



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Diseño y optimización topológica de una pieza de rotor de
un helicóptero para fabricación aditiva

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Mateos Coloma, Álvaro

Tutor/a: Solano García, Lorenzo

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño y optimización topológica de una pieza de rotor de un helicóptero para fabricación aditiva

Álvaro Mateos Coloma

Tutor: Lorenzo Solano García

Curso académico 2023-24

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a aquellos que me han apoyado durante todo este trabajo, en todos los ámbitos ayudándome a seguir adelante.

También a Lorenzo, por haberme ayudado a encontrar tfg cuando pensaba que ya era tarde y, además, por brindarme la oportunidad, no sólo de visitar, sino de ponerme en contacto con diferentes empresas para realizar el proyecto.

Agradecimiento también a AIDIMME, por atenderme y poder usar su tecnología. También a Mario, Fernando y José Ramón por su trato y asistencia cuando he visitado las instalaciones. En especial a Tomás, por dedicarme parte de su tiempo de trabajo durante estos meses.

Muchas gracias a todos.

Resumen

En el presente documento se procederá a realizar el diseño inicial y posterior optimización topológica de una pieza presente en el rotor de un helicóptero con el fin de que sea fabricada mediante procesos de fabricación aditiva, concretamente DED (Directed energy deposition). Además, se explicará en qué consiste la fabricación aditiva así como sus distintas vertientes y sus ventajas respecto a los métodos de fabricación convencionales en el sector aeroespacial especialmente.

La pieza en cuestión parte de un diseño conceptual a partir del cual se supondrán sus dimensiones y cargas a las que está sometida, teniendo en cuenta una posible aplicación que se esperaría de ella.

El trabajo se desarrollará haciendo uso del software de diseño NX de SIEMENS. En un primer lugar, se diseñará y someterá a las cargas correspondientes a un diseño conceptual de la pieza (sin optimizar), que bien podría ser fabricada a partir de métodos convencionales, observando su comportamiento mediante análisis de elementos finitos. Seguidamente, se procederá a realizar la optimización topológica de la misma a partir de los resultados obtenidos de la pieza original.

Finalmente, se compararán ambos casos observando las principales diferencias entre ellos y se observarán las ventajas que puede aportar la fabricación aditiva.

Palabras clave: Fabricación aditiva, NX, análisis de elementos finitos, optimización topológica, rotor, DED.

Abstract

In the present document, the initial design and subsequent topological optimization of a helicopter rotor component will be carried out for manufacturing using additive manufacturing processes, specifically Directed Energy Deposition (DED). Additionally, an explanation of what additive manufacturing entails, its various aspects, and its advantages over conventional manufacturing methods in the aerospace sector will be provided.

This component starts from a conceptual design from which its dimensions and the loads it is subjected to will be assumed, taking into account a potential application that could be expected from it.

The work will be developed using SIEMENS' NX design software. Initially, a conceptual design of the component (unoptimized) will be created and subjected to the corresponding loads, which could be manufactured using conventional methods, and its behavior will be observed through finite element analysis. Subsequently, topological optimization will be performed based on the results obtained from the original component.

Finally, both cases will be compared, observing the main differences between them, and the advantages that additive manufacturing can offer will be highlighted.

Keywords:Additive Manufacturing, NX, Finite Element Analysis, Topological Optimization, Rotor, DED.

Índice general

Resumen	III
I Memoria	1
1 Introducción	3
1.1 Motivación	3
1.2 Estado del arte	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Alcance	5
1.5 Metodología	5
2 Marco teórico	7
2.1 Fabricación aditiva	7
2.2 Clasificación de la fabricación aditiva	8
2.2.1 Material Extrusion (MEX)	9
2.2.2 Vat Photopolymerization (VPP)	9
2.2.3 Material jetting (MJT)	9
2.2.4 Sheet lamination (SHL)	10
2.2.5 Binder Jetting (BJT)	11
2.2.6 Powder Bed Fusion Technologies (PBF)	11
2.2.7 Directed Energy Deposition (DED)	15
2.3 Aplicación de la fabricación aditiva	17
2.3.1 AM en la industria aeroespacial	17
2.3.2 AM en la industria automotriz	22
2.3.3 AM en la industria médica	24
2.4 Futuro y desafíos de la fabricación aditiva	26
2.4.1 Limitaciones de la fabricación aditiva	26
2.4.2 Retos de la fabricación aditiva para su desarrollo futuro	27
3 Desarrollo del trabajo	29
3.1 Elección de la pieza	29
3.1.1 Ubicación y misión	30
3.1.2 Estimación de las dimensiones	32
3.1.3 Estimación de las solicitaciones	35
3.1.4 Elección del material	36
3.2 Modelado de la pieza base	38
3.3 Análisis de elementos finitos del caso inicial	40
3.4 Optimización topológica	45
3.4.1 Definir el espacio de diseño	45
3.4.2 Establecer los objetivos	46
3.4.3 Definir los cuerpos de construcción	47
3.4.4 Definir las restricciones del modelo	47
3.4.5 Definir las fuerzas del modelo	47
3.4.6 Resolver	48
3.5 Rediseño de la pieza original	49
3.6 Análisis de elementos finitos del rediseño	50
3.7 Adaptación del modelo a los requisitos de fabricación	54
3.7.1 Diseño del modelo final	58
3.7.2 Análisis de elementos finitos del modelo final modificado	60
3.8 Introducción del modelo en la máquina de fabricación	62

4 Conclusiones	69
5 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	73
5.1 Industria, innovación e infraestructuras	73
5.2 Producción y consumo responsables	74
II Pliego de condiciones	75
6 Pliego de condiciones	77
6.1 Objeto	77
6.2 Condiciones técnicas	77
6.2.1 Condiciones de los materiales	77
6.2.2 Condiciones de transporte	77
6.2.3 Condiciones de seguridad	77
6.2.4 Condiciones de equipo	78
6.3 Condiciones legales	79
6.3.1 Contratista	79
6.3.2 Contrato	79
6.4 Condiciones facultativas	79
6.4.1 Dirección técnica	79
6.4.2 Contratista	79
6.4.3 Material e infraestructura	79
6.4.4 Desarrollo de la actividad	80
6.4.5 Entrega final	80
6.4.6 Control de calidad	80
6.4.7 Garantía	80
6.4.8 Certificación y aeronavegabilidad	80
6.5 Condiciones económicas	81
6.5.1 Presupuesto	81
6.5.2 Medios de producción	81
6.5.3 Penalización	81
6.5.4 Pagos	81
III Presupuesto	83
7 Presupuesto	85
7.1 Costes de personal	85
7.2 Costes de equipo	86
7.2.1 Hardware	86
7.2.2 Software	86
7.3 Costes de material	87
7.4 Costes de fabricación	87
7.5 Costes totales	88
Bibliografía	90
IV Anexos	93
A Análisis de elementos finitos (malla 2mm)	95
A.1 Modelo inicial	95
A.1.1 Desplazamiento	95
A.1.2 Von Mises	96
A.1.3 Fuerza de reacción	96
A.2 Modelo optimizado	97
A.2.1 Desplazamiento	97
A.2.2 Von Mises	98
A.2.3 Fuerza de reacción	99
A.3 Modelo final	100

A.3.1	Desplazamiento	100
A.3.2	Von Mises	101
A.3.3	Fuerza de reacción	101
B	Análisis de elementos finitos (malla 4mm)	103
B.1	Modelo inicial	103
B.1.1	Desplazamiento	103
B.1.2	Tensión de Von Mises	104
B.1.3	Fuerza de reacción	105
B.2	Modelo optimizado	106
B.2.1	Desplazamiento	106
B.2.2	Tensión de Von Mises	107
B.2.3	Fuerza de reacción	109
B.3	Modelo final	111
B.3.1	Desplazamiento	111
B.3.2	Tensión de Von Mises	112
B.3.3	Fuerza de reacción	115
C	Planos de la pieza final para fabricación	117
D	Imágenes de la fabricación	121

Índice de figuras

2.1	Zona de aplicación de la fabricación aditiva. [3]	8
2.2	Clasificación de las técnicas de fabricación aditiva. [3]	8
2.3	Partes de una máquina de fabricación DED que usa haz de electrones como fuente de energía. [11]	15
3.1	Diseño conceptual de una pieza para ser fabricada mediante procesos AM. [6]	30
3.2	Scissors link en el rotor principal de un helicóptero. Fuente: elaboración propia.	31
3.3	Detalle del rotor principal de un helicóptero. Fuente: elaboración propia.	31
3.4	Scissor link. Fuente: elaboración propia	32
3.5	Zona del plato de distribución. Fuente: elaboración propia	32
3.6	Plano de la pieza original.	34
3.7	Imagen del Bell 212. [5]	36
3.8	Microestructura del Ti64 en diferentes planos de fabricación. [10]	37
3.9	Resistencia a fatiga del Ti-6Al-4V. [10]	38
3.10	Croquis de la parte posterior.	39
3.11	Modelado de la pieza original.	39
3.12	Resultado final de la pieza base.	40
3.13	Pieza original con una malla de 2 mm.	41
3.14	Fuerzas y restricciones del modelo.	42
3.15	distribución del desplazamiento.	42
3.16	Esfuerzo de Von Mises.	43
3.17	Detalle del esfuerzo de Von Mises.	43
3.18	Fuerza de reacción.	44
3.19	Detalle de la fuerza de reacción	44
3.20	Espacio de diseño.	46
3.21	Proceso de selección de uno de los cuerpos de construcción.	47
3.22	Modelo con las fuerzas y restricciones establecidas.	48
3.23	Solución de la optimización topológica.	49
3.24	Rediseño del modelo original.	50

3.25	Resultado final del rediseño.	50
3.26	Generación de la malla del nuevo modelo.	51
3.27	Fuerzas y restricciones del nuevo modelo.	51
3.28	Desplazamiento de la pieza tras la optimización.	52
3.29	Tensiones de Von Mises a lo largo de la pieza.	52
3.30	Zonas de concentración de tensiones.	53
3.31	Fuerza de reacción de la pieza optimizada.	53
3.32	Análisis de desmoldeo plano ZX.	55
3.33	Análisis de desmoldeo plano ZY.	55
3.34	Análisis de desmoldeo de la pieza en perspectiva.	55
3.35	Modelo para introducir en la máquina de fabricación.	56
3.36	Análisis de desmoldeo plano ZY.	56
3.37	Análisis de desmoldeo de la pieza en perspectiva.	56
3.38	Análisis de desmoldeo plano ZX.	57
3.39	Modelo redondeado.	57
3.40	Detalle del soporte central.	57
3.41	Modelo final.	58
3.42	Modificación soporte central	58
3.43	Interior del soporte central	58
3.44	Modelo final modificado.	59
3.45	Pieza final.	60
3.46	Malla y restricciones del modelo final.	60
3.47	Desplazamiento del modelo final.	61
3.48	Tensiones de Von Mises a lo largo de la pieza.	61
3.49	Zonas de concentración de tensiones.	61
3.50	Fuerza de reacción a lo largo de toda la pieza.	62
3.51	Zona de enganche posterior.	62
3.52	Zona de enganche anterior.	62
3.53	Interior del prototipo ATiLA. Fuente: Elaboración propia.	63
3.54	Depósito de material. Fuente: Elaboración propia.	64
3.55	Parte superior del prototipo ATiLA. Fuente: Elaboración propia.	64
3.56	Impresora M600. [9].	65
3.57	Proceso de fabricación. Fuente: Elaboración propia.	66

3.58 Pantalla táctil de la impresora. Fuente: elaboración propia.	67
A.1 Desplazamiento	95
A.2 Distribución de la tensión de Von Mises	96
A.3 Fuerza de reacción	96
A.4 Fuerza de reacción	97
A.5 Desplazamiento	97
A.6 Distribución de la tensión de Von Mises	98
A.7 Distribución de la tensión de Von Mises	98
A.8 Distribución de la tensión de Von Mises	99
A.9 Fuerza de reacción	99
A.10 Fuerza de reacción	100
A.11 Desplazamiento	100
A.12 Distribución de la tensión de Von Mises	101
A.13 Distribución de la tensión de Von Mises	101
B.1 Desplazamiento	103
B.2 Desplazamiento	104
B.3 Distribución de la tensión de Von Mises	104
B.4 Distribución de la tensión de Von Mises	105
B.5 Fuerza de reacción	105
B.6 Fuerza de reacción	106
B.7 Desplazamiento	106
B.8 Desplazamiento	107
B.9 Distribución de la tensión de Von Mises	107
B.10 Distribución de la tensión de Von Mises	108
B.11 Distribución de la tensión de Von Mises	108
B.12 Distribución de la tensión de Von Mises	109
B.13 Fuerza de reacción	109
B.14 Fuerza de reacción	110
B.15 Fuerza de reacción	110
B.16 Desplazamiento	111
B.17 Desplazamiento	111
B.18 Desplazamiento	112

B.19 Distribución de la tensión de Von Mises	112
B.20 Distribución de la tensión de Von Mises	113
B.21 Distribución de la tensión de Von Mises	113
B.22 Distribución de la tensión de Von Mises	114
B.23 Distribución de la tensión de Von Mises	114
B.24 Fuerza de reacción	115
B.25 Fuerza de reacción	115
B.26 Fuerza de reacción	116
C.1 Plano de la pieza final de fabricación.	118
C.2 Detalle la pieza final de fabricación.	119
D.1 Máquina en funcionamiento. Fuente: elaboración propia.	121
D.2 Máquina en funcionamiento. Fuente: elaboración propia.	122
D.3 Máquina en funcionamiento. Fuente: elaboración propia.	123
D.4 Compartimento superior. Fuente: elaboración propia.	124
D.5 Cabezal desmontado. Fuente: elaboración propia.	125

Índice de cuadros

3.1	Medidas scissor link del hangar.	32
3.2	Características del Bell 212.	35
3.3	Fuerzas soportadas por el componente.	36
3.4	Composición Ti-6Al-4V. [10].	36
3.5	Propiedades mecánicas Ti-6Al-4V [10].	37
3.6	Características de la M600 [9].	65
5.1	Evaluación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en diferentes niveles de prioridad.	73
7.1	Coste de personal.	86
7.2	Coste del hardware.	86
7.3	Coste del software	87
7.4	Coste del Ti-6Al-4V.	87
7.5	Presupuesto fabricación en AIDIMME.	88
7.6	Presupuesto mecanizado.	88
7.7	Presupuesto final.	89

Parte I
Memoria

Capítulo 1 Introducción

1.1. Motivación

En la actualidad, las empresas del sector aeronáutico se enfrentan a una serie de retos relacionados con la productividad, el diseño, el impacto medioambiental y la calidad y seguridad de sus productos. Se trata de una industria que se mueve en un mercado altamente cambiante caracterizado por la adaptación a las nuevas necesidades y, especialmente, por unos tiempos de entrega muy cortos y márgenes de beneficio muy reducidos que hace necesario el correcto aprovechamiento de los recursos. Además, estas empresas se encuentran inmersas en un entorno altamente competitivo en el que cada una de ellas busca posicionarse por encima de la competencia en la cadena producción.

La rentabilidad económica de estas empresas se hace realmente complicada debido a los altos requerimientos de calidad y seguridad, los ajustados tiempos de entrega y los elevados costes de mantenimiento y fabricación. El sector aeronáutico se caracteriza por tener unos márgenes beneficios muy reducidos. En 2024 se estima que el sector aéreo consiga un margen de beneficio de un 2.7%, que supone un aumento frente al 2.6% obtenido en 2023 [2]. Esta es una de las razones que justifica que uno de los principales objetivos de la industria aeronáutica sea reducir al máximo el peso estructural de las aeronaves con el fin de transportar mayor carga de pago o mejorar sus prestaciones de autonomía, rango, etc... así como reducir los costes de la compañía para maximizar los beneficios. Estos dos conceptos vienen marcados por el compromiso que tienen con la seguridad y aeronavegabilidad de la aeronave en cuestión. Para ello, se ha abordado el problema desde diferentes puntos de vista, como la implementación de materiales compuestos que presentasen una buena relación en cuanto a prestaciones y precio o el uso de determinadas aleaciones. Además, también se ha buscado la reducción de los costes y tiempos de fabricación pues este es uno de los procesos que mayores costes generan a las compañías. Por otra parte, no se debe olvidar que el sector aeronáutico es uno de los más contaminantes, razón por la cuál cada vez son más las empresas y gobiernos que apuestan por un cielo "limpio". Por ello, existen multitud de proyectos para tratar de reducir su impacto medioambiental como la implementación de baterías de hidrógeno en la planta propulsiva o el uso de combustibles alternativos de origen vegetal.

En este contexto de necesidad de innovación en el sector aeronáutico, surgen los procesos de fabricación aditiva, considerados en muchas aplicaciones como una nueva revolución industrial. Este nuevo tipo de fabricación se subdivide en numerosas técnicas que, a rasgos generales, permiten crear piezas de geometrías complejas que por otros procesos de fabricación tradicionales no se podrían hacer, una reducción de peso considerable que conlleva una reducción de costes de producción y material muy importante y una disminución del tiempo de fabricación muy notable.

La fabricación aditiva, llamada así debido a que se trata de un proceso en el que se va añadiendo material capa por capa sobre la pieza final, ha ido mejorando notoriamente desde su aparición. Las técnicas de fabricación han ido mejorando continuamente creando máquinas cada vez más rápidas, potentes y fiables con la capacidad de trabajar con un abanico muy amplio de materiales.

No obstante, su escaso tiempo de existencia en comparación a otros métodos y técnicas de fabricación hacen de la fabricación aditiva un terreno inexplorado con un potencial muy grande para generar un impacto en la industria aeronáutica.

