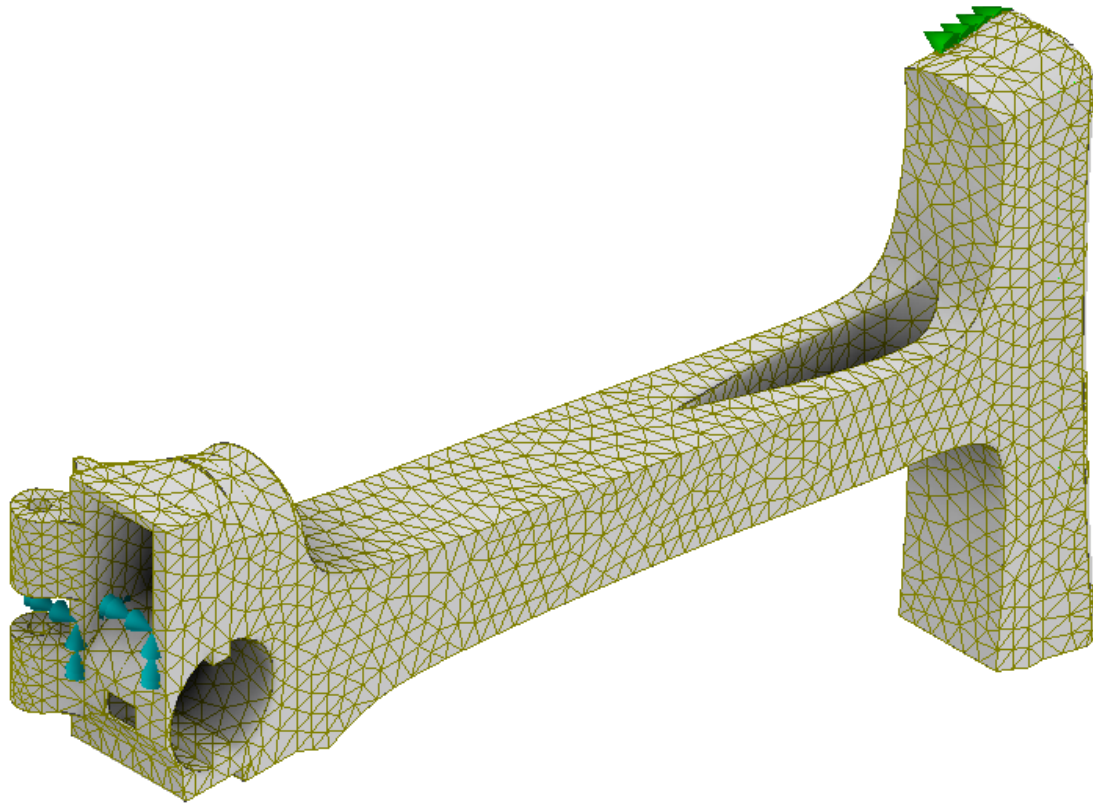


Figura 4-12 Resultado de la iteración 2 Nastran

En la Figura 4-12 se muestra el modelo preparado para su análisis en el entorno Nastran. La configuración utilizada para el análisis del resultado aparece en la Tabla 4-7.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1000 N
Restricciones	Empotramiento aplicado en la cara frontal
Malla	Tamaño de elemento 5 mm Orden de elemento lineal
Configuración no lineal	Número de elementos 19377 Resultados intermedios en 5 incrementos

Tabla 4-7 Configuración para resultado de la iteración 2 Nastran

Análisis no lineal estático

Resultados del análisis no lineal estático en Tabla 4-8, Figura 4-13 y Figura 4-14.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	25.4 – 50.9– 76.32 – 101.8 – 127.2 MPa

Desplazamiento 1 mm

Tabla 4-8 Resultados de análisis no lineal estático

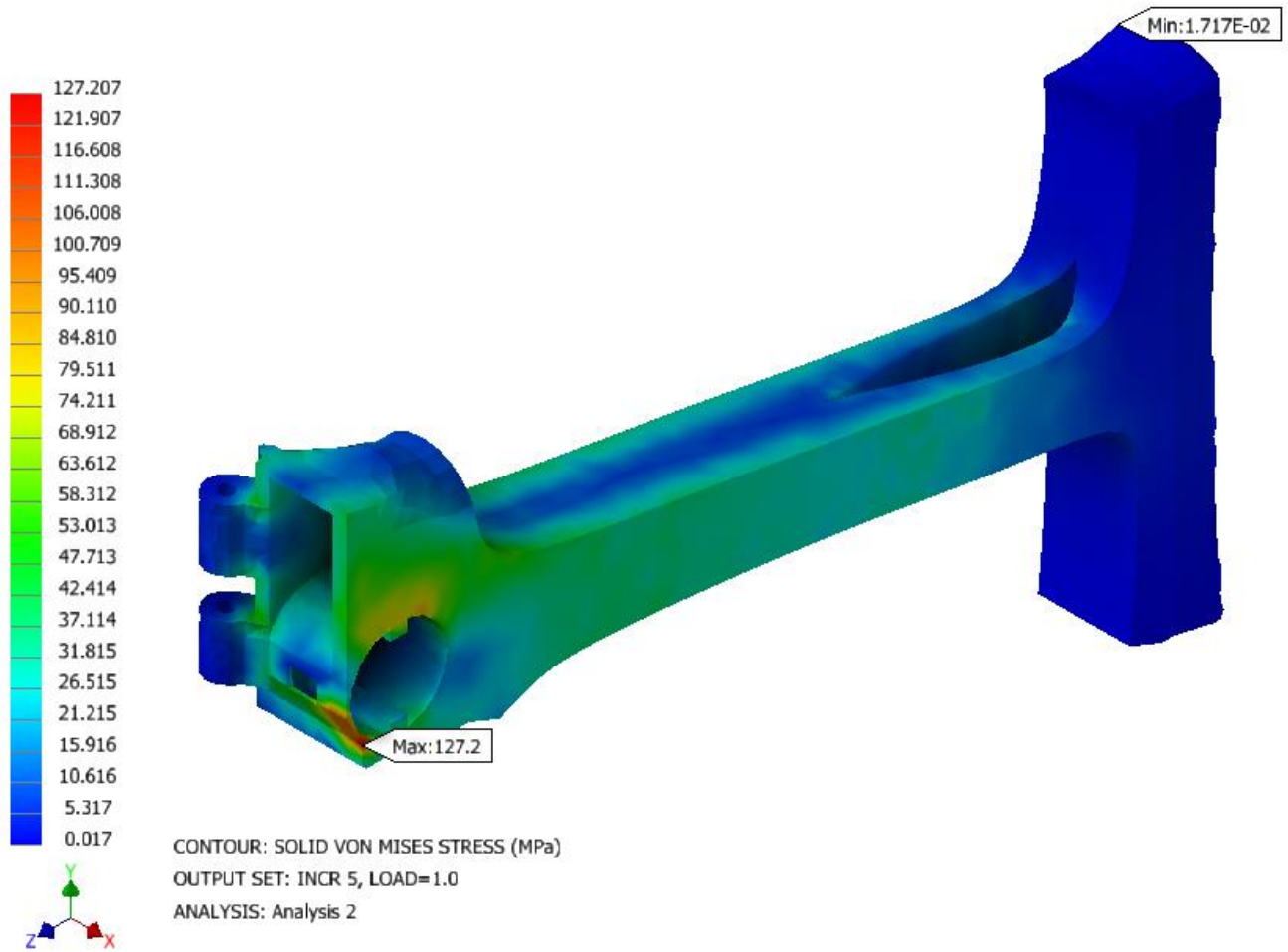


Figura 4-13 Tensión de Von Mises

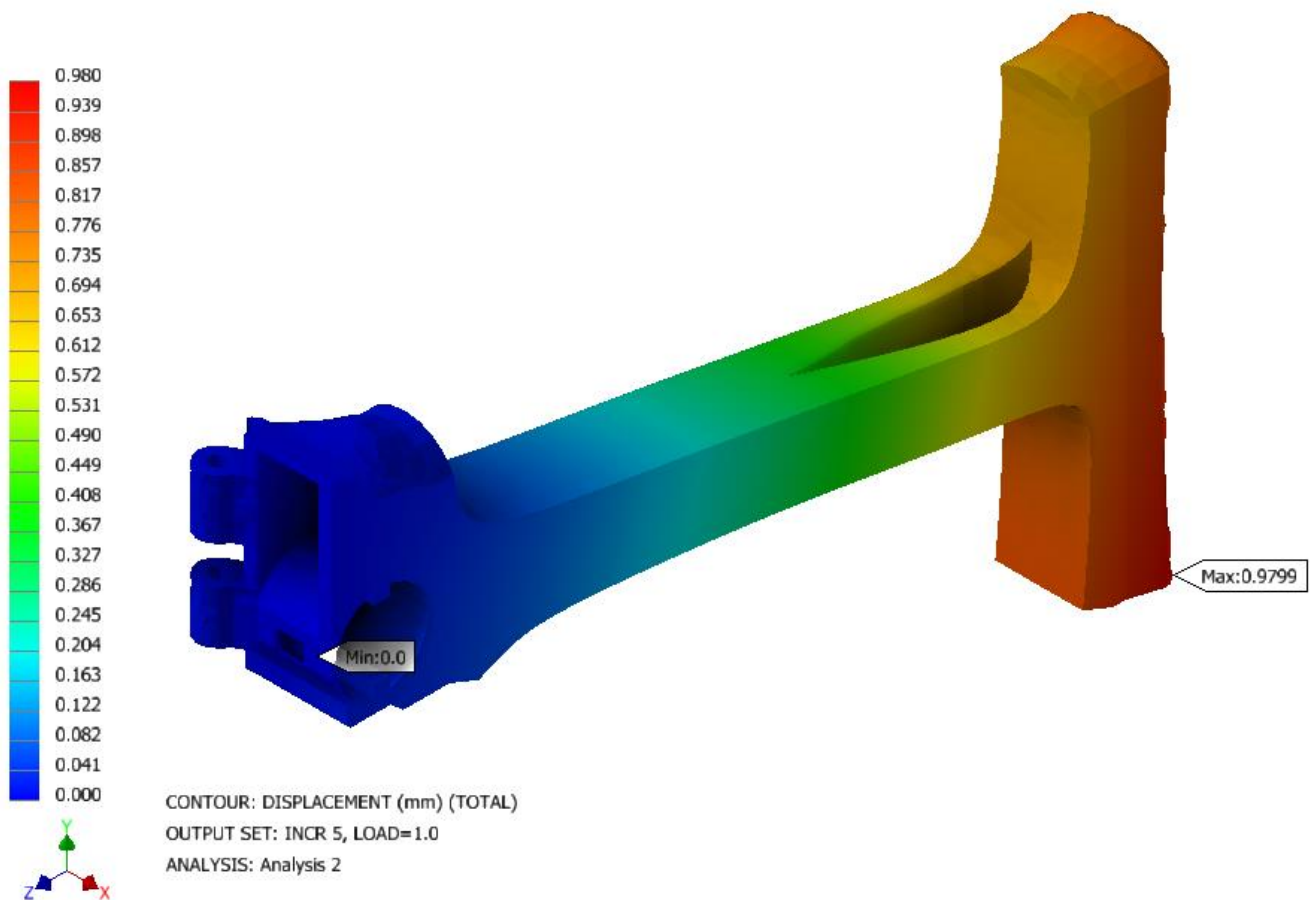


Figura 4-14 Desplazamiento máximo

Conclusiones

Se puede observar que, con un análisis más preciso, las tensiones son de 127 MPa y el desplazamiento es ligeramente superior al milímetro. En un siguiente paso se pretende hacer un modelo que sea la suma de los dos anteriores. El resultado de la iteración 1 obedece a eliminar toda materia que no contribuya a soportar una carga frontal, mientras que la iteración 2 hace lo propio respecto a las cargas laterales. Por eso en la siguiente iteración se busca combinar los dos modelos, porque la culata deberá soportar los dos tipos de cargas.

3.4.2 Iteración 3

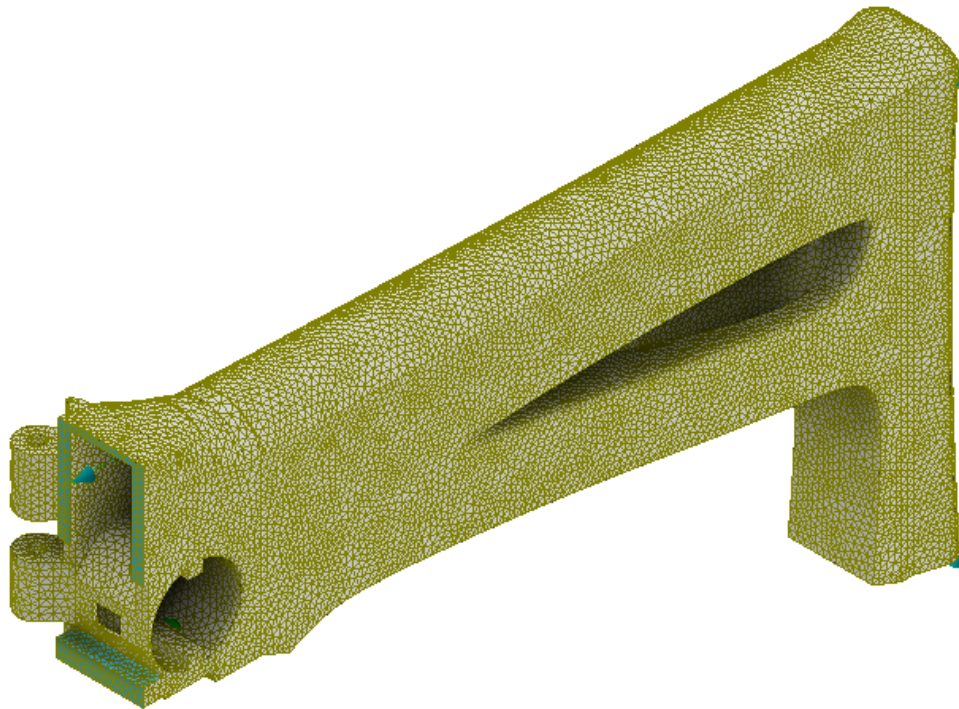


Figura 4-15 Modelo de la iteración 3 para esfuerzo de retroceso

El modelo de la Figura 4-15 es el resultado de superponer los dos modelos anteriores. En un primer momento, se ejecutará el análisis de los efectos de la fuerza de retroceso y a continuación el de un esfuerzo lateral. Se ha decidido mantener el entorno Nastran para evitar la influencia de singularidades. La configuración utilizada para el análisis del esfuerzo de retroceso aparece en la Tabla 4-9.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1470 N repartida
Restricciones	2 nodos fijos, la cara posterior restringida solo en el eje longitudinal
Malla	Tamaño de elemento 2 mm Orden de elemento lineal
Configuración no lineal	Número de elementos 468057 Resultados intermedios en 5 incrementos

Tabla 4-9 Configuración para modelo de la iteración 3 para analizar el esfuerzo de retroceso

Análisis no lineal estático

Resultados del análisis no lineal estático en Tabla 4-10, Figura 4-16, Figura 4-17 y Figura 4-18.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	1.2 – 2.3 – 3.5 – 4.6 – 5.8 MPa
Desplazamiento	0.01 mm