1.2. Estado del arte

La fabricación aditiva (AM), también llamada impresión 3D, tuvo su origen en la década de los 70 del siglo pasado con la aparición de los primeros equipos y materiales de fabricación aditiva. Posteriormente, en 1981, Hideo Kodama, del Instituto Municipal de Investigaciones Industriales de Nagoya, inventó dos procesos de fabricación aditiva de un modelo de plástico tridimensional con un polímero fotoendurecible. Y en 1984 aparecieron las primeras patentes para el proceso de estereolitografía (SLA), que es una tecnología de fabricación aditiva que emplea una resina que cura mediante luz ultravioleta y un láser que la solidifica para construir los objetos capa por capa una encima de otra. Este proceso se conoce popularmente como *impresión 3D*. Sin embargo, esta tecnología fue abandonada por parte de las empresas del momento por falta de perspectiva empresarial. Cabe destacar que es en esta época cuando se diseña el formato de archivo STL, formato que es aceptado y utilizado por la mayoría del software de impresión 3D actual como NX de SIEMENS.

Este nuevo tipo de fabricación empezó a interesar a arquitectos y diseñadores de productos y mobiliario por su versatilidad a la hora de crear formas complejas y diseños novedosos. Con el tiempo, esta tecnología se ha diversificado enormemente dando lugar a diferentes métodos de fabricación que han permitido el uso de distintos materiales más allá de los fotopolímeros usados en los inicios con los primeros métodos de impresión 3D. Todo ello gracias en gran medida a los sistemas de fusión de baño en polvo, es decir, aquellos en los que se funden capas de material de la pieza, y a la deposición por energía dirigida. Como consecuencia, los tipos de materiales con los que se puede aplicar la fabricación aditiva van en aumento, de manera que las opciones de polvo de metal atomizado ahora incluyen aceros de baja aleación, aceros para herramientas, aceros inoxidable y dúplex, aleaciones de cobalto, aleación de níquel, aleaciones de aluminio y aleaciones de titanio.

Se espera que los métodos convencionales de mecanizado se puedan beneficiar de las técnicas de fabricación aditiva, de manera que combinando estas dos técnicas de fabricación se mejore su productividad y rentabilidad. Así, se podrían plantear soluciones híbridas en las que el inicio y final de la fabricación de una pieza sea con procesos de AM, pero que entre ellos, se emplease mecanizado tradicional.

En la actualidad, la fabricación aditiva plantea un modelo de producción con tiempos de fabricación más cortos y con una versatilidad muy grande, tanto en materiales a utilizar como en la geometría de sus diseños. Algunas de las ventajas que presenta son la sostenibilidad, la integración del IoT (Internet of Things), la eficiencia, la obtención de piezas más ligeras, la reducción de costes o las mejoras en el diseño. De ahí que sectores como el aeronáutico se hayan interesado por este tipo de tecnología, entre otros motivos, por la reducción del peso de las piezas fabricadas. Otros sectores, como la medicina, aprovechan la gran personalización que ofrece este servicio, aplicable a prótesis o modelos dentales entre otros. El sector automotriz, cambiante y sujeto a las demandas de sus clientes y el mercado, encuentra en la fabricación aditiva un método rápido y seguro para gestionar estas tendencias, como por ejemplo, prototipos de motores de refrigeración ya que las piezas metálicas pueden producirse de forma ágil.

Por todo ello, este novedoso tipo de fabricación se considera una de las bases de la llamada cuarta revolución industrial, también llamada industria 4.0, entre las que se encuentra además, la robótica, la IA, el Big Data o la automatización. En los últimos años ha experimentado un crecimiento y desarrollo muy importante que apunta a marcar una diferencia considerable en los procesos de fabricación en la industria. En España, algunas de las regiones que están apostando por este tipo de tecnología son Asturias, Andalucía, País Vasco, Valencia, Cataluña o Madrid, siendo el País Vasco una región clave por su arraigada cultura del metal. Según ADDITMAT (Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D) en 2022 se registró un incremento de las ventas de máquinas del 24,5%, y del 36,2% en servicios de fabricación de piezas por aditivo.

1.3. Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado consiste en aplicar los procesos de fabricación aditiva a una pieza en cuestión con el fin de justificar y evidenciar las ventajas que presenta este tipo de tecnología frente a los métodos de fabricación convencionales, concretamente en el sector aeronáutico. Asimismo, se pretende explicar en qué consiste la fabricación aditiva, así como sus diferentes vertientes y qué beneficios se podrían esperar de ella.

Para cumplir con todo esto, se necesitarán realizar una serie de pasos que se plantean en función de objetivos parciales:

- Revisión bibliográfica y explicación de los procesos de fabricación aditiva, qué ventajas y ámbitos de aplicación presenta cada uno de ellos.
- Búsqueda de una pieza relacionada con el sector aeronáutico susceptible de ser optimizada mediante alguno de los procesos mencionados en el apartado anterior. Ello conlleva determinar sus dimensiones, cargas que soporta, área de trabajo...
- Diseño inicial de la geometría de la pieza sin optimizar y primer análisis de elementos finitos con el fin de obtener su comportamiento
- Optimización topológica de este primer diseño inicial para obtener una pieza fabricable mediante procesos de fabricación aditiva y segundo análisis de elementos finitos de la pieza optimizada.
- Comparación de ambos casos y obtención de conclusiones

1.4. Alcance

Una vez expuestos los objetivos finales del presente trabajo, es importante aclarar dónde residen los límites o cuál es el alcance máximo de la investigación, con el objetivo de concretar qué es lo que verdaderamente se está tratando de realizar con este trabajo, y qué no es el objetivo principal del mismo.

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es, como ya se ha comentado, diseñar una pieza para fabricación aditiva a partir de un diseño conceptual. Esto es, para una misma pieza, bajo unas mismas solicitudes, ver cómo se comporta y cómo puede ser mejorada con la tecnología de la fabricación aditiva, centrándose por tanto, en el proceso de diseño que se podría aplicar tanto a la pieza de trabajo en cuestión como a cualquier otra que se quiera mejorar para ser fabricada mediante procesos de fabricación aditiva. Queda fuera de las pretensiones de este trabajo, estimar con exactitud cuáles son las fuerzas que aparecen en el rotor de un helicóptero o las dimensiones exactas de la pieza. No obstante, dichos datos serán escogidos en base a estudios y a un orden de magnitud razonable para dotar al estudio de cierta rigurosidad. Por otra parte, la misión de la pieza es escogida con el único propósito de dotar de dimensiones y cargas a la misma, con el fin de evitar que estas sean seleccionadas de forma inverosímil y para, además, dar al estudio un enfoque aeronáutico.

Otro alcance de este trabajo es explicar los procesos de fabricación aditiva que existen para que el lector pueda comprenderlos y conocerlos, al mismo tiempo que detallar el proceso de trabajo seguido para que pueda servir de ejemplo en caso de querer hacer un estudio similar.

1.5. Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos, se procede a exponer los pasos que se seguirán a lo largo del desarrollo de todo el trabajo.

En primer lugar, se realizará una investigación sobre las tecnologías de fabricación aditiva a través de diversos artículos y libros con el fin de comprender el área de estudio y poder explicarlas adecuadamente, además de poder determinar así, el tipo de pieza con la que se trabajará.

A continuación, se deberá encontrar un diseño conceptual de una pieza que se pueda optimizar. Ello requerirá otorgarle una posible función en el ámbito aeronáutico, a partir del cual, se determinará la posición física que va a ocupar junto a sus posibles dimensiones, así como su misión, material y cargas a las que estará sometida durante su funcionamiento. Con esta información, se podrá realizar un modelado haciendo uso del software NX de SIEMENS con el que se podrá determinar el comportamiento de la pieza bajo las solicitudes deducidas

anteriormente.

El siguiente paso será realizar la optimización topológica de la pieza mediante la función correspondiente de NX, seleccionando los espacios que se quieren respetar del modelo original y teniendo en cuenta las tensiones a soportar. Se realizará un segundo análisis de elementos finitos con esta nueva geometría para observar las posibles mejoras del comportamiento.

Se realizará una comparación entre ambos modelos y se observarán sus diferencias a la vez que se obtendrán las conclusiones pertinentes. Además, se tratará de obtener la pieza fabricada en la realidad.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es un nuevo concepto de producción industrial en el que un material se va depositando capa por capa de manera controlada sobre la pieza final. El apellido *aditiva* viene precisamente de este concepto: el material se va añadiendo donde se requiere, y es lo que la diferencia de métodos de los fabricación convencionales, normalmente basados en la sustracción de material durante el conformado. Precisamente esta cualidad de ir añadiendo el material capa por capa es la que le permite crear geometrías complejas. Otras cualidades remarcables que tiene este proceso de fabricación son que, por una parte, los productos se pueden manufacturar directamente desde un modelo CAD 3D sin necesidad de usar herramientas adicionales o arreglos, y por otra la reducción de los tiempos de producción.

Los procesos de fabricación aditiva se pueden dividir en cuatro grupos según:

1. El tipo de material
2. La fuente de la energía utilizada
3. El proceso de formación de capas
4. La forma del producto final

Estos factores tienen un impacto notable en la calidad superficial del producto final, la precisión de las dimensiones, las propiedades mecánicas y el tiempo total de producción.

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, los beneficios que presenta esta tecnología son muy numerosos: reducción de los tiempos de producción, obtención de formas complejas, facilidad para identificar errores entre capas en productos caros de corregir o ensamblajes de una pieza o varios materiales. Y es que la influencia de estos procesos de fabricación abarca el desarrollo de producto y su calidad, el proceso de producción y la posición de la compañía en el mercado. Además, puede ser la solución a la adaptación a las demandas cambiantes del mercado, debido a la gran capacidad de personalización de los productos que ofrece, permitiendo individualizar los productos a las necesidades de cada cliente. Por otra parte, permite además usar varios materiales sobre una misma pieza, lo que abre un gran abanico de posibilidades sobre opciones de diseño. No obstante, esta última característica viene limitada por el hecho de que los programas modernos CAD no trabajan con productos hechos de materiales no homogéneos.

Sin embargo, todas estas beneficiosas cualidades tienen una contraparte. Los productos hechos mediante fabricación aditiva no suelen ser baratos. Este precio viene marcado por el tiempo de manufacturación, el coste de la máquina y su consecuente mantenimiento, el trabajo del operario (tanto en el proceso de fabricación como en mantenimiento, limpieza o post-procesado) así como el precio de los materiales. Todo ello, puede llegar a dificultar la decisión de cuándo aplicar fabricación aditiva para maximizar los beneficios de esta. Basándose en el coste de precisión del desarrollo y producción, se concluye que existe una zona óptima donde es aplicable la fabricación aditiva, como se muestra en la Figura 2.1.

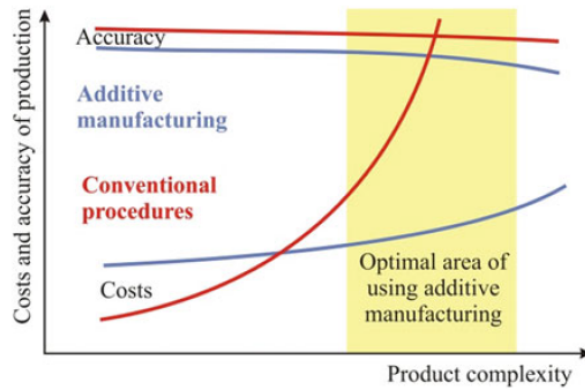


Figura 2.1: Zona de aplicación de la fabricación aditiva. [3]

Como se puede observar, esta zona es aquella en la que los costes del producto son más elevados, así como la complejidad del mismo según procedimientos convencionales. De esta manera, usando fabricación aditiva se pueden disminuir los costes y reducir el nivel de precisión requerido.

2.2. Clasificación de la fabricación aditiva

La fabricación aditiva se puede clasificar en siete grupos atendiendo a la técnica utilizada en el proceso de manufacturación así como según el estado del material en el proceso.

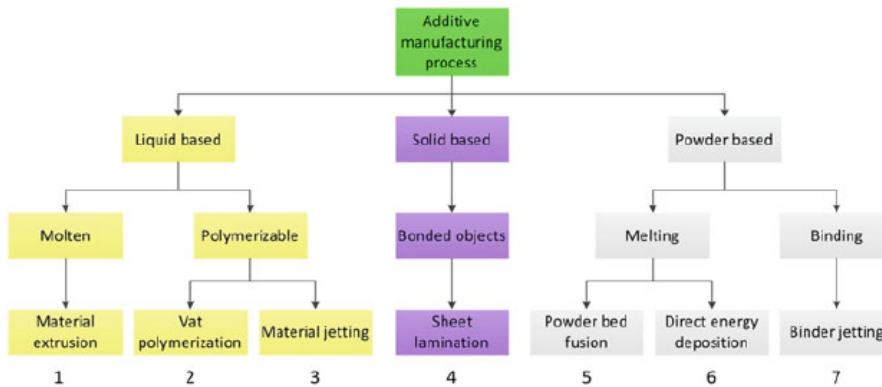


Figura 2.2: Clasificación de las técnicas de fabricación aditiva. [3]

Como muestra la Figura 2.2, se encuentran las siguientes siete categorías de los procesos más usados comercialmente en la fabricación aditiva:

1. Extrusión del material (MEX).
2. Fotopolimerización de una cubeta (VPP).
3. Impresión por chorro de material (MJT).
4. Laminación de hojas (SHL).
5. Fusión en lecho de polvo (PBF).
6. Deposición de energía dirigida (DED).
7. Inyección de agente aglutinante (BJT).

A continuación, se procederá a explicar cada una de estas técnicas. Cabe recalcar que serán referidas en su nombre en inglés debido a su amplio uso en la industria en este idioma.

2.2.1. Material Extrusion (MEX)

La extrusión del material es un proceso típico de impresión 3D en el cual el material es cuidadosamente depositado a través de un orificio o conducto. Generalmente se emplean materiales termoplásticos, siendo posible usar cerámicos, hormigón o incluso chocolate (en la industria alimenticia). Se conoce también como *Fused Filament Fabrication* (FFF) y es uno de los procesos más populares para los aficionados de la impresión 3D.

La extrusión 3D de material utiliza un filamento de material termoplástico como base. El filamento se alimenta desde una bobina a través de una cabeza de extrusión calefactada y móvil. El material se deposita en una placa calentada previamente para lograr una mayor adherencia y posteriormente, se va depositando el material directamente sobre la pieza en crecimiento. La cabeza de extrusión se mueve mediante control computacional, con al menos 3 ejes de movimiento en arquitecturas cartesianas, aunque otros sistemas, como el polar, están ganando popularidad. Finalmente, una capa se va depositando sobre la anterior hasta que toda la pieza ha sido conformada.

Los materiales que se pueden aplicar son muy variados, aunque los más populares son termoplásticos como el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Ácido Poliláctico (PLA), Poliestireno de Alto Impacto (HIPS), Poliuretano Termoplástico (TPU) o Poliamidas Alifáticas (PA, también conocidas como Nylon). Los materiales compuestos se pudieron incorporar a esta técnica mediante la implementación de múltiples cabezales en la misma impresora 3D. En estos casos, un cabezal va depositando el filamento de material de manera normal mientras que otro cabezal va depositando fibras de material compuesto encima. De esta manera, se dota a las piezas de una resistencia adicional. No obstante, también se puede hacer con un solo cabezal con la condición de que el material termoplástico base esté presente en suficiente cantidad para garantizar la fusión entre capas. En consecuencia, una mezcla de dos materiales en un solo filamento para impresión 3D con madera (partículas de madera incrustadas en Ácido Poliláctico), con metales e incluso con carbono (fibras de carbono incrustadas en el termoplástico) es posible.

2.2.2. Vat Photopolymerization (VPP)

Esta estrategia de fotopolimerización 3D se basa en monómeros u oligómeros (molécula formada por varias unidades estructurales similares enlazadas en cantidad moderada) en estado líquido que pueden ser curados o fotopolimerizados bajo la exposición a una luz de una determinada longitud de onda. Se necesita además un fotoiniciador que permita absorber la energía fotolítica de la luz y crear así especies reactivas (como iones) que impulsen el crecimiento de la cadena del polímero.

Un ejemplo de esta técnica es la estereolitografía, cuyo principio de funcionamiento es que el polímero solidifica cuando es expuesto a una fuente de luz. La plataforma de construcción está situada justo debajo de la superficie del polímero líquido. Se usa un láser de Helio-Cadmio o Argón que genera y focaliza la luz ultravioleta que luego escanea la superficie. Seguidamente, la plataforma baja la distancia correspondiente al grosor de la siguiente capa. Se emplea un mecanismo de barrido para evitar que se formen burbujas de aire durante el proceso. Adicionalmente, se va construyendo una estructura de soporte que mantenga la forma del material que está en estado líquido y que se retira al finalizar el producto. Finalmente, el exceso de producto es retirado para su posible reutilización y se deja curar la pieza un mínimo de una hora para asegurar la solidificación del líquido entre capas.

Las ventajas de este tipo de técnicas son: una buena combinación de velocidad, precisión y acabado, alta resolución de los pequeños detalles, logro de capas muy finas y una buena productividad y producción de productos transparentes. Algunos inconvenientes son: el alto coste de los materiales y su correcto almacenamiento, riesgo de distorsión en el curado final del producto o fragilización excesiva.

Algunos materiales comúnmente utilizados en la estereolitografía son el metacrilato, resina epoxy o polipropileno.

Finalmente, el uso de estos productos suele ser prototipado, productos funcionales o modelado de herramientas entre otros.

2.2.3. Material jetting (MJT)

Se trata de un tecnología con gran potencial para fabricar componentes metálicos, tanto de un solo material como multimateriales, con un acabado que no se puede conseguir con las técnicas AM basadas en polvo. En esta técnica, el material líquido se solidifica después de un proceso de fotopolimerización similar al del caso anterior.

El resultado son piezas con propiedades mecánicas y térmicas homogéneas, pero a diferencia del caso anterior, no requiere un proceso de curación para alcanzar sus propiedades óptimas, pues su espesor de capa es varios órdenes de magnitud inferior al del VPP.