Tabla 4-10 Resultados de análisis no lineal estático

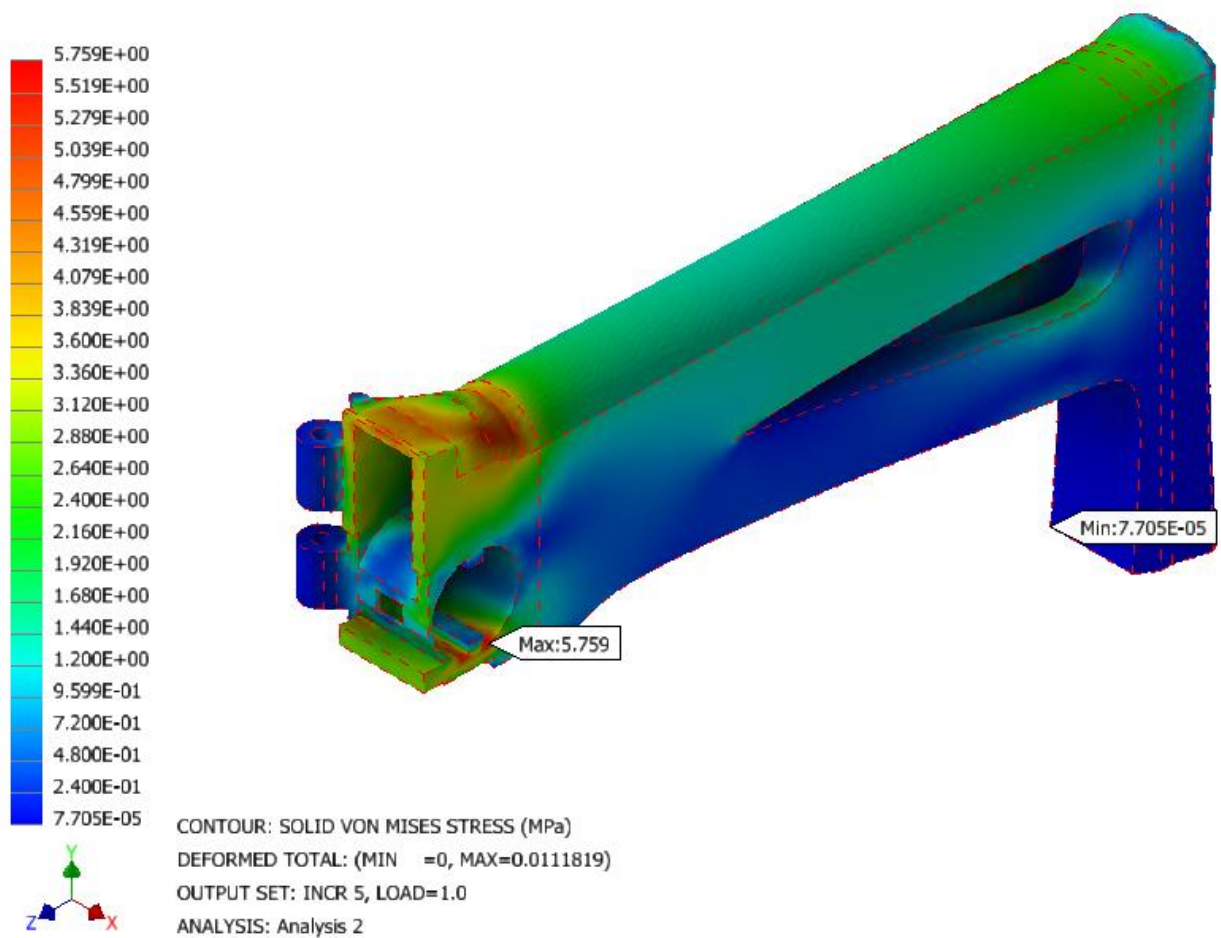


Figura 4-16 Tensión de Von Mises

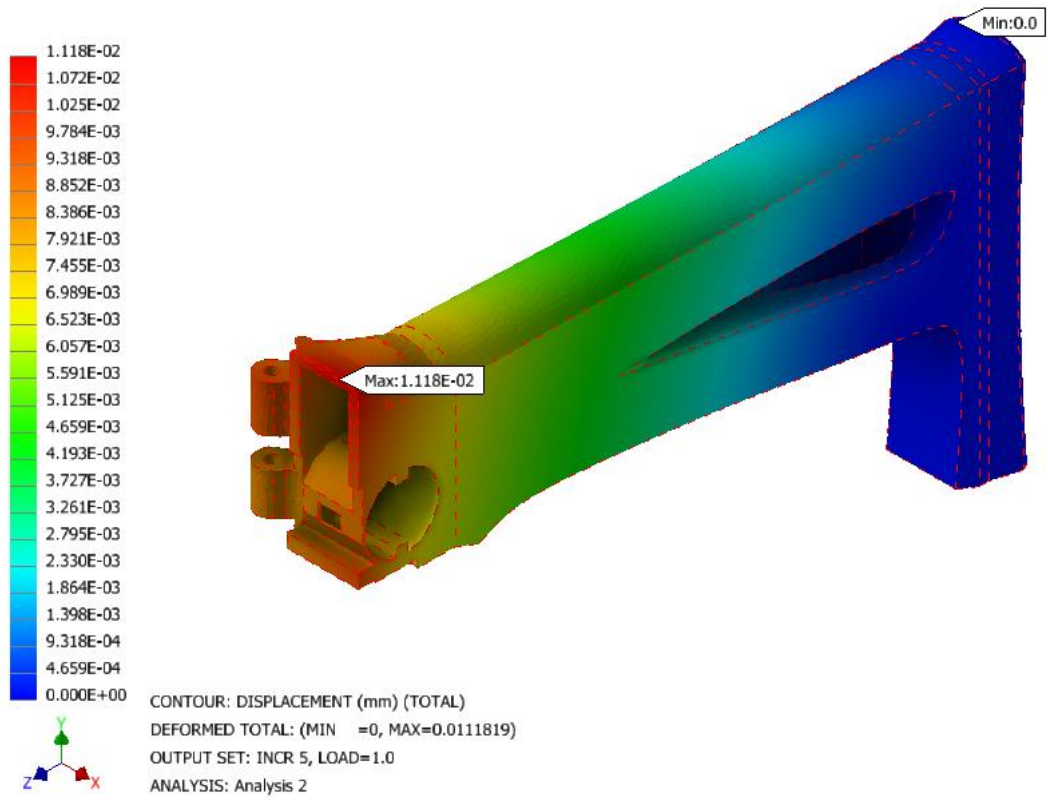


Figura 4-17 Desplazamiento máximo deformado

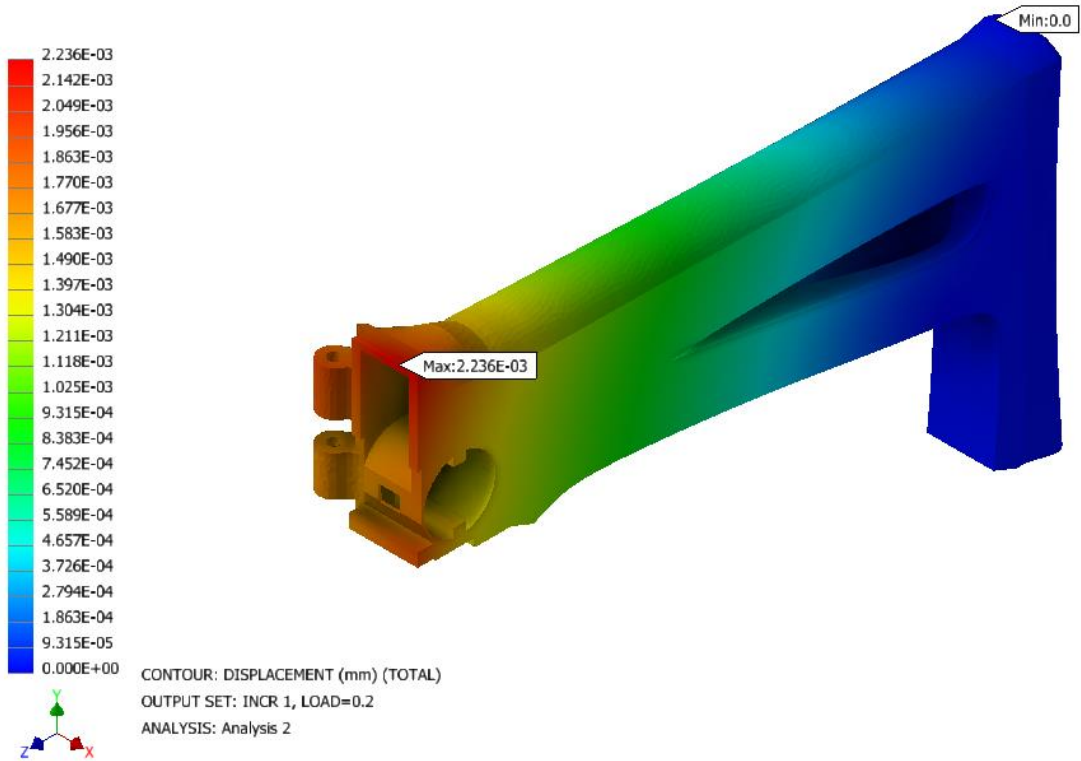


Figura 4-18 Desplazamiento máximo sin deformar

3.4.2 Iteración 4

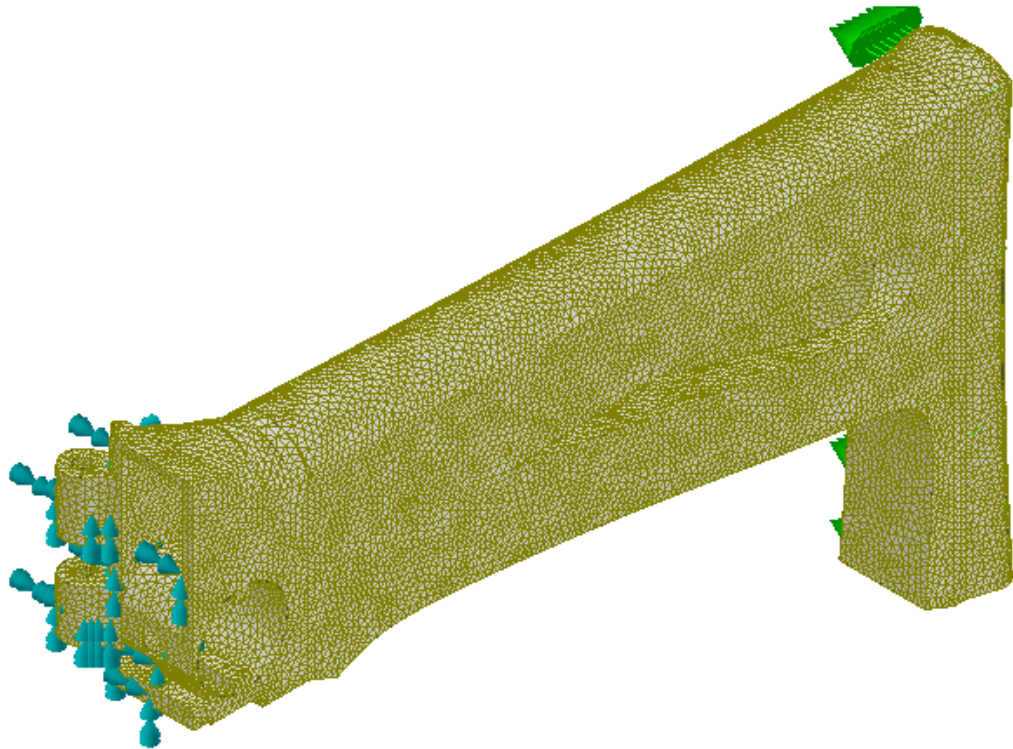


Figura 4-19 Modelo de la iteración 4 para esfuerzo lateral

El modelo de la Figura 4-19 es el empleado para analizar el esfuerzo lateral. Este no cuenta con modificaciones en la cara frontal. La configuración utilizada para el análisis del esfuerzo lateral aparece en la Tabla 4-11.

Parámetro	Valor
Material	Polímero reforzado con fibra de carbono
Cargas	Carga de 1000 N
Restricciones	Empotramiento aplicado en la cara frontal
Malla	Tamaño de elemento 2 mm
	Orden de elemento lineal
Configuración no lineal	Número de elementos 465920
	Resultados intermedios en 5 incrementos

Tabla 4-11 Configuración para modelo de la iteración 3 para analizar el esfuerzo lateral

Análisis no lineal estático

Resultados del análisis no lineal estático en Tabla 4-12, Figura 4-20 y Figura 4-21.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises	22.92 – 45.84 – 68.76 – 91.68 – 114.6 MPa
Desplazamiento	0.59 mm