El proceso de conformado consiste en un contenedor con un orificio y un actuador que genera un pulso de presión para parar el flujo del fluido. El contenedor está cargado con el material en cuestión, que puede estar tanto en estado sólido (cable, perdigones, barras, que luego pasan a estado líquido) o en estado líquido directamente. Este material, es calentado por encima de su punto de fusión, de manera que el material fundido fluye hasta la boquilla debido a una presión externa o fuerzas capilares. Una vez llega al orificio de salida, se aplica una fuerza para expulsarlo a la plataforma de construcción, de forma continua o bajo demanda (drop-on-demand, DoD). En la primera forma, se aplica una presión para que el material sea expulsado de manera continua y, al llegar a la boquilla este flujo se divide en una corriente de gotas a una cierta distancia por debajo de la boquilla. Este método permite llegar a ratios del orden de 40000 gotas por segundo, dependiendo del tamaño y la velocidad. Estas gotas poseen un diámetro del doble del diámetro del orificio, y se pueden conseguir gotas más grandes con frecuencias menores. No obstante, esta técnica sólo se puede emplear con materiales conductores. Por otra parte, en la variante discontinua, las gotas, perfectamente definidas, son expulsadas sólo cuando es deseado. En este caso, las gotas tienen aproximadamente el mismo tamaño que el orificio. Existen varios mecanismos de actuación para expulsar el material como puede ser el piezoeléctrico, neumático o magnetohidrodinámico. La principal ventaja respecto a la otra variante es que sólo se expulsan las gotas deseadas, haciendo de éste un método más eficiente, además de otorgar más control sobre las gotas, la velocidad y los tiempos a pesar de ser algo más lento. Existe también otra técnica gota a gota llamada *laser-induced forward transfer* (LIFT), en la que se irradia un láser sobre una delgada película predispuesta sobre un soporte transparente. La proporción irradiada del metal se funde y se producen microgotas. Cabe destacar que al situar la capa metálica bajo el soporte transparente, además de añadir complejidad al proceso, puede originar problemas de compatibilidad. La técnica de LIFT permite trabajar con un abanico muy grande de materiales metálicos puros desde bajas a altas temperaturas ya que no se necesita un contenedor para el material. No obstante, el acabado se ve perjudicado por la morfología irregular de las gotas debido al láser, las consecuencias del impacto y la formación de gotas satélites.

Los materiales usados son fotopolímeros termoestables que vienen en estado líquido. La propiedad de estos materiales de ser sensibles a la luz provoca que sus propiedades puedan cambiar a lo largo del tiempo.

Un ejemplo es la tecnología PolyJet, que combina características de la estereolitografía y la impresión 3D. Se trata de una cabeza de impresión con múltiples boquillas que se mueven a lo largo del eje y aplicando capas de un material polimérico fotosensible en una capa de $16\mu\text{m}$, que es, aproximadamente, 5 veces más pequeña que el grosor de capa de la estereolitografía. Cada una de estas capas se endurecen mediante luz ultravioleta inmediatamente después de su aplicación, de manera que no es necesario un proceso de curación. También en este proceso, es necesaria una estructura adicional de soporte de la estructura de la pieza, que es hecha de otro material distinto (gel) que se puede quitar fácilmente, con agua a presión, una vez la pieza ya ha sido conformada.

Ventajas de este tipo de procesos son: alta calidad del producto final, la habilidad de producir pequeños detalles y finas paredes, rapidez del proceso y no necesidad de un curado posterior, como ya se ha mencionado. Sin embargo, la mayor de todas ellas es la capacidad de elaborar productos transparentes (al igual que la estereolitografía).

2.2.4. Sheet lamination (SHL)

Como su propio nombre indica, esta técnica usa láminas de materiales para formar objetos depositando una lámina sobre otra. El proceso de fabricación cuenta con tres pasos fundamentales: *stacking*, *bonding* y *cutting*. Primero, el rollo de material alimenta la base sobre la cual se va a trabajar con una primera lámina de material. Después, dicha lámina se une a la anterior capa mediante una fuente de energía localizada para que, después, un láser vaya recortando las láminas con la forma del perfil correspondiente según el modelo CAD de la pieza introducido en la máquina. Este proceso es repetido una y otra vez hasta que la pieza ha sido conformada completamente. Dependiendo del principio de construcción con el que se esté trabajando, el orden de los pasos puede variar pero en esencia el proceso es el mismo. Además, si se trabaja con láminas de metales, los pasos son ligeramente distintos siendo: pegado, soldado, forjado y sujeción. En los casos en los que se use pegamento, se puede requerir un post-procesado de tratamiento térmico para consolidar la pieza final. Por otra parte, los materiales cerámicos requieren ciclos caloríficos a altas temperaturas para sinterizar las partes verdes (partes que aún no han sido sinterizadas).

Existe una técnica llamada *composite metal foil manufacturing* (CMFM) que combina la técnica de SHL con la soldadura. Esta técnica añade, a los pasos de la laminación, unos dispensadores que aplican la pasta de

soldadura localmente en la láminas de metal y dos platos calentadores que comprimen y calientan el conjunto de láminas apiladas para conseguir la unión final.

Algunas de sus ventajas son la capacidad de trabajar con productos hechos de diferentes materiales o el aumento de productividad debido a la reducción del tiempo de fabricación en comparación a otras técnicas de AM. Sin embargo, no tiene la capacidad de producir piezas con geometrías realmente complejas. Además, si se quiere aumentar la productividad engrosando las láminas, se perjudica el acabado superficial final, haciendo necesario un post-procesado. Otra cualidad de los productos fabricados mediante esta tecnología es la aparición de anisotropía.

En cuanto a su aplicación, esta técnica no ganó especial repercusión en el mercado desde su aparición en la década de los 90. Encontró su aplicación principal en la fabricación de utillajes. No obstante, los productos fabricados con esta técnica han ido perdiendo terreno con el desarrollo de tecnologías basadas en fundición, puesto que estas ofrecen más libertad de diseño y mejores propiedades en aleaciones que son solidificadas rápidamente.

2.2.5. Binder Jetting (BJT)

Este es el proceso por el que normalmente se producen productos hechos con polímeros, metales o arena. Estos tienen unas propiedades mecánicas relativamente buenas y son más costosas pero más efectivas que aquellos producidos por métodos *Selected Laser Melting* (SLM), pero con peores propiedades mecánicas debido a que no todos los granos de material se funden juntos. Comparado con PBF, el producto final sale sin deformaciones debidas a tensiones internas al no haber enfriamiento puesto que las partes son impresas sin calor, además de tener mejor precisión dimensional.

Normalmente, los productos necesitan un post-procesado para compensar la fragilización de la pieza, a menudo con el uso de una sustancia tipo epoxy para polímeros, cianoacrilato para cerámicos o bronce para metales.

En cuanto a materiales para la construcción de la pieza, se pueden usar metales como acero, cobre o Inconel, arena cerámicos y polímeros (PMMA), todos ellos en polvo. Por otra parte, para el agente aglutinante, que se suministra en estado líquido, los hay acuosos para el caso de los metales o de silicato, más sostenible, para arena, entre otros. Lo ideal es que este agente tenga poca viscosidad para permitir que el flujo de gotas individuales se forme y luego se desprenda de las boquillas rápidamente. Además, debe ser resistente a esfuerzos cortantes originados durante el proceso de impresión.

Un ejemplo perfecto de aplicación es la impresión 3D, en el que el agente aglutinante es pegamento. El proceso consiste en lo siguiente: en un primer momento, la plataforma sobre la que se va a construir la pieza se sitúa a la distancia adecuada para asegurar que se cubre bien del material en polvo para después ser escaneada por un cabezal que suelta el aglutinante. Después de ser escaneada esta capa, la plataforma baja de nuevo una distancia igual al grosor de dicha capa y se deposita nuevamente material adaptándose a la capa que viene a continuación. Este proceso se repite hasta que la capa de más arriba es conformada. De esta manera, cuanto más alto sea el producto, más tiempo requerirá. Una vez es terminado el proceso, se deja que adquiera la robustez requerida y finalmente se retira. El exceso de polvo se elimina con el aire. Posteriormente, se aplica un proceso de temperamento a 95°C durante diez minutos y se aplica una infiltración de cera, epoxy o cianoacrilato para endurecer el producto.

Una de las mayores ventajas de este procedimiento es la posibilidad de crear piezas coloreadas, además de una alta velocidad de trabajo, la posibilidad de disponer de una de estas impresoras en una oficina puesto que no usa materiales tóxicos, así como bajo coste y buenas tolerancias dimensionales. Presenta también algunas desventajas como dimensiones y materiales limitados o alta rugosidad de la superficie que requiere un mecanizado posterior.

2.2.6. Powder Bed Fusion Technologies (PBF)

La tecnología de fabricación aditiva basada en polvo es una técnica que construye capa por capa en la que se aplica una fuente de energía para fundir materiales metálicos, poliméricos o cerámicos. El polvo, se va depositando capa por capa hasta conseguir piezas impresas en 3D pudiendo conseguir una complejidad geométrica alta. Esta operación, se realiza en atmósferas protegidas para que el material sea procesado en las condiciones más adecuadas, evitando así la oxidación, permitiendo así reutilizar el material sobrante. Por otra parte, las fuentes de energía varían dependiendo del tipo de técnica PBF utilizada:

- Haz de electrones: Electron Beam Technology (EBM)

- Haz láser: Selected Laser Melting (SLM)
- Luz ultravioleta + horno: Metal Binder Jetting Technology (MBJT)
- Luz ultravioleta: Multi Jet Fusion (MJF)
- Haz Láser (CO₂): Selective Laser Sintering (SLS)

En los procesos PBF, ocurre un fenómeno llamado *melt pool*, que se refiere a la zona del metal fundido por donde ha pasado la fuente de energía realizando el patrón de fusión del material. Se trata pues, de una "piscina" de material fundido que solidifica rápidamente y resulta crítica para determinar las propiedades finales de la pieza. No obstante, hoy en día se encuentran tecnologías como MBJT (Metal Binder Jetting Technology), en la que toda la capa se sintetiza al mismo tiempo y no se concentra la energía en determinados puntos. El comportamiento del melt pool dependerá de los parámetros del proceso y del material utilizado.

Las tecnologías de fabricación basadas en lecho de polvo se pueden dividir según el material utilizado. Para fabricación de productos metálicos existen dos técnicas diferenciadas por la fuente de energía utilizada: fundido por láser (PBF-LB/M) y por haz de electrones (PBF-EB/M). Por otra parte, para materiales poliméricos se usa una técnica de sinterizado láser (PBF-LB/P). A continuación, se van a explicar estas técnicas fundamentales.

Laser melting powder bed fusion (PBF-LB/M)

La técnica de fusión del lecho de polvo por láser se trata de una de las técnicas PBF más extendidas en el mercado de la fabricación aditiva hoy en día. Posee numerosas cualidades como la posibilidad de precalentamientos a bajar temperatura, el uso de diversos láseres a la vez y un área de barrido láser muy pequeña (menor al área del haz de electrones) que le otorga una alta precisión en el proceso de fabricación.

El proceso de fabricación comienza con la puesta a punto del sistema, es decir, limpiar correctamente el polvo de anteriores fabricación, comprobar que el polvo está correctamente dispuesto en los depósitos, revisar las piezas de repuesto y las herramientas de repartición de polvo, entre otros. Es especialmente importante asegurar que la base está correctamente nivelada para conseguir una buena fundición del polvo, además, es necesario crear una atmósfera inerte dentro de la máquina. También serán necesarias unas estructuras de soporte ancladas a la base, muy densas debido a las altas temperaturas que se pueden alcanzar.

Generalmente, el proceso de fundición se realiza esparciendo una fina base de polvo con un tamaño de partícula que oscila entre 15-30 μ m y 20-60 μ m [3]. La barra dispensadora de polvo recorre toda la bandeja para que, posteriormente, el láser realice el patrón programado mientras va fundiendo el polvo punto por punto, conformando así la pieza. Tras ello, la bandeja desciende una determinada distancia para volver a esparcir el polvo repitiendo así todo el proceso hasta que la pieza esté conformada totalmente.

Al tener un tamaño de capa muy fino, el acabado superficial es mejor a otros métodos aunque ello conlleve que el tiempo de producción se prolongue y, junto con la pérdida de rendimiento en el tamizado del polvo por tener un tamaño de partícula tan pequeño, el proceso se encarece notablemente. Por otra parte, el proceso de fabricación se ha de realizar dentro de una atmósfera controlada, normalmente con Argón o Nitrógeno. Además, al aumentar la temperatura de manera brusca durante el proceso, partiendo de temperatura ambiente o calentamiento bajo hasta alcanzar los 400°C, se generan tensiones internas, haciendo necesario un tratamiento térmico posterior. La ventaja de partir de bajas temperaturas es que el polvo se puede quedar sin fundir haciéndolo más fácil de retirar después de la fabricación.

Electron Beam Technology (PBF-EB/M)

El otro proceso basado en lecho de polvo para trabajar con metales es uno similar al caso anterior pero con el uso de un haz de electrones como fuente de energía.

Este proceso se diferencia del anterior en varios aspectos, uno de ellos es la atmósfera en la que se trabaja, que es el vacío en este caso, permitiendo reducir la interferencia del oxígeno durante el proceso de fabricación. Además, la producción es más rápida que por fusión con láser por la velocidad del haz de electrones y un mayor grosor de capa, por tener un tamaño de partícula mayor. En este caso, se hace un precalentamiento de la base mayor, eliminando la generación de esfuerzos internos o distorsiones que se puedan generar. La temperatura global puede variar dependiendo del material con el que se trabaje. Por otra parte, al tener un tamaño de partícula mayor, la materia prima usada en este proceso es más barata que en el anterior, siendo más eficiente el proceso de tamizado.

Como aspectos negativos, destaca la formación de restos de polvo sin sinterizar que quedan adheridos a la pieza debido al precalentamiento inicial, dificultando así la limpieza de la pieza y empeorando su acabado superficial, especialmente cuando hay canales o conductos por donde se puede meter el polvo. Para evitarlo, se suele utilizar un sistema de recuperación del polvo para retirar esos restos de la pieza. Además, al usar un tamaño de partícula mayor, la rugosidad superficial se acentúa.

El proceso comienza de manera similar al caso anterior, con la puesta a punto de la máquina de fabricación. Se ha de retirar el polvo sobrante de fabricaciones anteriores, limpiando cuidadosamente todas las partes, utilizando para ello líquidos y utensilios especiales para no dañar la maquinaria. Una vez completada la limpieza, se deben supervisar los componentes críticos, nivelar la base, supervisar el suministro de materia prima y calibrar el haz de electrones correctamente. Todo ello debe ser realizado por técnicos expertos, pues un pequeño fallo podría desencadenar en múltiples problemas.

A continuación, se crea el vacío dentro para evitar que se dañe el material y obtener buenos resultados consolidando las partes. El vacío es necesario para evitar la interacción de los electrones con las partículas del aire. No obstante, se utiliza una pequeña cantidad de helio para evitar que se forme carga negativa en las partículas de polvo cuando interaccionan con los electrones. Este gas también ayuda a mantener la estabilidad térmica durante todo el proceso por el suministro a baja presión de este gas.

Una vez se ha cargado correctamente el archivo digital del modelo en el que se han establecido las diferentes capas en las que se va a fabricar la pieza, la base donde se va a empezar a conformar se calienta para asegurar una buena fusión del polvo y que se mantendrá durante todo el proceso mediante precalentamientos sucesivos en cada capa de polvo, eliminando así las tensiones residuales, consiguiendo una mejor conformación de la pieza y minimizando deformaciones. El proceso de conformación de la pieza se divide en varias fases: precalentamiento del polvo, fusión de los contornos, fusión de la parte interna de cada capa y creación de soportes y estructuras. Se recubre la base con el polvo y el haz de electrones va fundiendo las zonas seleccionadas. Ello se hace gracias a la transformación de la energía cinética de los electrones en energía térmica que funde el material, resultando en la fusión selectiva del material. Cuando se ha acabado de fundir una capa, la base se desplaza hacia abajo y el proceso comienza de nuevo hasta que la pieza 3D ha sido completamente conformada. En este momento, se inyecta gas helio a alta presión para enfriar la pieza.

Una característica de este proceso es que, al terminar, quedan restos de polvo medio sinterizado que es necesario retirar. Ello se consigue rociando a la pieza con polvo de la misma naturaleza. Gran parte del polvo retirado de la pieza se puede utilizar de nuevo en futuras construcciones, no obstante, la sostenibilidad de este proceso (cantidad de material que se puede reutilizar) es inferior a la fusión con láser, especialmente si se trabaja con materiales reactivos. Como ejemplo, al trabajar con Ti-6Al-4V, la absorción de oxígeno es hasta un 600% mayor en el caso de PBF-EB que en PBF-LB. Esta gran diferencia se puede deber al precalentamiento de la base, una mala calidad del vacío o un alto contenido de humedad.

Algunas de las ventajas de esta técnica es la eficiencia del proceso, tanto por el uso del haz de electrones como por el uso del vacío, que permite reducir la oxidación del material y aislar térmicamente la pieza, pudiendo mantener así altas temperaturas durante todo el proceso, reduciendo las tensiones internas. Además, esta técnica se puede utilizar con gran variedad de componentes metálicos como aleaciones de Titanio, Níquel o cobre, aumentando a su vez, el rango de aplicaciones.

Por otra parte, existen una serie de desventajas como la formación de *humo de polvo* por la generación de carga negativa, que puede interferir en el proceso. También, el uso del haz de electrones conlleva una pérdida de precisión y de calidad superficial en la pieza final comparado con la fusión por láser. Finalmente, las piezas producidas por PBF-EB pueden requerir mecanizado, alargando el proceso de fabricación.

Selective Laser Sintering (PBF-LB/P) Technology

Por último, existe una técnica de sinterizado láser para polímeros, transformando polvo de material polimérico en una pieza sólida basa en un modelo CAD 3D. Se trata de una de las primeras técnicas de fabricación aditiva, surgida a mediados de los 80 y que se ha ido adaptando a una gran variedad de materiales.