Tabla 4-12 Resultados de análisis no lineal estático

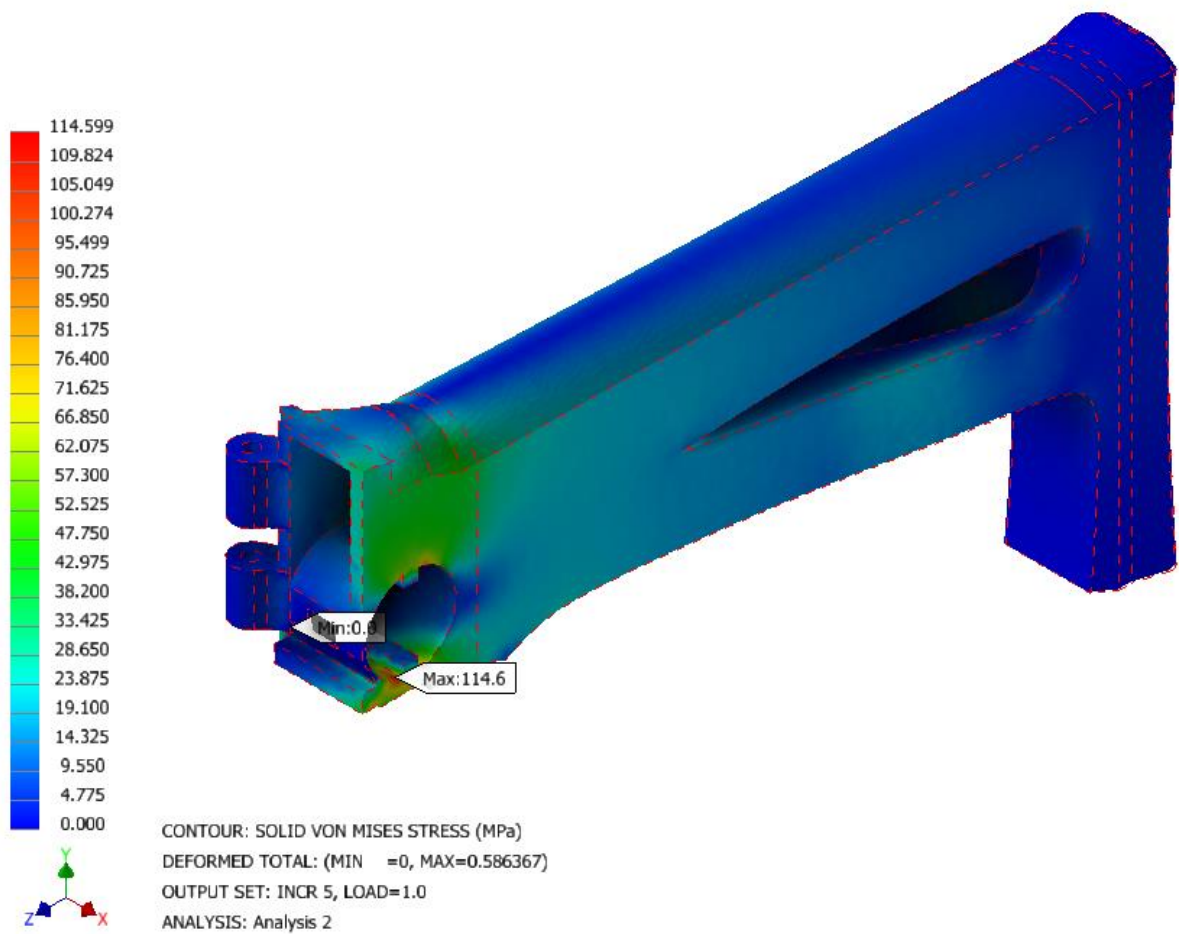


Figura 4-20 Tensión de Von Mises

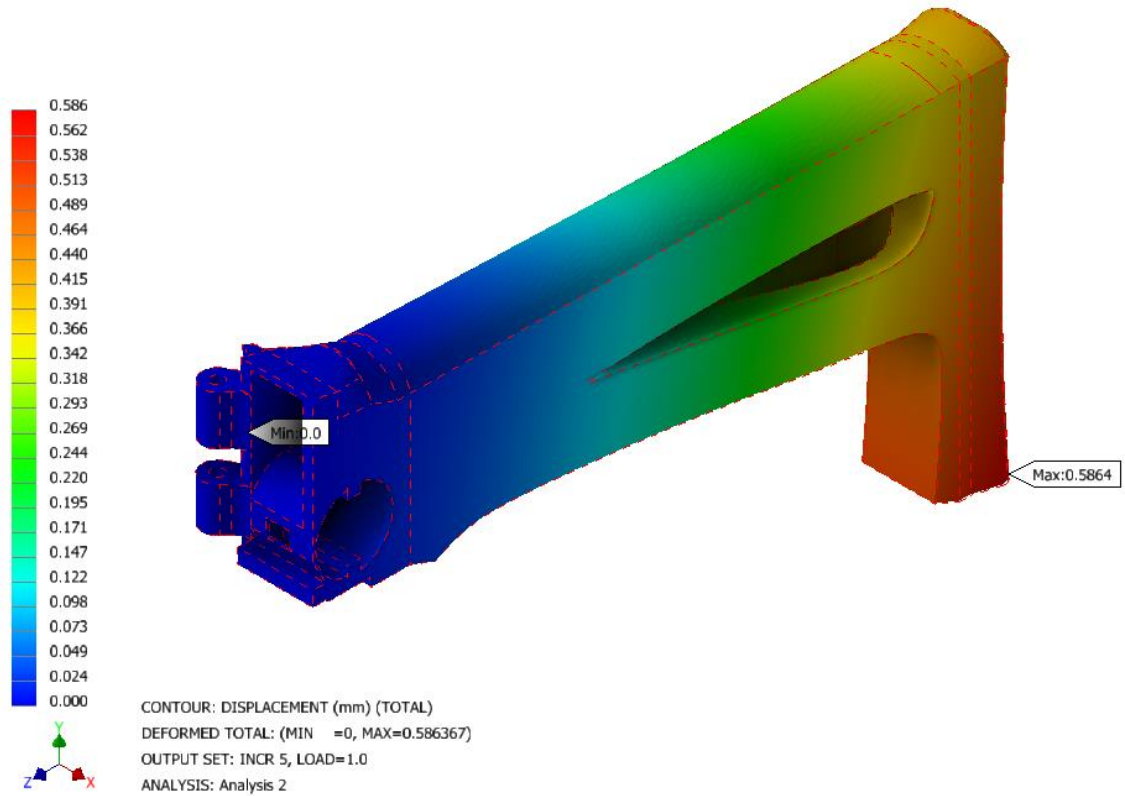


Figura 4-21 Desplazamiento máximo deformado

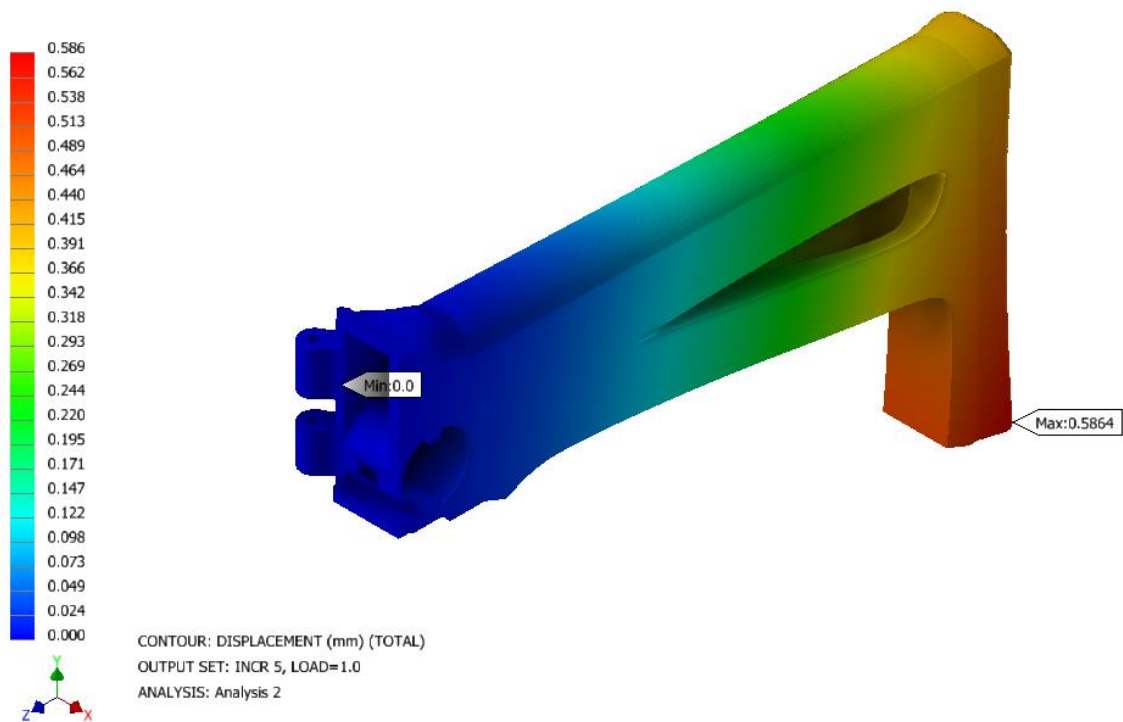


Figura 4-22 Desplazamiento máximo sin deformar

Conclusiones

Los resultados de la tensión ocurren en la zona esperada y no concentrados en una arista particular, por lo que se considera que no se han dado singularidades y que el valor verdadero es el obtenido. Este proporciona un coeficiente de seguridad de casi 3 respecto del límite de fluencia. En cuanto a las deformaciones, estas son casi 3 veces menores que en el modelo original. De hecho, se puede apreciar que no hay apenas diferencia entre las imágenes de desplazamiento con deformación y sin ella. Esto es prueba de lo insignificante del desplazamiento, ya que la opción de añadir deformación a la simulación produce estos cambios en la forma de manera exagerada, no proporcional. Sin embargo, este modelo supera en masa al original en 1.7 veces. La comparativa del modelo inicial respecto del final viene resumida en la Tabla 4-13, la Tabla 4-14 y la Tabla 4-15.

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises en la pieza original	9.48 MPa
Tensión de Von Mises en el nuevo modelo	5.8 MPa
Desplazamiento máximo en la pieza original	0.03 mm
Desplazamiento máximo en el nuevo modelo	0.01 mm

Tabla 4-13 Resumen esfuerzo de retroceso

Factor	Resultado
Tensión de Von Mises en la pieza original	124 MPa
Tensión de Von Mises en el nuevo modelo	114.6 MPa
Desplazamiento máximo en la pieza original	1.5 mm
Desplazamiento máximo en el nuevo modelo	0.59 mm

Tabla 4-14 Resumen esfuerzo lateral

Factor	Resultado
Masa en la pieza original	383 g
Masa en el nuevo modelo	665 g
Porcentaje de la diferencia de masa respecto de la masa total del fusil	8.54 %

Tabla 4-15 Comparativa de masas

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se describirán las consecuencias de los resultados obtenidos y se plantearán posibles caminos de progreso en la investigación para elaborar una culata por optimización topológica.

5.1 Conclusiones

El objetivo principal del TFG era obtener una culata de fusil de asalto mediante optimización topológica. Esto se ha conseguido y se ha validado considerando los objetivos intermedios establecidos en el capítulo 1. La culata es capaz de soportar las tensiones sin alcanzar el límite de fluencia con un coeficiente de seguridad de 2.12 y sufre casi 3 veces menos deformación que el modelo original. Por tanto, esto cumple sobradamente el objetivo de que las tensiones y deformaciones soportadas sean iguales o menores que las del original. La diferencia no es tan grande como para considerar que el modelo está sobredimensionado porque se ha analizado en unas condiciones menos agresivas que las reales. En cuanto a la diferencia de masa, la nueva culata supone un aumento de masa de fusil 8.54 % respecto de la original. En consecuencia, entra en los márgenes del 10 % de diferencia. Se concluye que la culata obtenida es funcional dentro de los estándares fijados. A continuación, la Figura 5-1 muestra una imagen del modelo renderizado que proporciona una idea realista de su apariencia.



Figura 5-1 Modelo final renderizado

El aspecto clave para obtener un buen diseño utilizando una herramienta de *software* como Inventor ha sido definir detalladamente el problema: indagar sobre las ecuaciones existentes que tratan el retroceso y elegir la más apropiada, y establecer las restricciones. Existen muchas maneras de entender el evento de retroceso, y todas tienen su aplicación según el ámbito de trabajo. En este caso se ha considerado que entender la fuerza como resultado de la desaceleración de la energía de retroceso era lo más apropiado para evaluar la estructura.

A la luz de los resultados, el *software* de optimización topológica demuestra ser un capacitador clave que permite obtener resultados significativos y tener una fiabilidad suficiente en un espacio de tiempo relativamente corto. Además, permite transferir fácilmente el modelo a formato imprimible en 3 dimensiones. Por tanto, la metodología empleada en este TFG podría demostrar ser de gran ayuda para las fuerzas militares desplegadas en el extranjero y con líneas de comunicaciones que pueden verse afectadas en cualquier momento.

5.2 Líneas futuras

Las tecnologías de optimización topológica parten de un diseño humano y eliminan la materia que no aporta valor estructural. A día de hoy, este tipo de tecnología está dando paso a otro tipo más dependiente de la informática: el diseño generativo. Con este método se introducen valores de fuerza y límites espaciales debidos a las piezas colindantes en un *software* que genera hasta cientos de posibles diseños. El ingeniero luego puede decidir cuál escoger y pulir. Las estructuras que surgen de este tipo de programas suelen ser porosas e irregulares y, por tanto, no rentables con métodos de fabricación tradicionales. La evolución de la impresión 3D abre un nuevo abanico de posibilidades y hace viables estos proyectos.

Una posible continuación de este proyecto sería poner a prueba el diseño generativo como método para elaborar la culata de un fusil de asalto. Este es un campo que se está comenzando a explorar como se puede apreciar en la Figura 5-2.



Figura 5-2 Biatleta sueco y su carabina de diseño generativo

Además, la naturaleza de este trabajo es teórica prácticamente en su totalidad. En una posible continuación, sería interesante utilizar un acelerómetro para medir la aceleración y tener una idea más exacta de las cargas. Como se ha explicado previamente en el apartado 2 de este trabajo, los acelerómetros son los sensores que mejor se adaptan a este tipo de trabajo, por proporcionar datos fiables sin tener que alterar el fusil de manera irreversible.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Hassani y E. Hinton «Homogenization and Structural Topology Optimization», Universidad de Shahroud, Shahroud, 1999.
- [2] J. Mares Carreño «La Optimización Estructural y sus Aplicaciones», Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2021. [En línea]. Available: <https://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/916-cyt-numero-82/1889-la-optimizacion-estructural-y-sus-aplicaciones#:~:text=B%2C%20Hassani%20et%20al%20en,funcionalidad%20y%20condiciones%20de%20manufactura>. [Último acceso: 21/02/2023]
- [3] A. Tovar, «Optimización Topológica con la Técnica de los Autómatas Celulares Híbridos», Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2005.
- [4] Eadic, «Cálculo estructural: El Método de los Elementos Finitos» [En línea]. Available: <https://eadic.com/blog/entrada/calculo-estructural-el-metodo-de-los-elementos-finitos/> [Último acceso: 21/02/2023]
- [5] G. Mirlisenna, «Método de los elementos finitos: ¿qué es?», ESSS, 2016. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/> [Último acceso: 21/02/2022]
- [6] G. Garate, «¿Qué entendemos por algoritmo?» UDE. [En línea]. Available: <https://ude.edu.uy/que-son-algoritmos/> [Último acceso: 21/02/2023]
- [7] RAE, [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/algoritmo> [Último acceso: 15/01/2023]
- [8] Solidworks, «SIMP Method for Topology Optimization», 2023. [En línea]. Available: https://help.solidworks.com/2023/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?verRdirect=1 [Último acceso: 21/02/2023]
- [9] L. Berrocal et al, «Topology optimization and additive manufacturing for aerospace components», Springer, 2018. [En línea]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-018-0061-3> [Último acceso: 21/02/2023]

- [10] A. Marchante, «Los softwares de optimización topológica para impresión 3D», 3Dnatives, 2021. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/software-optimizacion-topologica-230920212/#!> [Último acceso: 21/02/2023]
- [11] Altair, [En línea]. Available: www.altair.com.es [Último acceso: 23/01/2023]
- [12] L. Amaral, «Veja 7 motivos para se empolgar com o novo Ansys Discovery», ESSS, 2021. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/blog/novo-ansys-discovery/> [Último acceso: 21/02/2023]
- [13] J. Celigüeza Lizarza, «Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural», Universidad de Navarra, Pamplona, 2000.
- [14] M. Victoria Nicolás, «Optimización de Forma y Topología con Malla Fija y Algoritmos Genéticos», Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2016.
- [15] Futek, [En línea]. Available: <https://www.futek.com/force-sensor> [Último acceso: 01/03/2023]
- [16] J. Court, «Case Study: enDAQ Sensor Firearms Testing», Endaq, 2016. [En línea]. Available: <https://blog.endaq.com/slam-stick-x-rifle-test-blog-post> [Último acceso: 21/02/2023]
- [17] E. Higgins, «Rifle Accelerometer Update», Ammolitics, 2019. [En línea]. Available: <https://blog.ammolitics.com/2019-02-22/rifle-accelerometer-update.html> [Último acceso: 21/02/2023]
- [18] C. Suchoky y J. Ewertowski «Experimental and Finite Element Studies on Man-Rifle Reaction Force», Universidad Tecnológica de Varsovia, Varsovia, 2016.
- [19] B. Canfield-Hershkowitz, T Foster y W. Meijer, «Rifle and Shotgun Recoil Test System», California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2013.
- [20] İ. Gökdağ, O. İzgü, A. Dağkolu et al., «Design optimization and validation for additive manufacturing: a satellite bracket application», Springer, 2022. [En línea]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-022-03345-3> [Último acceso: 21/02/2023]
- [21] M. Orme, I. Madera et al., «Topology Optimization for Additive Manufacturing as an Enabler for Light Weight Flight Hardware», MDPI, 2018. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2411-9660/2/4/51> [Último acceso: 21/02/2023]
- [22] Bitfab, [En línea]. Available: <https://bitfab.io/es/blog/orientacion-impresion-3d/> [Último acceso: 21/02/2023]
- [23] All3dp, [En línea]. Available: <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/> [Último acceso: 21/02/2023]
- [24] Tractus3d, [En línea]. Available: <https://tractus3d.com/es/materials/petg/> [Último acceso: 21/02/2023]
- [25] Matweb, [En línea]. Available: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=0f66965c5b6b4efdb1d41aac857c19bb> [Último acceso: 01/03/2023]