Las máquinas PBF-LB/P normalmente poseen dos tanques de polvo de un tamaño de partícula de 20-80 μ m [3] junto con la plataforma de construcción en el medio. Durante el proceso, se trabaja en una atmósfera protegida, normalmente usando Nitrógeno, y bajo una cierta temperatura que depende del material utilizado. El polvo se calienta hasta 12-16 $^{\circ}$ C por debajo de su punto de fusión, siendo el láser el que aporta la energía restante para fundir el polvo polimérico.

Entre sus beneficios destacan la capacidad de producir parte a gran escala, polímeros de alta resistencia pueden ser trabajados como poliamidas, que no se necesitan piezas de soporte otorgando flexibilidad al diseño, y la capacidad de producir geometrías muy pequeñas.

El polvo que no se transforme durante el proceso, debe ser mezclado con polvo virgen para poder ser utilizado de nuevo. La mayor parte del coste asociado a este proceso de fabricación viene originado por la materia prima, de ahí que esta sea un factor crucial para abaratar los costes. Además, la estabilidad térmica durante el proceso es un factor crucial, ya que ello puede afectar al material en forma de distorsiones.

El proceso de fabricación comienza con los preparativos y acciones preventivas pertinentes como limpiar la cámara de fabricación o la ventana de salida del láser, puesto que restos de polvo se pueden quedar adherido a ella.

Al ser una tecnología que no necesita estructuras de soporte, las piezas se pueden colocar en cualquier lugar dentro del espacio de trabajo, de manera que cuantas más partes se incluyan en el espacio de fabricación, menor será el coste unitario de cada una.

Cuando la limpieza es terminada y el polvo está correctamente guardado en los depósitos, se crea una atmósfera inerte y se encienden los calentadores. La plataforma de construcción empieza a desplazarse hacia abajo mientras se comienza a esparcir el polvo en una primera fase conocida como calentamiento. Durante esta primera fase se pretende crear una barrera de 10-12 mm de altura entre la pieza y la plataforma para evitar así el fenómeno de deformación. Una vez terminada esta fase inicial, se esparce una fina capa de polvo mientras se mantiene a una temperatura ligeramente inferior a la de fusión. A continuación, el láser escanea la capa y fusiona las partículas para crear una parte sólida. Finalmente, se repite este proceso hasta que se conforma la pieza completamente. Antes de que acabe la construcción, se realiza un enfriamiento controlado para evitar deformaciones y distorsiones por un enfriamiento súbito, de manera que esta fase se puede extender de 12 a 24 horas dependiendo de la altura de la pieza.

Como se ha comentado, la reutilización del polvo es un aspecto fundamental de cara a los costes, por ello, se ha de aplicar la metodología correcta para recuperarlo después de una construcción. Dependiendo de cómo se afectado haya sido el polvo por el calor, se trata de una manera o de otra. Existen algunos métodos como el Melt Flow Rate Test (MFRT), con los cuales se puede cuantificar cómo de afectado está el polvo, en este caso, midiendo el tiempo en el que una cierta cantidad de polvo se funde a través de un extrusor a una temperatura determinada. Según el valor obtenido, el polvo utilizado deberá ser renovado de manera controlada para mejorar los rendimientos de reutilización.

Los materiales estándar utilizados en esta técnica son: Poliamida 11 y 12 reforzado con vidrio o TPU (poliuretano termoplástico).

En cuanto a materiales, se suelen utilizar aleaciones de aluminio, titanio, acero o superaleaciones de níquel. La mayoría de materiales que se usan en la técnica L-PBF son aleaciones que ya se encuentran en formato polvo en el mercado.

La principal ventaja del L-PBF es que fabrica a partir de material fundido de manera que no se necesita un agente aglutinante, evitando el riesgo que ello supone en cuanto a aparición de impurezas y reduciendo los requerimientos de post-procesado. No obstante, al trabajar con metales fundidos se generan tensiones residuales que pueden dar lugar al fallo de la pieza una vez que el ángulo de voladizo excede cierto umbral, por lo que, por lo general, se utilizan estructuras de soporte que anclan la pieza a la placa de construcción.

El reciente desarrollo de esta tecnología ha permitido su implementación en numerosos sectores industriales como el médico, automotriz o aeroespacial. Además, supone una reducción importante de masa, coste y número de partes del ensamblaje. No obstante, en cuanto a materiales, presenta más restricciones, pero se está investigando en este campo para aumentar sus posibilidades. Por otra parte, la libertad a la hora de realizar un diseño varía dependiendo del tipo de tecnología utilizada y de los materiales que se vayan a utilizar, sin embargo, la diferencia sigue siendo sustancial en comparación a los métodos de fabricación tradicionales. No obstante, todos estos tipos de procedimientos tienen algunas desventajas que se deberán tener en cuenta.

En rasgos generales, en los métodos AM-PBF, el material en polvo se suministra en una serie de tanques o depósitos a partir de los cuales se esparce sobre la capa en la que se está trabajando. Al igual que en otros procesos ya vistos, también se dispone de una plataforma que se va desplazando a lo largo del proceso, así como de una fuente de energía que va desde un haz focalizado en un punto hasta bombillas de luz UV. Además, normalmente, se permite modificar una gran cantidad de parámetros del proceso.

2.2.7. Directed Energy Deposition (DED)

A continuación se procede a explicar la técnica de Directed Energy Deposition, la cual adquiere de un interés especial pues es la técnica mediante la cual se fabricará la pieza que es objeto de este trabajo de fin de grado.

La técnica DED, en ocasiones referida como Laser Metal Deposition (LMD), es una compleja técnica de impresión 3D en la que se utiliza energía térmica para fundir materiales mientras están siendo depositados, a partir de una fuente de energía que puede ser láser, haz de electrones o arco de plasma que está concentrada en el punto en el que se está depositando el material, de esta manera, el material es fundido en el mismo instante en el que se deposita.

La metodología de trabajo es la siguiente. Todo comienza con el modelado 3D de la pieza que se quiere fabricar en un software CAD. A continuación, se pasa a un software de laminado en el cual se generan las capas de material necesarias para fabricar la pieza.

El siguiente paso es meter el diseño en la máquina de fabricación, de esta manera, el cabezal y la plataforma base obtendrán la información geométrica para irse desplazando adecuadamente durante el conformado de la pieza. Esta guarda similitudes con otras usadas en otras técnicas de fabricación y, como se puede ver en la Figura 2.3, consta de una plataforma de construcción, una fuente de energía, una boquilla suministradora de material y una bobina de material que proporciona material a la boquilla para que lo deposite directamente sobre la plataforma de construcción o sobre la pieza.

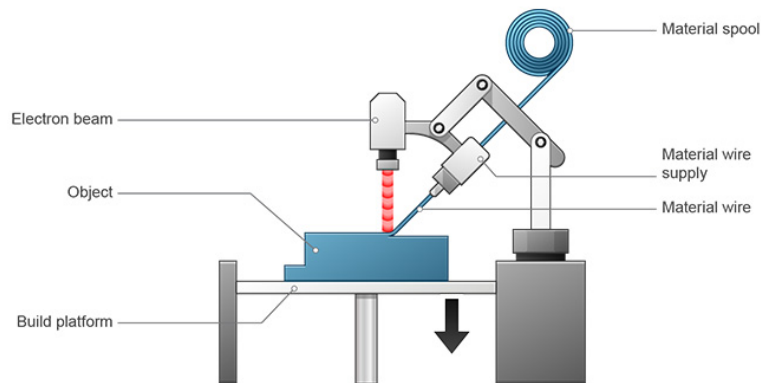


Figura 2.3: Partes de una máquina de fabricación DED que usa haz de electrones como fuente de energía. [11]

Como ya se ha explicado, la técnica consiste en, como su propio nombre indica, ir depositando el material en una base o directamente sobre el componente que está siendo fabricado o reparado, a través de una boquilla unida a un brazo multieje, normalmente con 4 o 5 grados de libertad. El material es proporcionado en hilo o en polvo y es fundido por la fuente de calor correspondiente a la vez que es depositado, siendo menos preciso el material proporcionado en hilo debido a la naturaleza de poseer una preforma, pero es más eficiente que el material en polvo debido a que sólo se gasta el material empleado en el proceso. Este proceso es repetido continuamente hasta que todas las capas se han solidificado y el objeto ha sido creado o reparado correctamente. En caso de que la fuente de energía sea un haz de electrones, el proceso debe realizarse en vacío con el fin de evitar que los electrones interactúen con las moléculas del aire. En el caso de uso de un láser, se requiere una cámara completamente inerte si se está trabajando con metales reactivos, requiriendo una cantidad significativa de gas y tiempo para alcanzar los niveles de oxígeno deseados. De manera alternativa, es posible también utilizar una cubierta protectora de gas con el fin de proteger de que se le deposite contaminación. Por otra parte, en la mayoría de los casos, es el brazo el que se mueve mientras que el objeto permanece en una posición fija, sin embargo, esto se puede invertir en caso de que sea necesario, la elección dependerá de la aplicación exacta y del objeto a trabajar. Finalmente, el tiempo de enfriamiento del material es bastante alto, típicamente entre $1000\text{-}5000^\circ\text{C/s}$. Este tiempo de enfriamiento afectará a la estructura final del grano del material depositado, aunque se ha de tener en cuenta la sobreposición de material al aplicar una capa sobre otra, pues ello también puede afectar a la estructura de grano debido a que puede causar refundición del material. Los espesores de cada capa suelen ser entre 0.25mm y 0.5mm .

Como se ha comentado, existen tres tipos de tecnología DED según la fuente de energía: Laser-Based DED, Electron Beam-Based DED y Plasma/Electric Arc DED, donde en cada uno, además, se aplican materiales

distintos.

Laser-based Directed Energy Deposition (DED)

La técnica de DED basada en láser usa, como su propio nombre indica, un láser de alta potencia para fundir el material, permitiendo una precisión excepcional así como un acabado superficial muy bueno. Sin embargo, presenta algunas desventajas como un alto coste y limitación en cuanto su aplicabilidad a ciertos materiales que permitan absorber la energía del láser de manera eficiente. Es usado con metales y aleaciones como titanio, acero o Inconel.

Electron Beam-Based Directed Energy Deposition (EBAM)

Este tipo de tecnología DED usa un haz de electrones para fundir los materiales durante su deposición, haciéndolo un método ideal para aplicaciones que requieran trabajar a muy altas temperaturas y con materiales reactivos. Algunos de los que se usan son aleaciones de titanio o aleaciones que trabajen a altas temperaturas. Presenta varios beneficios como altos ratios de deposición, siendo idóneo para piezas a gran escala consiguiendo tensiones residuales muy pequeñas. Entre sus desventajas, requiere trabajar en vacío, presenta también altos costes en cuanto al equipamiento necesario y está más limitado en cuanto a diversidad de materiales.

Plasma or Electric Arc-Based Directed Energy Deposition (DED)

Esta última variante de DED utiliza un plasma o arco eléctrico para fundir el material. Es ampliamente usado para reparaciones. Materiales comúnmente usados son acero, titanio y aleaciones de níquel. Posee altos ratios de deposición y aumenta su efectividad-coste en piezas de gran tamaño, además de ser una tecnología robusta y versátil. Por otra parte, su uso implica un sacrificio en cuanto a precisión, un peor acabado superficial y aparición de tensiones residuales.

En cuanto a materiales, como ya se habrá podido comprobar, se usan fundamentalmente metales, aunque la tecnología DED es capaz de incorporar también polímeros o materiales cerámicos. En cuanto a metales, se puede incluir cualquier metal con la capacidad de fundirse. Algunos de los más usados y sus aplicaciones son los que se mencionan a continuación:

- **Acero inoxidable:** Usado fundamentalmente en componentes de la industria aeroespacial, en el sector automotriz y en implantes médicos entre otros. Sus características más importantes son la resistencia, dureza y durabilidad que presenta.
- **Aleaciones de titanio:** Usado en la industria aeroespacial, automotriz y médica por su gran relación resistencia-peso, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad.
- **Aleaciones de aluminio:** Usado en estructuras aeroespaciales, partes automotrices, bienes de consumo e intercambiadores de calor debido a su ligereza, alta conductividad térmica y resistencia a corrosión.
- **Aleaciones de níquel:** Excelentes para componentes de la industria aeroespacial, equipamiento de procesamiento químico o aplicaciones que requieran trabajar a altas temperaturas entre otros. Un ejemplo es el Inconel.
- **Tungsteno y molibdeno:** Usados en componentes aeroespaciales, contactos eléctricos o partes de altos hornos debido a sus altos puntos de fusión y alta resistencia a elevadas temperaturas.
- **Aleaciones aluminio-cromo:** Ideales para implantes dentales, ortopédicos o componentes aeroespaciales por su alta resistencia y biocompatibilidad.
- **Acero para herramientas:** Perfecto para componentes de herramientas y matrices, moldes, herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste debido a su dureza, tenacidad y resistencia al calor.
- **Materiales cerámicos:** Usados en piezas aeroespaciales, implantes médicos y herramientas de corte por su dureza, resistencia a la corrosión y estabilidad térmica.
- **Aluminuros de titanio y níquel:** necesarios en componentes aeroespaciales, piezas de motores de turbina y sistemas de escape automotrices debido a su resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión.

Como se ha podido comprobar, la técnica DED es ampliamente utilizada en sectores clave de la industria como el aeroespacial, médico, defensa o la marina, empleándose para la fabricación desde estructuras hasta

turbinas de gas. Además, como cualquier otro proceso subtractivo, las piezas fabricadas por DED pueden ser tratadas térmicamente, prensado isostático en caliente, mecanizado o acabado de cualquier manera habitual.

Esta tecnología presenta numerosas ventajas como son altas velocidades de construcción de la pieza, consiguiendo partes robustas con buenas propiedades mecánicas y con una forma muy bien acabada, haciendo posible que no se necesite una fase de post-procesado. Además, esta técnica se puede usar para reparación de otras partes que han sido dañadas, añadiendo material allí donde sea necesario. Como se ha podido comprobar, acepta un gran abanico de materiales aumentando así sus posibilidades de aplicación, permitiendo variar además entre ellos gracias a que el material es suministrado desde diferentes contenedores durante el proceso, facilitando así su recambio y su rellenado. Por otra parte, es idóneo para trabajar con piezas de gran tamaño. Por último, gracias a que se deposita sólo el material que va a ser utilizado, se consigue un gasto de material muy reducido.

No obstante, requiere de una gran inversión para ser llevado a cabo debido al gran coste de la infraestructura que requiere. Además, debido a la manera en la que la técnica DED crea los objetos, no se construyen estructuras de soporte durante el proceso, por lo que añadidos como voladizos no se podrían llevar a cabo.

Concluyendo este apartado, la técnica de DED se ha visto que posee numerosas aplicaciones con la capacidad de trabajar con numerosos materiales consiguiendo formas complejas y robustas. Sin embargo, su mayor inconveniente es el coste asociado a la adquisición de la maquinaria y al mantenimiento que requiere.

2.3. Aplicación de la fabricación aditiva

Aunque ya se ha hablado anteriormente de los diferentes ámbitos de uso de la fabricación aditiva, en este apartado se procederá a indagar aún más en los usos que se le da a esta tecnología a día de hoy y en el impacto en el mundo industrial que implica el uso de la fabricación aditiva.

2.3.1. AM en la industria aeroespacial

En primer lugar, se hablará del sector aeroespacial por ser el más relacionado con el grado cursado así como por ser el supuesto ámbito de aplicación de la pieza trabajada en este documento.

El sector aeronáutico y aeroespacial se caracteriza por ser una de las industrias más contaminantes, no sólo por la cantidad de gases de efecto invernadero expulsados a la atmósfera durante el vuelo, sino también por el impacto medioambiental que conlleva toda la infraestructura del sector. También, es uno de los sectores donde los tiempos de cada operación son más críticos, pues si, por ejemplo, la fabricación que un avión necesita para poder ser reparado y recuperar su aeronavegabilidad se retrasa, aunque sean sólo unos pocos días, la empresa a cargo percibirá unas pérdidas muy cuantiosas, ya que todo el tiempo que una aeronave está en tierra es tiempo que la aeronave no está generando ingresos a la compañía. Por otra parte, el desarrollo del diseño de aeronaves está enfocado que conseguir que la aeronave transporte la mayor cantidad de carga de pago (pasajeros, mercancía, equipajes, etc...) posible, pues es la carga por la que recibe un rédito económico. Sin embargo, esto se ve fuertemente restringido por la carga máxima que es capaz de transportar, que a su vez se relaciona con la potencia de la planta propulsiva, el peso del resto de componentes de la aeronave (estructura, fuselaje, motores, etc...) y por la aerodinámica de su diseño.

En este contexto, se hace necesario el uso de piezas ligeras con una alta resistencia-peso para mejorar la eficiencia del combustible, reducir las emisiones y con la capacidad de responder con seguridad y fiabilidad a las solicitudes que les sean impuestas. Con este fin, los diseñadores buscan minimizar la cantidad de material empleado en cada pieza, lo que supone un incremento en la complejidad, funcionalidad y en cuanto a propiedades de la misma. Así, la fabricación aditiva permite la fabricación de piezas con cualquier tipo de geometría. A continuación, se expone como se solventan cada una de estas cuestiones.

Complejidad estructural

Los diseños de estructuras complejas se caracterizan por un muy buen comportamiento mecánico minimizando la masa de la pieza. La fabricación aditiva permite la construcción de este tipo de formas, con algunas restricciones dependiendo de la tecnología AM concreta que se vaya a utilizar. La complejidad estructural también implica la descripción de las arquitecturas jerárquicas internas celulares, es decir, la organización de la estructura en sus múltiples niveles (función, tamaño, forma...) de las celdas que componen la estructura en su

conjunto. Esto se puede conseguir mediante la optimización topológica, que buscará la solución que establezca un mejor compromiso entre todos los requisitos impuestos. De esta manera, se puede reducir de forma significativa el material usado a la vez que se consigue un diseño adecuado para fabricación aditiva, además de mejorar el comportamiento mecánico de la pieza y reducir su coste de manufacturación. Todo ello, supone una reducción de costes notable en la parte de fabricación.

Complejidad funcional

La complejidad funcional hace referencia a la capacidad de la pieza de integrar funciones que no se le habían asignado en un principio como, por ejemplo, disipación de calor, flexibilidad o la capacidad de actuar como conductos (por ejemplo perfiles o álabes de turbina dotados de conductos refrigerantes).

Este término también hace referencia a las funcionalidades que son difíciles de conseguir mediante un solo componente. Por ejemplo, el mezclador (en inglés *swirler*) del motor de un avión, que se encarga de mezclar correctamente el combustible con el aire tratando de aumentar la turbulencia para reducir la presión de la cámara de combustión, lo que requiere un diseño de la geometría de dicha pieza muy preciso, algo que sería muy difícil de obtener sin la fabricación aditiva.

Requerimientos de propiedades

La variación de las propiedades a lo largo del componente supone también un desafío en cuanto al diseño. Esto incluye diseños multimateriales y materiales con un gradiente de funcionalidad (FGMs: *functionally graded materials (FGMs)*). La capacidad de ajustar las propiedades mecánicas es especialmente relevante en las tecnologías de fabricación aditiva, como en las técnicas de DED o PBFs. En esta última, el tamaño de los granos del polvo así como su distribución pueden ser variados para cambiar la densidad y las propiedades correspondientes. Los parámetros de procesado también se pueden ajustar para controlar la calidad de la dureza, resistencia a fatiga, microestructura de la superficie y acabado superficial de la pieza. Esto permite la fabricación de partes de metal con control local de la concentración de tensiones residuales.

Ventajas de la fabricación aditiva en la industria aeroespacial

El incremento de complejidad en la estructura, finalidad y en las propiedades de los componentes aeroespaciales implica mayores costes de fabricación y ensamblaje. Tradicionalmente, el diseño se simplifica para la fabricación y ensamblaje sacrificando rendimiento de la pieza. Sin embargo, la fabricación aditiva otorga mucha libertad en cuanto al diseño de partes y reduce el ensamblaje mediante la consolidación de partes, además de reducir el material gastado y usar materiales que serían difíciles de procesar mediante otras técnicas de fabricación. Al contrario que en las técnicas de fabricación convencionales, la fabricación aditiva reduce e incluso elimina la necesidad de usar herramientas, lo que permite la producción de pequeñas series de producción y de partes que requieran tiempos de entrega rápidos. A continuación, se van a exponer los beneficios de AM en la industria aeroespacial.

Consolidación de partes

Tradicionalmente, los componentes del sector aeroespacial contienen multitud de partes más simples que son unidas mediante distintos métodos (soldaduras, pernos y brazas). Sin embargo, ello supone una baja fiabilidad y requiere gran inspección de mantenimiento, utillaje y costes asociados a su mantenimiento. Además, errores geométricos y errores en las alineaciones o deformaciones pueden exceder las tolerancias de los componentes aeroespaciales.

La consolidación de las partes se puede conseguir mediante fabricación aditiva, lo que facilita la integración de diferentes cualidades y un aumento de la fiabilidad y el rendimiento. Al reducir el número de partes en los ensamblajes, se reduce el número de herramientas en el inventario, los costes asociados a la documentación, inspección y producción, la huella de la línea del ensamblaje y los costes generales de fabricación. Como ejemplo, la empresa GE Aviation consiguió reducir la producción de 855 partes a docenas usando tecnologías AM, se consiguieron integrar hasta 80 partes en una sola. De manera similar, Airbus integró 126 partes de su tanque de alojamiento hidráulico a una sola parte hecha mediante fabricación aditiva.

Economía de materiales

Una de las principales razones del alto coste de la fabricación aeroespacial es el llamado *fly-to-buy* ratio, que se refiere a la relación entre la materia prima y el peso final del componente. Este ratio puede llegar a ser

notablemente alto en casos de piezas de gran volumen, por ejemplo, de 20-40 como ocurre en estructuras con paredes delgadas o álabes de turbina. En estos casos, la fabricación aditiva pueden reducir el valor esta relación hasta 1-1. Procesos AM como el PBF ayudan a reducir el porcentaje de material de deshecho producido al 5% frente al 95% que producen los métodos convencionales. Reduciendo la cantidad de material de deshecho y el peso de la pieza, no sólo tiene un efecto positivo en cuanto a los costes, sino también en el medio ambiente.

Por otra parte, la industria aeroespacial constantemente está demandando materiales *premium*, es decir, aleaciones de titanio, aleaciones de aluminio, super aleaciones base níquel y aceros especiales. Este tipo de materiales está altamente limitado por su alto coste comparado con otro tipo de materiales y por su dificultad para ser tratados por maquinado. En las tecnologías de fabricación aditiva cada vez son más los materiales de este tipo que se pueden aplicar.

Pequeñas series de producción y tiempos de entrega

En comparación con los métodos tradicionales de fabricación, la fabricación aditiva tiende a ser más cara para grandes series de producción. Sin embargo, es más rentable para partes personalizadas o pequeñas series de producción, que son las más comunes en la industria aeroespacial.

Dado que la vida útil de los aviones suele ser de alrededor de 30 años, el mantenimiento, sustitución de partes y utillaje suele tener los mayores costes. Las técnicas AM permiten la producción de partes tanto de prueba como de sustitución bajo demanda para su rápida entrega e instalación. Ello supone una reducción de costes asociados notable y, además, permite la fabricación de esas partes en localizaciones descentralizadas, lo que a su vez se traduce en menores costes de transporte y almacenamiento. Esta simplificación también conduce a una reducción del tiempo de inactividad por mantenimiento y los tiempos de entrega.

Funciones de la fabricación aditiva en la industria aeroespacial

Las aplicaciones de la fabricación aditiva en la industria aeronáutica y aeroespacial normalmente se pueden clasificar en las siguientes cuatro categorías:

1. Direct digital manufacturing (DDM).
2. Utillaje rápido.
3. Prototipado rápido.
4. Reparación.

Direct Digital Manufacturing (DDM)

DDM hace referencia a la producción de piezas que van a ser utilizadas en aeronaves. Dichas partes pueden ser desde componentes críticos para la operación (toberas, cámaras de combustión, etc...) como partes no tan críticas (brackets o accesorios).

Estas partes pueden ser fabricadas directamente en metal mediante las técnicas AM ya vistas, como DED o SLM. Las necesidades de post procesado se pueden abordar mediante fabricación híbrida. La fabricación híbrida es la combinación de fabricación aditiva y sustractiva en un solo sistema, de manera que, mediante fabricación aditiva se va construyendo la pieza de metal, mientras que con las técnicas sustractivas tradicionales se emplean para fresado puntual y acabado superficial. Este proceso combinado simplifica el proceso de fabricación reduciendo el número de pasos.

Por otra parte, mientras que los componentes mecánicos y estructurales están hechos de metal, las fijaciones y accesorios interiores están hechos, normalmente, de otros materiales no metálicos para ahorrar tiempo y coste. Estos otros materiales pueden ser desde señales de asientos para un avión hasta reparaciones específicas que requieran un alto gasto y mantenimiento. La aplicación de procesos AM tiene, además, otros beneficios como la consolidación de partes ya mencionada anteriormente.

Utillaje rápido

El utillaje rápido se refiere a cualquier proceso de conformado de moldes que puedan crear herramientas rápidamente y con el mínimo trabajo directo. Generalmente, los procesos AM para utillaje pueden ser directos o indirectos. Los métodos indirectos son aquellos usados para producir un modelo temporal. Un subproceso es el

utilitaje reconfigurable, que permite reutilizar moldes mediante el uso de materiales que cambian de estado para la creación de moldes. Este subproceso ha sido utilizado para producir herramientas para el ala de los aviones en uso sin la necesidad de desensamblar nada. Mediante los métodos directos, los moldes e insertos son fabricados directamente con procesos de fabricación aditiva. De esta manera, los métodos directos no requieren tantos pasos como los indirectos y, además, tienen la capacidad de preservar la densidad general de manera más específica.

Prototipado rápido

El prototipado rápido permite la realización y verificación de los modelos realizados mediante simulación computacional de partes de aeronaves. Los prototipos son útiles para detectar los inconvenientes de los diseños y las oportunidades que sólo se manifiestan mediante modelos físicos. Además, los prototipos son útiles para ensayos en túneles de viento y verificación de las líneas de corriente a lo largo del modelo. Dependiendo del caso, la mayoría de los prototipos no necesitan ser fabricados con el material final, no obstante, deben poseer la suficiente rigidez y fiabilidad para que sus resultados sean útiles. Así, se pueden evitar procesos de fabricación con materiales costosos, haciendo del prototipado un proceso rápido y más barato que permita validar las características físicas del modelo así como su dinámica de fluidos computacional.

Reparación

Usar tecnología de fabricación aditiva para reparación tiene múltiples beneficios. Por una parte, permiten que las piezas de alto valor que han sido dañadas sean reparadas en lugar de ser convertidas en chatarra y tener que ser desechadas y reemplazadas. Ello ha demostrado producir importantes ahorros a las compañías, además de tener un menor impacto medioambiental comparado a procesos convencionales. Este apartado se puede dividir en dos vertientes: restauración de la geometría y restauración de la integridad estructural.

La restauración de la geometría se centra en recuperar la parte de aquella que falta o está desgastada. Esto es relativamente fácil de conseguir mediante la técnica de DED, consiguiendo una reducción de costes sustancial. Numerosas empresas ya han adoptado esta práctica, corroborando que se puede extender también a la reparación de componentes estructurales de la aeronave, así como componentes del motor como álabes que, además de haber sido reparados, han visto incrementado su rendimiento. Los pasos necesarios para realizar este tipo de reparaciones incluyen un escaneo de la superficie dañada, una planificación del recorrido de la deposición de material y, finalmente, la deposición del polvo fundido para formar la nueva estructura.

Por otra parte, la restauración de la integridad estructural busca recuperar o potenciar la integridad estructural de una parte. Normalmente implica reparar fracturas y daños corrosivos, usualmente mediante Difusión en Fase Sólida (SPD). La técnica SPD también se puede aplicar a juntas que están superpuestas para aumentar la integridad estructural de la junta y prevenir futuros daños por corrosión. Por tanto, mediante SPD se pueden reparar agujeros y evitar compromisos en la integridad estructural mediante el uso de parches y correas. Además, su aplicación a juntas solapadas del fuselaje ha mostrado una reducción significativa de la tensión máxima comparado con su reparación sin SPD.

Retos de la fabricación aditiva en la industria aeroespacial

A pesar de todas las ventajas que han sido mencionadas, existen una serie inconvenientes en los que se está trabajando para aumentar el potencial de esta tecnología. Actualmente, existen tres obstáculos fundamentales que se detallan a continuación.

Limitaciones en la fabricación

Todas las tecnologías AM presentan limitaciones en términos de resolución, calidad del conformado y consistencia o deformación, entre otras, que son de especial relevancia en la industria aeroespacial. En los procesos de sinterizado del metal, la resolución de la parte está limitada al 90 % del tamaño del polvo, es decir, la pieza terminada no puede tener características más finas que el 90 % del tamaño de las partículas del polvo. Para procesos en los que se funde el material, la resolución está limitada por las partículas de polvo más grandes, ya que incrementan el tamaño de la piscina de material fundido que se origina al fundir el material. Además de todo ello, existen limitaciones en la resolución e incertidumbres debido a los servo motores y la calidad del traspaso del modelo CAD a la planificación del recorrido del cabezal de la máquina.

De manera similar, los procesos DED han mostrado inconsistencia en la calidad del conformado de una construcción a otra. Ello puede provocar incertidumbre al medir el comportamiento del material en diferentes regiones de una misma pieza. Además, hay un alto coste asociado a la calificación de materiales en la industria

aeroespacial según métodos tradicionales. Mientras que la calidad de la conformación de una parte se puede medir, esta calidad puede variar con la fabricación de nuevas piezas.

En las tecnologías de fabricación aditiva, el tamaño del punto, es decir, el área de polvo que ocupa la fuente de energía, está sujeta a amplias variaciones a través de diferentes combinaciones de fuentes de energía y polvos metálicos. Dependiendo de la emisividad y reflectividad del polvo, este puede reflejar fuentes de energía incidentes, dando lugar a que el polvo no se funda completamente. Adicionalmente, no siempre se pueden predecir tensiones residuales y distorsiones de procesos de sinterizado y fundido. Especialmente, debido a su naturaleza, las deformaciones por pandeo pueden ser difíciles de predecir también. Esta limitación es especialmente relevante en los grandes diseños de optimización topológica que contengan cerchas delgadas. Por último, volúmenes de construcción grandes pueden resultar caros o poco realistas para tecnologías de fabricación aditiva que requieran una atmósfera inerte o ser realizadas en vacío.

Post procesado

Para las aplicaciones aeroespaciales, la mayoría de los procesos DED y PBF necesitan un post procesado. Los procesos que usan polvo como materia prima suelen producir partes con una porosidad sustancial. Esto puede ser abordado mediante prensado isostático en caliente, que reduce la porosidad y aumenta la resistencia y fiabilidad. De manera ocasional, se aplica un recocido durante el post proceso para consolidar la estructura de grano y conseguir las propiedades deseadas.

El acabado superficial también suele ser un apartado importante en la fabricación aditiva de piezas para aplicaciones aeroespaciales. Mientras que con las herramientas de maquinado tradicionales se puede acabar la superficie de la mayoría de las partes producidas, con aquellas más complejas se suelen requerir métodos menos convencionales como granallado, grabado químico y vibroacabado. El granallado o arenado es la operación de propulsar a alta presión un fluido, que puede ser agua o aire, o una fuerza centrífuga con fuerza abrasiva, contra una superficie para alisarla o eliminar materiales contaminantes. Por otra parte, el grabado químico es un procedimiento tecnológicamente avanzado, basado en la disolución controlada del metal, por medio de soluciones químicas, que lo disuelven por una acción físico-química, siendo altamente recomendable para piezas metálicas de precisión y con geometría compleja. Por último, el vibroacabado es un método de acabado superficial en el que se tratan piezas metálicas de pequeño tamaño a granel para reducir su rugosidad superficial, aportándole una apariencia de brillo y esplendor o simplemente para eliminar las rebabas producidas por una fase previa de producción. Sin embargo, todo ello puede limitar la complejidad de la optimización topológica de las partes teniendo en cuenta que el acabado superficial es un factor a tener en cuenta. Además, puede provocar retrasos en el tiempo de producción y también reducir el ratio buy-to-fly de la parte. No obstante, todos estos retrasos siguen siendo menores en comparación con los métodos tradicionales de fabricación y pueden ser mejorados mediante la innovación de los sistemas de fabricación híbridos.

Especificaciones y desarrollo estándares

Recientemente se han ido creando numerosos estándares para la fabricación aditiva para aplicaciones aeroespaciales, aún queda una gran cantidad de investigación para desarrollar una calificación adecuada de los componentes fabricados mediante tecnologías AM. Además, esta investigación suele estar acompañada de falta de consenso. Aunque la implementación de métodos AM en las aplicaciones aeroespaciales no es algo realmente novedoso el desarrollo de estándares para esta aplicación está en sus primeras etapas y avanza de manera gradual. Actualmente, se han desarrollado estándares para especificaciones de detalles de la materia prima, tipos de defectos y métodos de inspección para partes fabricadas aditivamente, sin embargo, las técnicas de mejora del acabado superficial y refinamientos de la tolerancia al daño son áreas con un fuerte potencial de desarrollo.

Potencial para futuras aplicaciones

Gracias a la gran libertad geométrica que permiten las tecnologías AM, las estructuras multifunciones resultan más fáciles de obtener, y es que este tipo de estructuras poseen numerosas ventajas en la industria aeroespacial. Como su propio nombre indica, son aquellas estructuras que pueden desempeñar varias funciones al mismo tiempo, a través de la consolidación de partes, el rediseño y la innovación. Ejemplos de estas construcciones son aquellas con componentes electrónicos incorporados, estructuras con gradientes de materiales rígidos y flexibles, aquellas con aislamiento acústico y térmico integrado e impresiones 4D. Este último tipo hace referencia a la fabricación aditiva de partes con geometrías que pueden cambiar con el tiempo a través de parámetros del entorno como humedad, temperatura o radiación. En este contexto, la tecnología PolyJet ha empezado a ganar relevancia en el sector. La respuesta de un polímero a factores externos como temperatura, puede ser usada para la consolidación o eliminación de ensamblajes y servo motores, como un regulador pasivo

de la temperatura del aire por ejemplo.

Los procesos DED multimateriales permiten a los diseñadores adaptar la respuesta de un componente y su comportamiento bajo unas cargas mecánicas y entornos térmicos y ayudar a la consolidación de partes simplificando el proceso de ensamblado. Mientras que los procesos de optimización topológica se usan para reducir el peso del componente fabricado, diseños aeroelásticos del ala y una disposición óptima de refuerzos, los procesos DED multimateriales permiten a los diseñadores aplicar una optimización topológica multimaterial al diseño de un componente aeroespacial.

A medida que se van desarrollando tecnologías AM, el previsible aumento en los volúmenes de construcción llevará a la construcción de piezas cada vez más grandes con el objetivo de fabricar partes grandes de una aeronave como puede ser el ala. La fabricación aditiva también tiene la flexibilidad y conveniencia para establecer una cadena de suministro para recambios de partes de aeronaves a demanda y con cortos tiempos de suministro. Además, algunas organizaciones como la NASA estudian el potencial de las herramientas y piezas hechas por AM en entornos de gravedad cero.