- [26] M. Hall, «Effects of breech bolt movement on felt recoil of a gas-operated semiautomatic sporting gun», *Journal of Sports Engineering and Technology*, 2014.
- [27] Backfire, [En línea]. Available: <https://backfire.tv/recoil/> [Último acceso: 02/03/2023]
- [28] Caddin, [En línea]. Available: <https://caddin.com/wp-content/uploads/2017/04/E425801002-CARTUCHO-CALIBRE-5.56-x-45-mm-1.pdf> [Último acceso: 02/03/2023]
- [29] Armada, [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquesinfanteria/prefLang-es/05material-armamento-infanteria-marina--06armamento--fusil-g-36g-g36ke-es> [Último acceso: 02/03/2023]
- [30] Heckler-Koch, [En línea]. Available: <https://www.heckler-koch.com/en/Products/Military%20and%20Law%20Enforcement/Assault%20rifles/G36?section=overview&s=true> [Último acceso: 02/03/2023]
- [31] HK-USA, [En línea]. Available: <https://hk-usa.com/hk-models/g36c/> [Último acceso: 08/03/2023]
- [32] Aristegui, [En línea]. Available: <https://www.aristegui.info/poliestireno-de-alto-impacto-un-antes-y-un-despues/> [Último acceso: 08/03/2023]
- [33] Engineering ToolBox, [En línea]. Available: <https://www.engineeringtoolbox.com> [Último acceso: 08/03/2023]
- [34] Way of Martial Arts, [En línea]. Available: <https://wayofmartialarts.com/average-force-of-a-punch/> [Último acceso: 16/03/2023]
- [35] Blog ZT, [En línea]. Available: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.zonatactica.es%2Fblog%2Freticul-a-del-hk-g36%2F&psig=AOvVaw29w_4rfZzg32JSH_8Acevr&ust=1679064741302000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCJck6t3Z4P0CFQAAAAAdAAAAABAE [Último acceso: 16/03/2023]
- [36] Armas, [En línea]. Available: <https://www.armas.es/armas-militares/rifle-heckler-a-koch-g36-e-tecnologia-alemana-en-manos-espanolas> [Último acceso: 16/03/2023]
- [37] J.M. Pereiras, «¿Qué es y para qué sirve la tensión de Von Mises?», LinkedIn, [En línea]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-es-y-para-sirve-la-tensi%C3%B3n-de-von-mises-jose-manuel-pereiras> [Último acceso: 20/03/2023]
- [38] Credinformsa, «¿Cuánto tiempo tarda en descomponerse el plástico que usamos a diario?», 2020. [En línea]. Available: <https://www.credinformsa.com/cuanto-tiempo-tarda-en-descomponerse-el-plasticos-que-usamos-a-diario1/#:~:text=Se%20calcula%20que%20el%20pl%C3%A1stico,tiempo%20se%20prolonga%20a%20m%C3%A1s.> [Último acceso: 22/03/2023]

- [39] Filament2print, «PolyTerra: Un filamento de PLA ecofriendly», 2021. [En línea]. Available: https://filament2print.com/es/blog/108_un-filamento-de-PLA-ecofriendly.html [Último acceso: 22/03/2023]
- [40] Filament2print, [En línea]. Available: <https://filament2print.com/gb/special-pla/1284-pla-polyterra.html> [Último acceso:22/03/2023]

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El objeto de estudio de este trabajo es la culata del fusil HK g36 E. Este se utiliza ampliamente por las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, pero no así por civiles. En España, un civil puede obtener una licencia de armas tipo B, que permite el uso de armas de caza y armas cortas, pero no de fusiles de asalto. Por eso, cualquier trabajo sobre las modificaciones de esta pieza no afectará a la sociedad española directamente. Tampoco tendrá un impacto económico, ya que no se pretende lanzar al mercado la culata resultante ni sustituir las utilizadas actualmente. Se utilizaría, en todo caso, en situaciones de emergencia.

Sin embargo, sí se considera que tiene implicaciones en el medio ambiente. No se ha pasado por alto que el material de polímero reforzado con fibra de carbono no es la opción más ecológica. A pesar de que este material cuenta con propiedades mecánicas y físicas excelentes, tarda en descomponerse entre 100 y 1000 años [38]. Una posible línea de acción para disminuir el impacto medioambiental es explorar los bioplásticos como material alternativo para la impresión. Uno de los últimos productos que se han desarrollado en este campo es el PolyTerra PLA. Este bioplástico es ecológico en todo su proceso de producción. PolyTerra PLA emplea una bobina de cartón, etiquetas y embalaje reciclados (Figura A1 - 1). Además, sus fabricantes procuran reducir al mínimo el uso de papel para el embalaje. Y además, Polymaker está asociado con OnePlantedTree y, por cada bobina vendida, se planta un árbol. Cada bobina genera 4 kg de dióxido de carbono y cada árbol plantado procesa hasta 22 kg al año. Por tanto, en menos de 3 meses se compensa el efecto perjudicial [39].



Figura A1 - 1 Bobina PolyTerra [39]

Por desgracia, su límite de rotura es 3 veces inferior a un PLA común y unas 25 veces menor que el polímero reforzado con fibra de carbono objeto de este TFG [40]. Aun así, las propiedades mecánicas de este filamento son considerablemente superiores a las de otros bioplásticos. Actualmente, no sería válido para realizar la pieza, pero con el continuo desarrollo tecnológico hacia productos más respetuosos con el medio ambiente, es probable que en un futuro cercano se fabrique un bioplástico que sí pueda sustituir a un polímero reforzado con fibra de carbono.

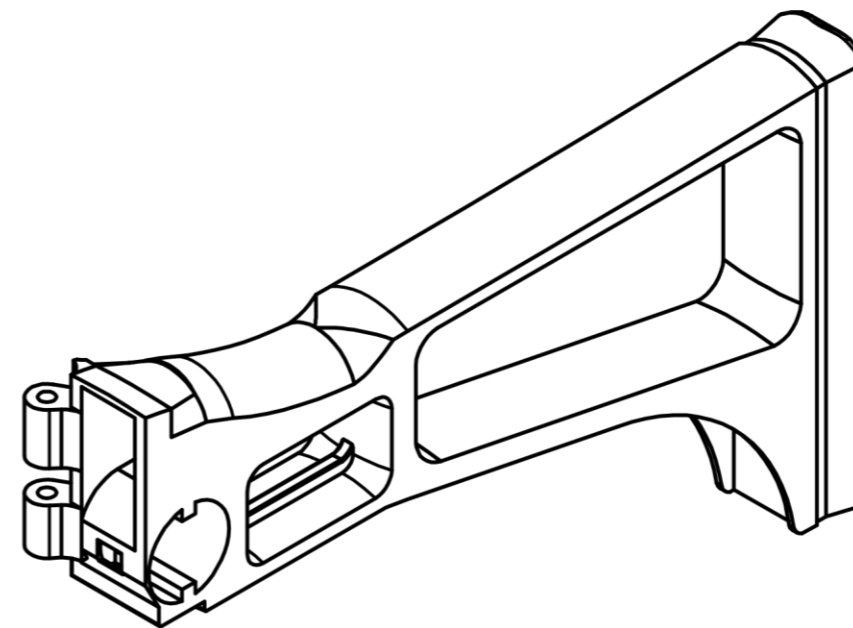
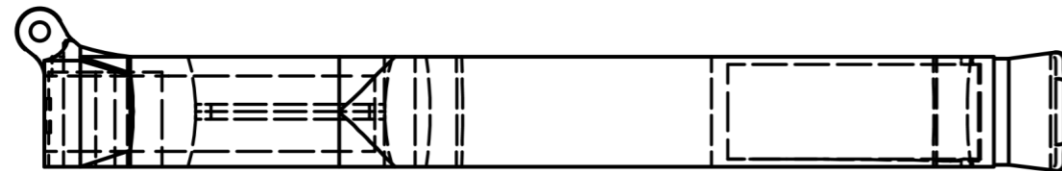
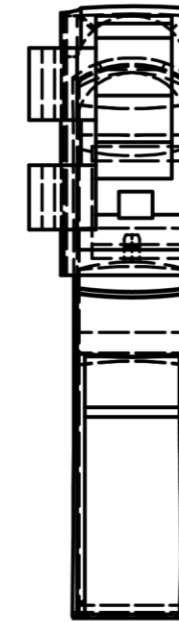
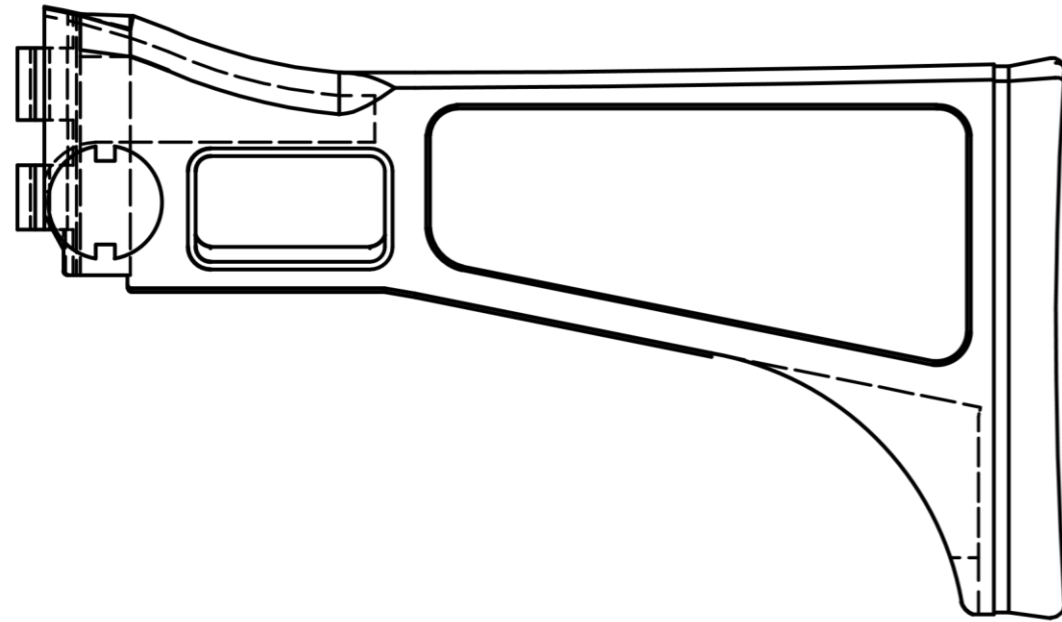
ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Este trabajo versa sobre el desarrollo de una pieza de un arma y de cómo optimizarla. Cuanto mejor pueda desempeñar el arma su función, mejor se habrá realizado el trabajo. El criterio primario con el que juzgar el desempeño de un arma militar es su capacidad de infligir bajas en el enemigo. En consecuencia, cuanto mejor se realice el trabajo, más muertos y heridos habrá en un hipotético bando enemigo. Por lo tanto, ¿se puede considerar ético emplear los conocimientos en ingeniería para diseñar o mejorar instrumentos de guerra?