Por otra parte, la fabricación aditiva también se puede utilizar para reparaciones rápidas y efectivas de componentes de alto valor. La mayoría de tiempo y coste de una reparación mediante AM se emplea en preparar la pieza dañada para su reparación. La automatización de estas medidas de preparación permitiría un proceso de reparación con un coste significativamente menor y un tiempo de entrega menor que fabricar una pieza nueva. Actualmente, a raíz de un proyecto europeo, se ha desarrollado un nuevo sistema de reparación para la industria aeroespacial que determina las desviaciones geométricas de la pieza dañada y usa esos datos para reconstruir su geometría. El desarrollo de estos sistemas requiere un gran desarrollo de la automatización de los procesos de preparación de la superficie y soportes para componentes de gran tamaño. Estos sistemas pueden ser incorporados en cadenas de suministro de corto plazo que analizan el daño que ha sufrido un componente y deciden si merece la pena ser reparado o, por el contrario, se necesita fabricar una pieza de repuesto.

2.3.2. AM en la industria automotriz

La industria automotriz, al igual que la aeronáutica, es un sector altamente competitivo en el que las tendencias del mercado cambian continuamente haciendo necesaria la aparición de nuevos métodos de fabricación que permitan a las empresas adaptarse a las nuevas demandas de mercado. La implementación de la fabricación aditiva en este campo supone un cambio de gran importancia en los modelos de producción, otorgando más flexibilidad a las empresas a la hora de diseñar geometría complejas y bajo demanda a la vez que acortando el proceso de fabricación en general, lo que supone una ventaja competitiva vital.

Algunas de las primeras técnicas AM en aplicarse al sector automotriz fueron el sinterizado selectivo por láser (SLS) o la impresión 3D, que permitieron empezar a fabricar componentes completos en un mismo lugar de acuerdo a los requerimientos del ensamblaje y las necesidades del operario encargado de montar la parte final en el vehículo. Además, también se implementaron tecnologías AM en la cadena de suministro, permitiendo crear herramientas y utillaje especializado para los componentes de los vehículos. La libertad en el diseño y la capacidad de producir piezas optimizadas centradas en el funcionamiento del vehículo hace de la fabricación aditiva una opción muy tentadora para entornos competitivos como la Fórmula 1 o la NASCAR, debido a sus exigentes demandas en cuanto al diseño y producción de los componentes de este tipo de vehículos. Además, y no sólo para entornos competitivos, la fabricación aditiva permite crear componentes más ligeros, otorgando las mismas ventajas ya comentadas en el sector aeronáutico y aeroespacial: reducción de material utilizado, aumento de la productividad, reducción de costes, etc... Sin embargo, la gran inversión que requiere la adquisición y mantenimiento de la infraestructura necesaria para el desarrollo de la fabricación aditiva supone un obstáculo para su implantación de manera extendida, haciendo que resulte rentable para pequeños lotes. No obstante, la creciente tendencia de personalización de productos, reducción del consumo de los vehículos y la consecuente reducción de peso de los mismos y la transición ecológica hacia sistemas alternativos menos contaminantes empujan a la producción de los componentes en la dirección de la fabricación aditiva.

Aplicaciones de AM en la industria automotriz

La flexibilidad en los procesos que otorga la fabricación aditiva requieren de herramientas capaces de otorgar dicha versatilidad y libertad en el proceso de fabricación. La fabricación aditiva permite tener esta agilidad en el taller mediante el desarrollo de herramientas blandas para dar soporte y acelerar el proceso de producción a la vez que promueve la mejora de herramientas duras para optimizar los procesos de replicación en masa.

Herramientas blandas para líneas de montaje

El concepto de herramientas *blandas* se refiere a herramientas personalizadas desarrolladas y conformadas a partir de procesos AM para proporcionar ayuda con el utillaje a los operadores de las líneas de montaje y aportando flexibilidad al taller. Esto permite, por una parte, reducir el peso de las herramientas y el coste y tiempos de producción al evitar la dependencia de terceras compañías antes incluidas en las líneas de producción que afectan al flujo de trabajo global. Todo ello, gracias en gran medida a la mejora del comportamiento mecánico y estabilidad geométrica de los materiales utilizados en AM, permitiendo el aumento de funcionalidad y reducción de peso de los componentes fabricados a partir de ellos.

Herramientas duras para optimizar los procesos de replicación en masa

Las herramientas duras se refieren a aquellas utilizadas en procesos de fabricación a gran escala que realizan una función de manera repetida requiriendo así, tener una gran resistencia para soportar el uso continuado en el tiempo. En la industria automotriz, los procesos de fabricación en masa son abordados mediante procesos convencionales. Sin embargo, estos procesos ofrecen un enfoque sistemático a la optimización de los procesos, en el que se puede implementar la fabricación aditiva para reducir el tiempo de entrega. Esta optimización se beneficia de la sustitución total o parcial de la cadena de producción tradicional por tecnologías AM otorgando un control total a los fabricantes automovilísticos sobre el flujo de trabajo permitiendo personalizarlo a su gusto. Es importante tener en cuenta que para que esto sea posible, requiere de personal experto en el diseño para seleccionar correctamente los materiales, monitorear la construcción de la pieza y el post procesado.

La aplicación de procesos AM para producir componentes automovilísticos está limitado por las propiedades de los materiales tanto mecánicas como térmicas o químicas. Sin embargo, estos materiales se pueden reforzar con fibras para tratar de mejorar su comportamiento. A continuación se van a mencionar brevemente algunas aplicaciones directas de la fabricación aditiva a automóviles a modo de ejemplo.

- Componentes del motor, planta motriz y tubo de escape: Se trata de partes sometidas a altas temperaturas durante largos periodos de tiempo y expuestas a componentes químicos que pueden reaccionar con el material del componente.
- Paneles exteriores y alumbrado: En estas partes se puede aplicar SLS o FDM a pesar de un acabado superficial algo peor aunque luego pueden ser post procesados para mejorar sus propiedades mecánicas.
- Aplicaciones interiores: Se trata de los componentes del interior del vehículo donde van a ir el conductor y los pasajeros. Deben cumplir unos requisitos tanto en acabado superficial como estéticos.

Impacto económico de la aplicación de procesos AM en la industria automotriz

Los primeros beneficios de la implantación de la fabricación aditiva en este sector se vieron en el prototipado rápido y el desarrollo de producto. Como ya se ha comentado, permite acelerar el proceso y mejorar la calidad de los productos, reduciendo los costes del utillaje desde la fase de diseño del producto. Por otra parte, ya sea para herramientas blandas o duras, la fabricación aditiva resulta un proceso esencial para otorgar flexibilidad en la producción, en la entrega y en el taller, además de para producir componentes optimizados automotrices.

A pesar de sus múltiples ventajas, la mayor de todas ellas es la capacidad personalización en masa, que permite al consumidor comprar un vehículo bajo demanda en estrecha colaboración con el fabricante, permitiendo realizar un diseño conjunto para cumplir con sus mutuos requisitos. De esta manera, el rango de productos crece abruptamente sin aumentar significativamente los costes de fabricación. La fabricación aditiva es una herramienta poderosa para lograr un alto nivel de personalización para un mercado potencial casi ilimitado.

Otra gran cualidad es la relación que establece entre el inventario y la cadena de producción. Los fabricantes automovilísticos están obligados a guardar repuestos de cada modelo de sus vehículos durante 10 años, por ello, suelen depender de terceros que les produzcan y suministren dichas partes. La capacidad de producir una parte sin herramientas específicas ni caras es posible mediante AM, permitiendo convertir el inventario físico en uno digital en el que todos los modelos 3D y métodos y estrategias de fabricación están almacenados para ser utilizados cuando sea necesario.

Por otra parte, otra cualidad con gran impacto medioambiental, es la fabricación descentralizada gracias a la digitalización. De esta manera, el flujo físico de material y productos se reduce considerablemente, lo que conlleva una reducción de emisiones. Sin embargo, el mayor problema que representa esta digitalización es la

protección de la propiedad intelectual. En la era digital, los modelos 3D de los productos se transmiten con fines industriales mediante una confidencialidad contractual entre consumidores y productores y se hace necesario proteger este tipo de información que, aparte de la geometría del producto, puede contener información del material, parámetros de construcción, estrategias y otros posibles contenidos requeridos para asegurar una alta calidad del producto. La filtración o revelación no autorizada de esta información puede tener una repercusión económica muy considerable.

Para concluir, la fabricación aditiva es un factor clave en la industria automovilística especialmente en la era digital, acercando a consumidores y fabricantes. Los futuros procesos de fabricación otorgarán la suficiente flexibilidad para producir prácticamente cualquier componente para el correcto funcionamiento del vehículo o simplemente para personalizarlo.

El campo de pruebas de esta tecnología ha sido la competición por su gran variedad de demandas y aplicaciones. La propagación de la fabricación aditiva a otros nichos de mercado dependerá de la valoración de cada compañía teniendo en cuenta los gastos asociados y los beneficios que trae consigo esta tecnología como la reducción de los tiempos producción, sostenibilidad, ahorro de material o la capacidad de optimizar los procesos de replicación en masa. Siendo esta última un factor clave para proporcionar flexibilidad y libertad en el diseño para responder a las necesidades del mercado.

2.3.3. AM en la industria médica

Para concluir este subapartado se va a hablar ahora de la implementación de la fabricación aditiva en la industria médica como la tercera industria más importante en la que se aplica este tipo de tecnología, con el objetivo de mostrar cómo es aplicable esta tecnología en ámbitos no tan puramente industriales.

Como ya se ha comentado en numerosas ocasiones, la fabricación aditiva proporciona una gran capacidad de personalización del producto. Esto cobra especial relevancia en la industria médica, donde cada paciente es único, lo que provoca que la industria médica sea un gran ámbito de aplicación para esta tecnología. Entre sus aplicaciones en este campo se incluyen implantes personalizados, modelos médicos, ortodoncia, férulas y modelos dentales. Además, también se ha explorado la posible participación de las tecnologías AM en la creación de órganos artificiales. En esta industria la metodología de trabajo es similar que en ámbito más puramente industrial. Primero se realiza un escaneo 3D de la anatomía del paciente de manera que queda digitalizada. A continuación, se realiza un modelo de esa anatomía para finalmente materializarlo de la misma manera que en los casos anteriores. Después de la fabricación suele ser necesario un post procesado de la parte como pulido, por ejemplo. Para compararlo con otros métodos de fabricación de este tipo de productos y determinar qué proceder es mejor, no sólo hay que mirar por el ámbito económico sino también tener en cuenta otros factores, como la digitalización de los modelos.

Aplicaciones de AM en la industria médica

Las aplicaciones de la fabricación aditiva en la industria médica se pueden clasificar en cinco grandes grupos:

- Modelos médicos.
- Implantes.
- Herramientas, instrumentos y partes para dispositivos médicos.
- Ayudas médicas, guías de soporte, férulas y prótesis.
- Biofabricación.

Cabe destacar que no es la única clasificación posible pero sirve para dar una idea de los diferentes ámbitos de uso. A continuación, se comentará brevemente en qué consiste cada una de las aplicaciones.

Modelos médicos

Como ya se ha comentado, la gran personalización que ofrece la fabricación aditiva permite adaptar los modelos médicos a la anatomía de cada paciente. Estos modelos tienen diferentes usos como, por ejemplo, preparación para las operaciones, entrenamiento para estudiantes de medicina o para informar a los pacientes y sus familias. Los modelos médicos se realizan comúnmente de la zona craneomaxilofacial, pero también se pueden realizar de extremidades, de la espina dorsal o de la pelvis. En cuanto al material utilizado, se puede escoger

libremente, teniendo en cuenta que si el modelo va a estar presente en un quirófano, ha de estar esterilizado. A modo general, el procedimiento para elaborar consta de los siguientes pasos: se parte de una imagen médica de la anatomía del paciente (mediante resonancia, ultrasonidos, etc...) para posteriormente ser modelada en 3D. A continuación, se fabrica ese modelo mediante algún procedimiento AM y finalmente se le aplica un post procesado para eliminar las estructuras de soporte.

Implantes

Un implante es un producto médico para reemplazar o reforzar una zona afectada. Al ir situado directamente en el cuerpo del paciente, las restricciones y requisitos en cuanto al material son mucho más estrictos, siendo mucho más largo el proceso de aprobación. Por ejemplo, las propiedades superficiales del implante pueden afectar fuertemente a su adhesión. Nuevamente, en casos de implantes personalizados, la fabricación aditiva se vuelve una solución factible. El proceso de diseño y fabricación es muy similar al caso anterior. Por otra parte, muchos implantes son realizados a partir de metales usando la técnica PBF, requiriendo después, de un post procesado para retirar los soportes y realizar un pulido o tratamiento térmico. Finalmente, los implantes deben ser esterilizados para poder ser implantados en el paciente.

Herramientas, instrumentos y partes para dispositivos médicos

Las herramientas, instrumentos y partes para dispositivos médicos hacen referencia a todos aquellos dispositivos que permiten realizar una operación clínica. Puesto que, nuevamente están en contacto con el paciente, necesitan ser esterilizados al tocar fluidos corporales, membranas, articulaciones y órganos. También se incluyen en esta sección todos aquellos instrumentos usados para ortodoncia, de hecho, una de las prácticas más habituales es utilizar foto-polimerización VAT para crear moldes de retenedores. El proceso es el mismo que el ya mencionado en los dos apartados anteriores.

Ayudas médicas, guías de soporte, férulas y prótesis

Al contrario que en los casos anteriores, las partes fabricadas son externas al cuerpo y se puede combinar con aparatos estándar para permitir la personalización en cada caso. Algunos ejemplos del tipo de productos de este tipo son los soportes a largo plazo y postoperatorios, las guías de movimiento, los fijadores, las prótesis externas, las cavidades de las prótesis, las férulas personalizadas y las aplicaciones ortopédicas. El proceso de fabricación empieza con la obtención de imágenes médicas seguidos del procedimiento adecuado para obtener la información necesaria para el modelo 3D como puede ser mediante segmentación, escaneo o mediciones 3D. También existen otros métodos alternativos para fabricación aditiva como el control numérico computacional (CNC). Finalmente, las partes pueden requerir de post procesado también en este caso que pueden ser, dependiendo de la aplicación, eliminación de soportes, tratamientos térmicos, pintado o revestimiento.

Biofabricación

La biofabricación es una combinación de fabricación aditiva e ingeniería de tejidos. Los materiales empleados deben ser biológicamente compatibles con el cuerpo, razón por la cuál se usan diferentes polímeros, materiales cerámicos así como composites. Teniendo en cuenta que las estructuras porosas con cultivo y una matriz 3D pueden afectar la especialización celular. Estos son dos elementos presentes en la ingeniería de tejidos, las estructuras porosas hacen referencia a estructuras con pequeños agujeros diminutos que permiten que las células se adhieran, crezcan y se desarrollen dentro de la estructura, mientras que la matriz 3D hace referencia a un andamio tridimensional que imita el entorno del cuerpo humano donde va ubicada la pieza. Las piezas se pueden personalizar de acuerdo a las dimensiones específicas de la anatomía de cada paciente mediante escaneo 3D. Durante el modelado, se diseñan las microestructuras y macroestructuras así como las estructuras porosas encargadas de atraer a las células y fomentar su crecimiento. El proceso necesita ser esterilizado después de la pintura y, antes de la aplicación final, es necesario fomentar el crecimiento celular *in vitro*.

Como se ha visto, la fabricación aditiva es también aplicable en el mundo de la medicina, con un proceso de diseño y fabricación con ciertas similitudes respecto al aeronáutico y automotriz y siempre con necesidad de esterilización, puesto que los productos finales irán normalmente implantados en los cuerpos de los pacientes. Un gran obstáculo es la limitación a la hora de describir los procesos, pues si una compañía registra una técnica en particular, en el resto de literatura se deberán inventar otros nombres para referirse al mismo procedimiento o uno similar, lo que suele dificultar el seguimiento y descripción de estos procedimientos, aunque no es el único campo en el que ocurre este problema. En cuanto materiales se ha visto que se usan metales, polímeros, cerámicos y composites. Los procesos AM más utilizados son PBF, MEX y fotopolimerización VAT, no siendo tan frecuentes en este ámbito técnicas como DED o SL.

En perspectiva al futuro, los expertos en este campo abogan por adoptar una terminología común para una mejor comparación de los métodos de fabricación. El desarrollo de los procesos de fabricación aditiva, en dispositivos y materiales apuntan a futuras aplicaciones en el ámbito dental y médico, con la posibilidad de que se dejen de utilizar algunas técnicas como la ya mencionada Sheet Lamination (SL), mientras que otros procesos como binder jetting o material jetting tienen un gran potencial para ser empleados en el futuro para realizar partes hechas de metal.

2.4. Futuro y desafíos de la fabricación aditiva

Como ya se ha visto, la fabricación aditiva ha revolucionado la industria, en especial la aeronáutica y aeroespacial, con la posibilidad de crear piezas de geometrías complejas, ligeras y de alta calidad, minimizando el material empleado en ello haciendo de estos procesos una alternativa más sostenible. Sin embargo, existen ciertos retos, limitaciones y barreras que el desarrollo de esta tecnología deberá afrontar en los próximos años. En este apartado se busca explicar y comprender en qué consisten estas barreras y desafíos de futuro.

2.4.1. Limitaciones de la fabricación aditiva

A pesar de sus múltiples beneficios, existen ciertas limitaciones y restricciones que hacen que la fabricación aditiva se use para casos en específico y no se haya implementado en el ámbito comercial a gran escala. A continuación, se explican algunas de estas restricciones.

Producción en masa

La fabricación aditiva actual está diseñada para asumir la producción de productos de geometría compleja y muy personalizados en volúmenes de producción pequeños. Se trata de productos que buscan satisfacer demandas específicas. El coste para generar grandes ingresos mediante la fabricación por lotes usando la fabricación aditiva es mayor que mediante técnicas de moldeo por inyección debido a la discrepancia en el tiempo de ciclo. Es decir, para este tipo de producción en masa, la fabricación aditiva presenta tiempos más altos de producción que el moldeo por inyección. No obstante, pueden aparecer escenarios que apremien más el ahorro de material y la consolidación de la pieza, por ejemplo, cuando haya demanda de piezas muy personalizadas.

Límite en la resolución de cada capa

La resolución en la impresión de cada capa de la pieza final está relacionada con el acabado final y con el tiempo total del proceso. Una resolución de capa mayor, conlleva un mejor acabado superficial de la pieza pero conlleva un gasto de tiempo mayor. Es por ello, además de por principios físicos que intervienen en el proceso, que se tiende a establecer límites en este parámetro, siendo típicamente entre 0.1 mm y 25 mm aproximadamente. Los investigadores han explorado sistemas AM capaces de trabajar con todo el rango de tamaños, desde nanofabricación y microescultura hasta fabricación de contornos a gran escala, construcción arquitectónica y soldadura por haz de electrones. En las construcciones más grandes, se usan mayores grosores tratando de asegurar un buen acabado superficial mediante la planificación del proceso, procesos AM híbridos y post procesamiento mediante maquinado.

Limitación en el uso de materiales

Muchos de los productos de la industria hoy en día están compuestos de diversos materiales para otorgar a la pieza diferentes comportamientos o funcionalidades, sin embargo, en la fabricación aditiva, el abanico de materiales está más acotado. Las piezas fabricadas mediante AM pueden tener propiedades mecánicas anisótropas debido a deficiencias en la unión entre capas. Además, la mayoría de los sistemas AM sólo procesan un material a la vez. Sin embargo, están apareciendo sistemas que sí admiten trabajar con varios materiales al mismo tiempo, especialmente con polímeros y metales, no obstante, su implementación se está viendo comprometida por la incertidumbre del comportamiento en las interfaces entre los materiales.

Normativa AM y propiedad intelectual

Las normativas y estándares de uso son imprescindibles para asegurar la calidad de las piezas, la repetibilidad y la consistencia en todas las construcciones y máquinas. Las primeras en aprobarse fueron las especificaciones para el Ti6Al-4V por la organización de estándares internacionales americana para pruebas y materiales ASTM International. No obstante, la gran variedad y las diferencias existentes entre máquinas, materiales y procesos

hace que la elaboración de una normativa común sea algo realmente complicado. Por otra parte, está la oposición de algunos fabricantes a que esto sea algo posible por su interés financiero en la provisión de consumibles y repuestos personalizados. El panorama actual da a entender que se está lejos de llegar a un consenso entre los investigadores y la industria en lo que a la elaboración de estándares se refiere. Por otra parte, está la aparición de entornos de intercambio y descarga de modelos 3D y proyectos, que amenaza el panorama legal actual así como las regulaciones que protegen a los inventores contra la infracción. Para tratar de solucionar este problema, los investigadores tratan de encriptar sus modelos CAD para evitar la fuga de información.

2.4.2. Retos de la fabricación aditiva para su desarrollo futuro

Como ya se ha mencionado en los primeros apartados de este documento, a la aparición de la fabricación aditiva se la ha considerado una nueva revolución industrial por el cambio de paradigma en los procesos de fabricación que puede llegar a provocar en diferentes ámbitos industriales. A continuación, se van a exponer algunos retos y tendencias de este tipo de fabricación que serán de especial relevancia en el futuro.

Fabricación aditiva para fabricación de *escritorio*

La fabricación de escritorio hace referencia a la posibilidad de fabricar componentes en pequeñas máquinas que puedan llegar a caber incluso en un escritorio, sin depender de la gran maquinaria que hay en los talleres, un ejemplo de este tipo de fabricación es la impresión 3D, en la que la máquina de fabricación, en este caso una impresora 3D, puede estar presente en una oficina o laboratorio. Sin embargo, este tipo de tecnologías que acercan al consumidor y la etapa de diseño se encuentran en una etapa aún inicial debido a la incomodidad del diseño y software de trabajo. Se están dando pasos en esta dirección mediante la incorporación de software que incluya interfaces más accesibles al usuario como el uso de bolígrafos o gestos, en ocasiones adoptadas del mundo de los videojuegos, que con el tiempo irán en crecimiento con el objetivo de modificar y producir contenido 3D. Además, aficionados de estas prácticas están creando pequeñas industrias para desarrollar máquinas más pequeñas, baratas, accesibles con mejor acabado y con mayor abanico de materiales. Por otro lado, la formación en impresión 3D será fundamental para entender todas las técnicas y máquinas disponibles y así poder adaptarse al crecimiento de la fabricación aditiva que aún se encuentra en una de sus primeras etapas.

Desarrollo tecnológico

Como ya se ha mencionado, la fabricación aditiva se encuentra en etapa de crecimiento, esto implica que todos sus beneficios aún no han sido explotados en toda su plenitud, en parte, por la falta de formación en este campo. Por ello, aún hay muchas ramas de investigación que aún no han sido explotadas. Para los futuros sistemas de diseño para fabricación aditiva serán necesarios algoritmos eficientes y fiables para analizar y sintetizar geometrías complejas, restricciones y especificaciones varias.

Para generar diseños con formas más complejas y mayor variedad de materiales serán necesarios nuevos métodos computacionales como imágenes normales de profundidad por capas utilizando campos de distancia, para representaciones de modelos 3D en fabricación aditiva. Se trata de un método de representación de modelos 3D que muestran la profundidad de los objetos en un entorno tridimensional dividiendo el objeto en capas en las que a cada punto se le asigna una distancia. También se necesitarán nuevos métodos de modelado y computación para trabajar con futuros componentes cuya geometría sea órdenes de magnitud más compleja que las actuales.

Por último, las características que hacen de la fabricación aditiva una opción superior a los métodos tradicionales requieren de más investigación para resultar en alternativas más prácticas. Sin embargo, estas investigaciones son lentas debido a las brechas tradicionales entre los entornos académicos y los industriales, en parte por el hecho de que en la industria se desarrollan máquinas complejas y caras que no son de dominio público.

Organización e integración de las investigaciones

La fabricación aditiva se ha convertido en un ámbito de investigación muy interesante debido a su potencial y, especialmente, por la expiración de las patentes. Sin embargo, existen numerosos problemas con la organización, integración e impacto de las investigaciones en la industria. La principal razón de ello es que la investigación está muy fragmentada y actualmente no existen mecanismos para integrarla y unificarla, en especial, por las grandes diferencias entre las técnicas AM. A ello se le suma la oposición de las entidades comerciales con mayores beneficios a una investigación común. Una posible solución sería crear plataformas de investigación acceso libre aunque ello requeriría grandes inversiones en infraestructura y personal cualificado para organizar las investigaciones.

Actualmente, los investigadores realizan su trabajo de forma individual en campos multidisciplinarios. En el futuro se espera la integración de los modelos 3D, componentes mecánicos y eléctrico y actuadores para dotar de funcionalidades al producto y poder imprimirlo todo (*print-it-all*) durante el proceso de fabricación. No obstante, en caso de ser conseguido, se espera que sea usado sólo en laboratorios y demostraciones antes que implementarse para uso comercial ya que antes, habría que considerar varios factores como fiabilidad, repetibilidad, robustez y rendimiento bajo diferentes condiciones ambientales.

Integración de sistemas AM con sistemas tradicionales

Un posible cambio que pueden experimentar las plantas de producción es una transición hacia filas de impresoras 3D junto a las máquinas tradicionales de maquinado como tornos, cepilladoras, fresadoras y máquinas de perforación, por lo que se necesitarán nuevas operaciones y sistemas de planificación para dar soporte a una producción en masa además de nuevos modelos de producción. La fabricación aditiva es capaz de brindar producción descentralizada para volúmenes de producción bajos y medios permitiendo a las compañías introducir cambios fácilmente en las cadenas de producción, entre los que se incluyen reducción de costes, la capacidad de fabricar productos más cerca de los clientes, reducción de las complejidades logísticas e involucrar a los consumidores en los procesos de diseño. El futuro de la fabricación aditiva está ligado a la necesidad de integrar correctamente los sistemas AM junto con los sistemas de producción convencional que ya está presente en los talleres, para ello, serán necesarios nuevos modelos de negocio, mejor nivel de prototipado y producción en series cortas.

Capítulo 3 Desarrollo del trabajo

En este capítulo se va a exponer el trabajo realizado para aplicar los conceptos de la fabricación aditiva al sector aeroespacial con el fin de mostrar al lector en qué consiste el proceso de diseño en estos casos. Se trata, por tanto, de la parte más importante de este trabajo y cabe recalcar que ha sido desarrollada con la asistencia de AIDIMME, cuyo personal ha ido revisando ciertas etapas y orientando al alumno durante el desarrollo del diseño. A modo aclaratorio, AIDIMME es un instituto tecnológico nacido en la década de los 80 del siglo pasado localizado actualmente en el parque tecnológico de la localidad de Paterna en la provincia de Valencia. Su campo de trabajo abarca el diseño y desarrollo de productos así como materiales innovadores, procesos avanzados y sostenibles de aprovisionamiento, fabricación y logística entre otros. Entre ellos se sitúa la fabricación aditiva gracias a la gran infraestructura con la que cuenta la empresa. Goza de reconocimiento nacional tanto internacional debido a sus múltiples colaboraciones empresariales además de haberse convertido en un centro tecnológico de referencia a nivel mundial en actividades de I+D+i.

A lo largo de esta sección se irá explicando todo el proceso de diseño con el fin de mostrar un caso de estudio de esta industria que se ha expuesto en detalle en el capítulo anterior. El primer paso será escoger un concepto a partir del cuál partir, para después buscar una posible misión en el sector aeronáutico y en base a ello, suponer unas fuerzas y dimensiones. A continuación, se modelará la pieza haciendo uso del software de diseño NX de SIEMENS. Usando ese modelo, se realizará una optimización topológica de la pieza aplicando las solicitaciones estimadas y en base a dicha optimización, se hará un nuevo modelo susceptible de ser fabricado mediante la técnica DED ya explicada anteriormente.

3.1. Elección de la pieza

El primer paso dentro de todo este proceso es la elección de una pieza adecuada para ser modelada, optimizada y fabricada mediante fabricación aditiva. Se trata de un proceso más complicado de lo que puede parecer en un primer momento ya que, por una parte, debe estar relacionada con el mundo aeronáutico, es decir, que forme parte de un sistema cualquiera perteneciente a un aeronave y, por otra, que tenga una forma inicial aceptable para ser modelada y que, además, posea unas dimensiones no excesivamente grandes (debido a las restricciones de fabricación). De estos hechos se puede desprender que esta búsqueda implica la obtención de una pieza muy específica dentro de un sistema cualquiera de un avión, helicóptero, cohete o cualquier otro vehículo aéreo, que no sea de gran tamaño y, a poder ser, con un plano detallado de sus dimensiones y, además, con las fuerzas específicas a las que está sometida esa pieza en particular. Como se ha podido entender, se trata de una tarea realmente desafiante debido al carácter específico de la pieza buscada.

Para acotar el campo de búsqueda, se optó por investigar los sistemas de un helicóptero, concretamente, del rotor principal. Una de las razones de esta decisión fue la gran cantidad de piezas que componen este sistema y que, como añadido, se encuentran muchas de ellas a simple vista, por lo que su identificación en casos reales sería más sencilla, además de servir así para tocar más en profundidad el ámbito de los helicópteros, un campo que no se ha visto tan en profundidad en el grado, predominado por el análisis de aviones. A continuación, se realizó una búsqueda bibliográfica a través de libros, artículos de estudio e incluso manuales IPC de algunos helicópteros, sin embargo, la obtención de la geometría de una pieza en específico dentro de ese sistema resultó de gran dificultad. Las únicas geometrías disponibles pertenecían a componentes de gran volumen como cabezales del rotor principal que quedan fuera del alcance del estudio. Ante este gran inconveniente se optó por una solución alternativa.

Tanto en la web como en otros recursos de información, existen ejemplos de aplicaciones de la fabricación aditiva en el sector aeronáutico donde, además, se puede observar el tipo de geometrías con las que se puede trabajar con las tecnologías AM, en especial con la técnica de fabricación DED que es aquella a la que se busca orientar el diseño por orden de la empresa. De esta manera, se pudo observar que la mayoría de ejemplos existentes de aplicación de la fabricación aditiva para mejorar estas piezas se tratan de partes que sirven como

uniones entre componentes. Ante este nuevo escenario, se optó por escoger uno de estos diseños conceptuales y buscarles una posible aplicación en el caso escogido, el sistema del rotor principal de un helicóptero. Finalmente, se escogió el diseño que se muestra en la Figura 3.1 que, además, muestra una posible optimización del mismo, lo que supone un añadido ya que podrá servir de referencia.

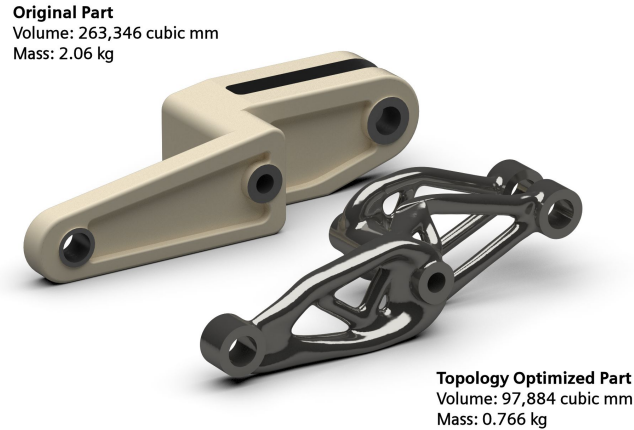


Figura 3.1: Diseño conceptual de una pieza para ser fabricada mediante procesos AM. [6]

Como se puede observar, la pieza original posee una geometría susceptible de ser optimizada. Consta de una primera parte de un grosor más reducido con la parte inferior paralela al suelo unida a la otra mitad de la pieza con un grosor mayor y que se subdivide en dos brazos conectados a la parte central. En la parte optimizada se han respetados los orificios existentes en la parte original y los contornos de la figura, aunque este diseño es simplemente orientativo y depende tanto del material como de las solicitaciones a las que esté sometida la pieza, al igual que los datos proporcionados, que son solamente orientativos para observar los efectos de la optimización sobre la pieza inicial. A partir de su forma, se deduce que se puede tratar de una unión entre dos componentes de un sistema. Finalmente, en la bibliografía existen ejemplos de piezas para optimizarlas muy populares que han sido ampliamente trabajados, este no es uno de ellos de manera que se tendrá que realizar un estudio original adaptado a este caso.

3.1.1. Ubicación y misión

Una vez escogido el diseño del que partir, se han de determinar sus dimensiones y las solicitaciones a las que está sometida la pieza, para ello, será fundamental encontrar una localización y misión para la misma. Como ya se ha comentado, se va a trabajar con el rotor principal de un helicóptero.

El rotor principal del rotor de un helicóptero es un componente fundamental para el comportamiento del mismo, pues es aquel al que van conectadas las palas encargadas de generar la tracción necesaria para mantener el aparato en vuelo además de incorporar las articulaciones necesarias para controlar tanto la magnitud de la tracción generada mediante el paso colectivo, es decir, cambiando el ángulo de ataque de todas las palas al mismo tiempo, como la dirección del vector tracción para poder desplazar el vehículo con el paso cíclico, es decir, variar el ángulo de ataque de cada pala en función de su posición azimutal. Esto es gracias al plato de distribución que, mediante las conexiones a las articulaciones correspondientes, consigue deflectar las palas. A su vez, el plato de distribución es inclinado según los dispositivos conectados a los mandos. En la Figura 3.2 se puede ver en detalle el rotor principal de un helicóptero.



Figura 3.2: Scissors link en el rotor principal de un helicóptero. Fuente: elaboración propia.

Como es bien sabido, el rotor se encuentra girando durante todo el tiempo una velocidad angular muy alta para que las palas generen sustentación. Para poder controlar el aparato, como se ha dicho antes, existen unas conexiones entre el plato de distribución y las palas. El plato de distribución se divide en dos componentes, el plato de distribución inferior, que no posee la capacidad de rotación y está conectado directamente a los mandos del piloto, y un segundo plato de distribución encima de este que se encuentra girando y está unido a su vez a las palas, pudiendo variar su inclinación, unidos finalmente ambos platos de distribución mediante un rodamiento. Para que el plato de distribución que se encuentra girando tenga esta capacidad de rotar, es necesario que esté unido al mástil del rotor (que está girando) mediante una unión entre ambos que le obligue a rotar. Esta unión recibe el nombre de *drive scissors* o *scissor link* (o enlace de tijera, en español) y consta a su vez de dos piezas, una en posición horizontal enganchada al mástil y otra en posición vertical unida al plato de distribución superior, estando ambas piezas unidas mediante una barra o cilindro con la capacidad de rotar entre ellas para contraerse o expandirse según sea necesario al variar los controles del helicóptero. A continuación, se muestra este componente en el rotor mostrado en la Figura 3.2 ampliado y remarcado en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Detalle del rotor principal de un helicóptero. Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones de este componente varía ampliamente de un modelo de helicóptero a otro, especialmente con las dimensiones de este. Además, su forma, aunque guarda siempre un patrón, también puede variar dependiendo del helicóptero y su misión. Incluso su posición puede variar también, estando la parte superior en vertical y

la inferior en horizontal. En cualquier caso, debido a la forma, misión y tamaño relativo en un helicóptero de dimensiones normales, esta pieza es una gran candidata para suponer que puede ser sustituida por la pieza conceptual que se ha presentado anteriormente. Adicionalmente, cabe recalcar que se trabajará sólo con uno de los dos componente del scissor link, principalmente para no excederse con las dimensiones de cara a la fabricación, además, ello permitirá deducir las fuerzas a las que está sometida más fácilmente.

3.1.2. Estimación de las dimensiones

Como ya se ha comentado anteriormente, obtener las dimensiones de este componente en específico para un helicóptero es una tarea realmente complicada, especialmente para obtener las dimensiones de sólo una de las piezas que forman este componente. De esta manera, se optó por adoptar unas medidas aproximadas en base a helicópteros similares con el objetivo de diseñar una pieza con unas dimensiones verosímiles que pudiese ser implementada en un hipotético helicóptero.