Un arma no es más que una herramienta y es tan malvada o bondadosa como la mano que la empuña. Por desgracia, en este mundo hay gente con intenciones perversas, dispuesta a usar todos los medios a su disposición, incluida la violencia, para alcanzar sus oscuros fines. En un país occidental como España, la maldad en el terreno político y militar se entiende como cualquier fuerza que busque imponer su ideología y limitar las libertades de los ciudadanos, violando los derechos humanos o la Constitución. Las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado son los responsables de empuñar las armas y ofrecer incluso su vida en defensa de los ciudadanos contra todo esfuerzo opresor de sus libertades y derechos constitucionales.

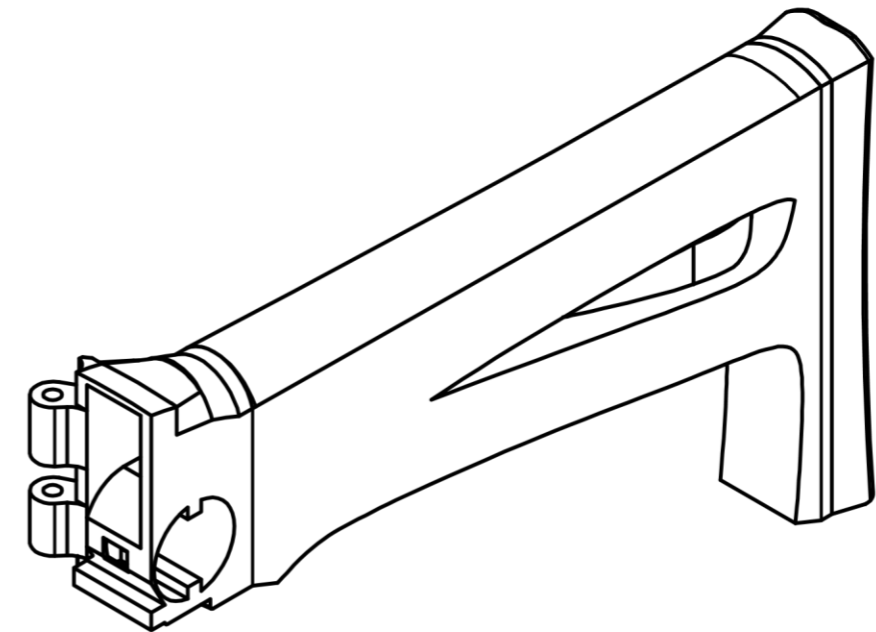
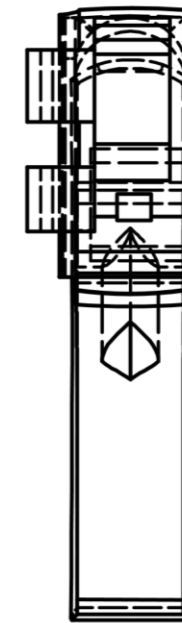
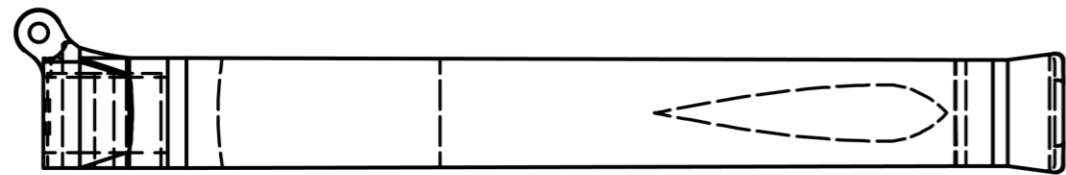
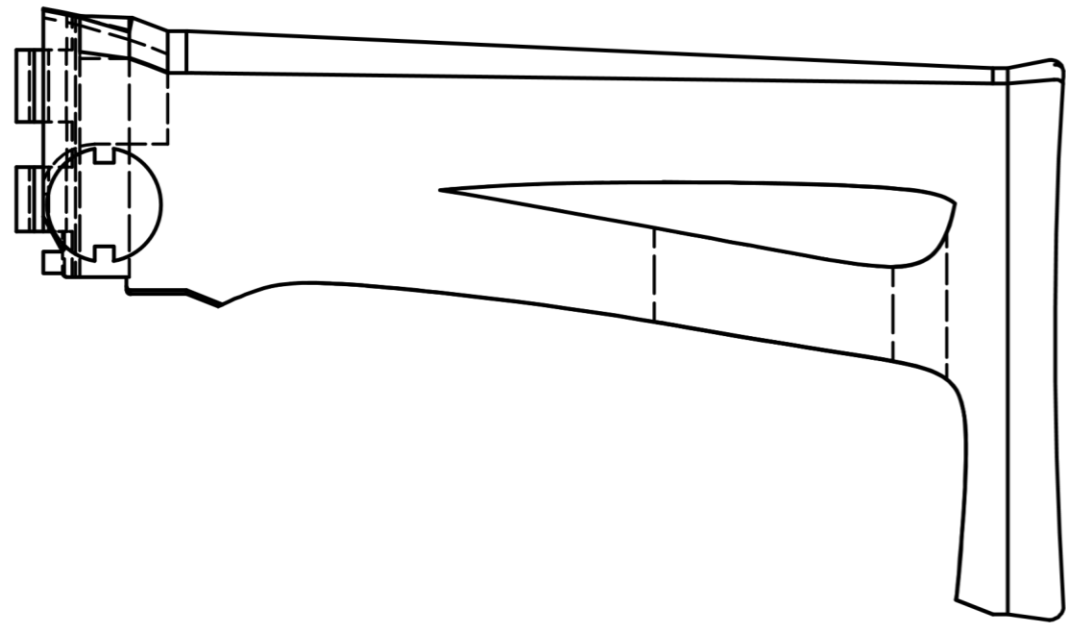
En consecuencia, el desarrollo de una pieza para un arma que pueda potencialmente aumentar su letalidad parece ser perfectamente ético siempre que se realice para aquellos que las blandirán en defensa de los ciudadanos y de sus derechos.

ANEXO III: PLANOS



Nº de plano: 1		Autor	Gonzalo Fernández-Bravo Ortiz de Lanzagorta
Formato 1:2		Designación	Culata original
Escala A3		Proyecto	Diseño de culata de fusil de asalto mediante optimización topológica





Nº de plano: 2		Autor	Gonzalo Fernández-Bravo Ortiz de Lanzagorta	
Formato		A3	Designación	Culata nueva
Escala		1:2	Proyecto	Diseño de culata de fusil de asalto mediante optimización topológica