Tras observar la difícil tarea que suponía encontrar estos datos en la web, se acudió al laboratorio Pedro Duque de la Universidad Politécnica de Valencia para tomar medidas reales de este componente con el fin de comenzar a hacer estimaciones. En dicho laboratorio (que también es un hangar) se encuentra un rotor principal de un helicóptero de características desconocidas y un helicóptero ligero completo modelo MBB BO 105 al cual corresponden las imágenes del rotor principal que se han mostrado en la sección anterior. En primer lugar, se tomaron medidas del scissor link del rotor del helicóptero desconocido, mostrado en las Figuras 3.4 y 3.5.



Figura 3.4: Scissor link. Fuente: elaboración propia



Figura 3.5: Zona del plato de distribución. Fuente: elaboración propia

Las medidas tomadas de este componente de forma triangular se detallan en la Tabla 3.1 donde las medidas están tomadas en centímetros:

Altura	Grosor	Longitud mín.	Longitud máx.
24	3.5	4.5	11

Tabla 3.1: Medidas scissor link del hangar.

A partir de esas medidas se puede deducir que se trata de una pieza de una dimensión considerable que roza los límites de fabricación, que obligan a que la pieza ocupe un volumen menor de 300x400x600 mm para que pueda ser fabricada, además, se recomienda dejar cierto margen para que la pieza no toque los bordes de la plataforma donde va a ser construida.

Por otra parte, se observa que la pieza perteneciente al helicóptero MBB BO 105 posee dimensiones más reducidas, de aproximadamente la mitad de altura, manteniéndose la longitud y anchura en un valor similar. Además, se puede apreciar que la forma de las dos partes del componente varía de un helicóptero a otro.

Finalmente, teniendo en cuenta las dimensiones observadas, que estas pueden variar mucho de un modelo a otro y las diferentes formas que pueden tener, además de los límites dimensionales impuestos por AIDIMME, se opta por dotar a la pieza conceptual un volumen de 105x220x45, es decir, una longitud máxima de 10.5 cm,

similar a la pieza medida, una altura que supone la mitad de la misma, igual que el caso de la otra parte del scissor link de ese rotor principal que se ha comentado antes y un grosor de 4.5 cm en su zona más gruesa, nuevamente con un valor similar a los anteriores casos, destacando que este último parámetro puede variar notablemente según el rotor que se mida. En definitiva, a partir de las medidas tomadas de una pieza real, se han supuesto una serie de dimensiones de acuerdo a dichas medidas, adaptándolas a las restricciones de fabricación bajo el supuesto, comprobado en la búsqueda bibliográfica como empíricamente en las instalaciones de la UPV, de que las dimensiones de esta pieza en concreto pueden variar notablemente de un modelo a otro, sin embargo, se ha tratado de mantener la verosimilitud de las mismas al tener unos valores muy parecidos al de un caso real. El resto de dimensiones y longitudes se muestran en el plano elaborado en el programa NX de SIEMENS, mostrado en la Figura 3.6, adjunto en la página siguiente. Cabe recalcar que, obviamente, este plano ha sido realizado tras el modelado de la pieza, pero a modo ilustrativo, se puede mostrar este resultado sin mencionar, por ahora, dicho proceso del diseño.

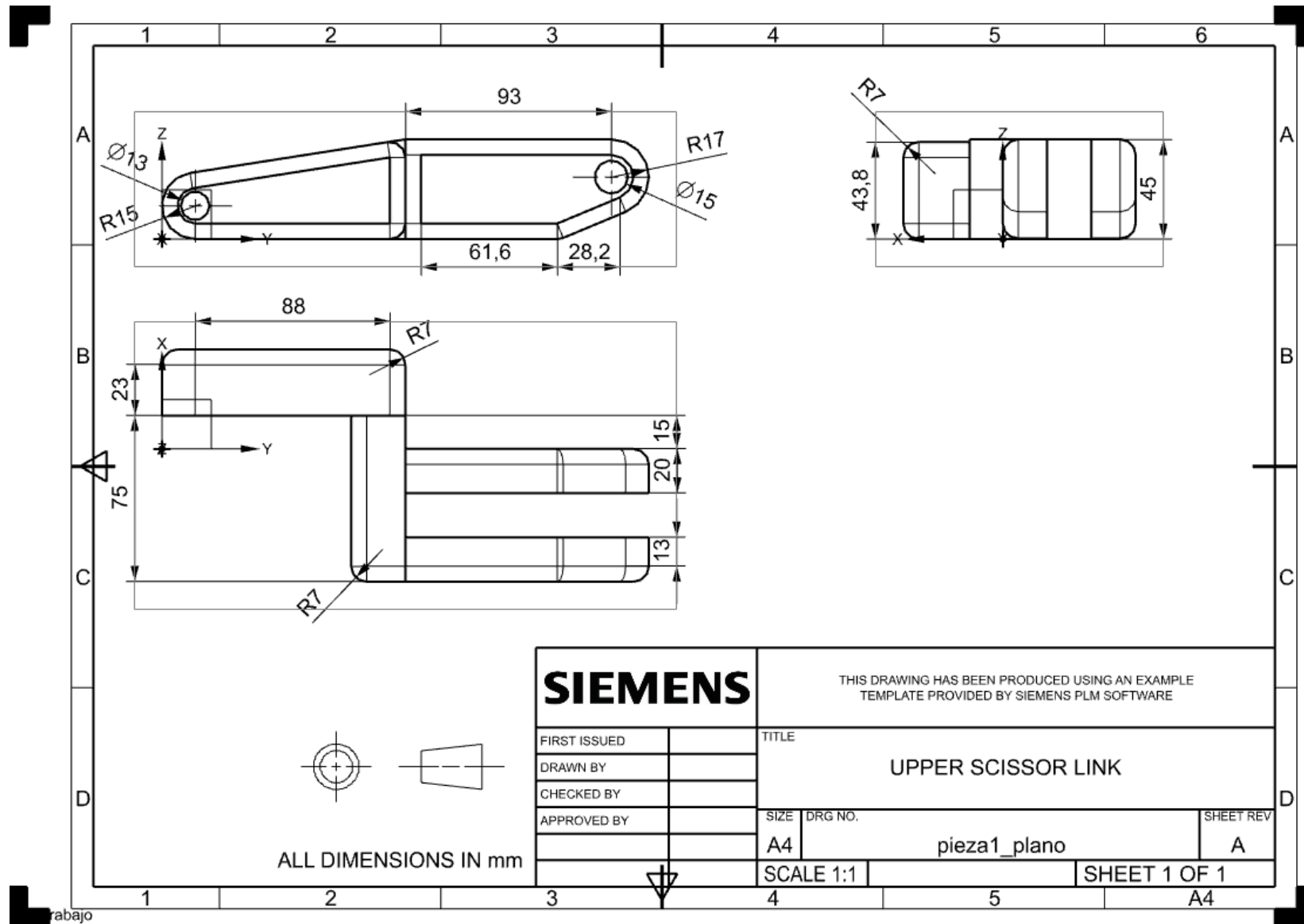


Figura 3.6: Plano de la pieza original.

3.1.3. Estimación de las solicitaciones

Esta parte también posee una dificultad realmente alta, por una parte, las fuerzas que actúan sobre un componente en particular y, específicamente, sobre la pieza superior del scissor link, son prácticamente imposibles de encontrar en la bibliografía, pues, como mucho, en algunos estudios en los que se realizan elementos finitos sobre componentes más genéricos o grandes, como el cabezal del rotor principal, se indican algunas fuerzas que soportan los componentes de ese estudio en particular. Por otra parte, estas solicitaciones dependen, todavía más que las dimensiones del componente si cabe, del modelo de helicóptero en el que va instalado. Como se trata de una hipotética aplicación, es decir, no se está trabajando con ningún modelo de helicóptero en específico (aunque sí con aproximaciones a uno real) y en ningún estudio o libro se indica explícitamente el valor de las fuerzas que actúan sobre el scissor link, el problema resulta el mismo que en el caso anterior. Ante ello, el primer paso será necesario observar qué fuerzas actúan sobre el rotor de un helicóptero y algunos de sus componentes con el fin de determinar, posteriormente, cuáles de esas solicitaciones son transmitidas a la pieza de estudio, de esta manera se solucionará el segundo de los dos problemas mencionados.

El rotor principal de un helicóptero es el componente encargado de hacer que el helicóptero vuele mediante la generación de tracción, que se consigue mediante la aplicación de una velocidad angular a las palas para que roten alrededor del eje vertical del rotor y puedan generar así la sustentación necesaria para contrarrestar el peso del helicóptero. Debido a esta alta velocidad angular, se genera una fuerza centrífuga considerable en los componentes del sistema rotor haciendo necesario que estos estén asegurados correctamente. Al igual que en los aviones, tanto la estructura como los componentes del helicóptero y del sistema rotor generan una resistencia aerodinámica cuando se está desplazando la aeronave. También se generan momentos sobre el propio helicóptero, como el momento de guiñada por la rotación de la estructura del rotor que hace necesaria la incorporación de sistemas capaces de compensar dicho momento de reacción como es el caso de un rotor antipar, sistemas NOTAR o rotores en tándem entre otros. Finalmente, aparecen también los efectos de la gravedad (incorporados a través del peso), fuerza coriolis, inercias y torsión de componentes, además de vibraciones que son amortiguadas por los amortiguadores en el rotor conectados al plato de distribución.

De todas las fuerzas mencionadas, no todas aparecen en el scissor link, de manera que las fuerzas que se estima que pueden aparecer en este componente son las siguientes:

- Fuerza de Tracción.
- Fuerza centrífuga.
- Resistencia aerodinámica.
- Gravedad.

Lo único que queda es determinar qué valores pueden tener dichas fuerzas. Para tratar de dar una respuesta, se realizará una búsqueda de estudios sobre componentes del rotor para ver con qué valores se trabaja y poder así estimar el orden de magnitud de las fuerzas que soporta la pieza de estudio. Además, se propondrá un helicóptero de ejemplo para determinar ciertos parámetros que serán necesarios tanto para este apartado como para los siguientes.

El helicóptero seleccionado es el Bell 212 producido por BELL Helicopters mostrado en la Figura 3.7, un helicóptero de transporte de tamaño medio que se puede considerar aplicable al caso de estudio, tanto por su misión como por su tamaño. De este modelo, se tomarán dos datos esenciales, el MTOW para determinar la fuerza de empuje que tiene que generar el rotor para mantener el helicóptero en vuelo a punto fijo y la velocidad angular de giro del mismo. Estos datos junto con algunos adicionales, para comprender mejor este helicóptero, se muestran en la Tabla 3.2 [4]

MTOW (kg)	Ω (°/s)	D (m)	Vmax (km/h)
5080	1764	14.63	240

Tabla 3.2: Características del Bell 212.



Figura 3.7: Imagen del Bell 212. [5]

Finalmente, de las fuerzas mencionadas y tras realizar una búsqueda bibliográfica y comparar con los datos del helicóptero escogido como ejemplo, se estima que las fuerzas que soporta la parte superior del scissor link son las mostradas en la Tabla 3.3, en Newtons:

Tracción	Centrífuga	Resistencia	Gravedad (m/s^2)
49784	6174	50	9.8

Tabla 3.3: Fuerzas soportadas por el componente.

De esta conclusión, se puede observar que las principales fuerzas que tiene que soportar la pieza de estudio serán la fuerza de tracción en un extremo provocado por la fuerza de sustentación y la fuerza centrífuga consecuencia de está girando a muy altas revoluciones por minuto, especialmente en su extremo más alejado del eje del rotor. A continuación, habrá que establecer las condiciones de contorno para que tanto los análisis de elementos finitos como para la optimización topológica. Para ello, nuevamente será necesario observar su posición y comportamiento en vuelo. Como se ha mostrado en las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5, la pieza se encuentra unida al rotor y a la otra mitad del scissor link a través de cilindros que pasan por sus orificios. Por tanto, estos orificios no se podrán desplazar, pero no estarán fijos, ya que sí poseen la capacidad de rotar respecto su eje centrar para adaptarse a los movimientos del plato de distribución.

3.1.4. Elección del material

Los componentes de los helicópteros suelen ser fabricados con aleaciones de aluminio junto con acero o titanio debido a sus propiedades de resistencia y peso, materiales que, cabe recordar, se utilizan en la fabricación aditiva. En el caso que atañe a este trabajo, el material viene impuesto por la empresa AIDIMME, de manera que el material empleado en el proceso DED encargado de conformar la pieza final, será la aleación de Titanio 64 para máquinas Meltio, Ti-6Al-4V. Se trata de una aleación ampliamente usada debido a que posee una serie de propiedades muy beneficiosas como una buena resistencia, baja densidad y resistencia a la corrosión. Su excelente ratio resistencia-peso, hace de esta aleación una buena opción para aquellas aplicaciones en las que se busque minimizar el peso del componente, como es este caso. Su ámbito de aplicación es bastante variado, abarcado el sector aeroespacial, la marina, la industria química y la automoción. En la Tabla 3.4 se expone su composición química y el porcentaje en peso de cada elemento.

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Bal.	5.5	3.5	0.4	0.08	0.05	0.015	0.2

Tabla 3.4: Composición Ti-6Al-4V. [10]

Posee un punto de fusión de 1674°C y, de acuerdo a la técnica AM que se va a utilizar, será suministrado en forma de cable de 1mm de diámetro con una densidad de $4.4\text{ g}/\text{cm}^3$ [10]. Adicionalmente, en la hoja de especificaciones de Meltio, se recomienda un tratamiento térmico después de la impresión 3D con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, aumentando su resistencia, haciéndola más dúctil y más resistente a fatiga. Como resultado, se consigue hacer un material idóneo para aplicaciones en las que va a estar sometida a altas tensiones. Adicionalmente, este tratamiento térmico ayuda a aliviar las tensiones residuales y a refinar la microestructura de la aleación, mejorando su tenacidad y resistencia a rotura por crecimiento de grieta. Además de tratamiento

térmico, también se puede endurecer por envejecimiento mediante diferentes métodos, generalmente, calentando hasta 920°C y manteniendo la temperatura para enfriarla posteriormente.

Si se observa la microestructura de la aleación, se puede ver que se compone de granos aciculares de martensita incrustados en fase beta. La forma columnar de los granos se extiende dependiendo de la dirección de fabricación debido al crecimiento epitaxial de la fase beta original. Esto quiere decir que, durante el proceso de fabricación, dependiendo del eje z de fabricación que se escoja, es decir, el eje al rededor del cual se va a ir conformando la pieza, los granos de la fase beta, crecen con una forma predefinida y coherente con la fase beta original siguiendo una forma columnar. A continuación, se muestran varias imágenes de esta microestructura en la Figura 3.8.

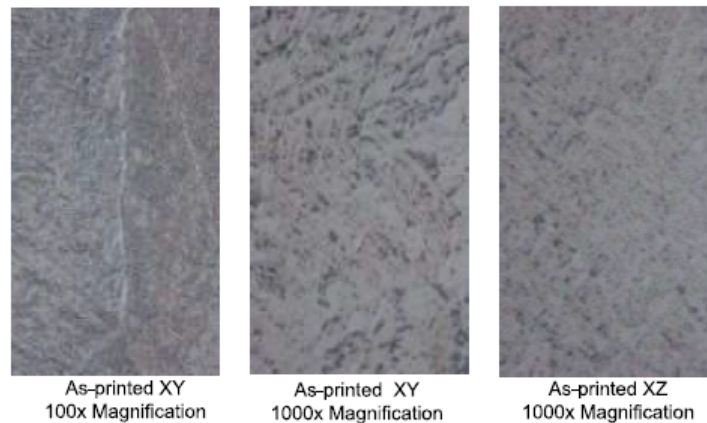


Figura 3.8: Microestructura del Ti64 en diferentes planos de fabricación. [10]

En cuanto a sus propiedades mecánicas, la experiencia ha mostrado que las muestras impresas con la máquina de impresión 3D Meltio posee las mismas cualidades que una muestra fabricada por métodos convencionales, consiguiendo bajas desviaciones y propiedades prácticamente isotrópicas después del tratamiento térmico. A continuación, en la Tabla 3.5, se muestran algunas de sus propiedades mecánicas según cómo ha sido trabajada la aleación, en el caso de la Meltio, las tres primeras propiedades se han medido según las normativa de ensayos ISO 6892-1 y la dureza según la norma ISO 6507-1 [10].

	Prop. Fundición	Prop. Forja	Meltio plano XY (Envejecida)	Meltio plano XZ (Envejecida)
Resist. Máxima Tracción [MPa]	860	930	802 ±7	788 ±12
Límite Elástico [MPa]	758	860	727 ±17	693 ±16
Deformación [%]	8	10	7 ±1	9 ±1
Dureza [HV-30] [%]	342	349	311	303

Tabla 3.5: Propiedades mecánicas Ti-6Al-4V [10]

Por otra parte, también conviene observar su resistencia a fatiga, pues durante su misión, el material va a estar expuesto a ciclos repetidos durante un tiempo prolongado. A continuación, en la Figura 3.9, se muestra la resistencia a fatiga de la aleación de Titanio llevado a cabo por la empresa Meltio (a la cuál pertenece la máquina de impresión), sobre la que se han realizado dos tratamientos térmicos distintos: envejecimiento y prensado isostático en caliente. El envejecimiento es un proceso de endurecimiento del material que consta de 3 fases fundamentales: el recocido, el temple y el envejecimiento. En términos generales, se calienta a muy alta temperatura el material para homogeneizar la microestructura para después enfriarlo rápidamente y manteniéndolo a temperatura ambiente o calentándolo de nuevo a una temperatura menor para consolidar la microestructura resultante. Por otra parte, el tratamiento térmico por prensado isostático en caliente se centrar en eliminar la porosidad del material y homogeneizar su microestructura mediante la aplicación de una presión igual en todas direcciones (isostática) a una temperatura elevada. La diferencia que se observa en el comportamiento entre ambos procesos de tratamiento térmico es la presencia de porosidades residuales en el envejecimiento, ya que este no es un proceso específicamente hecho para eliminar porosidades. Este ensayo ha sido realizado de acuerdo con la norma ISO 1143 [10].

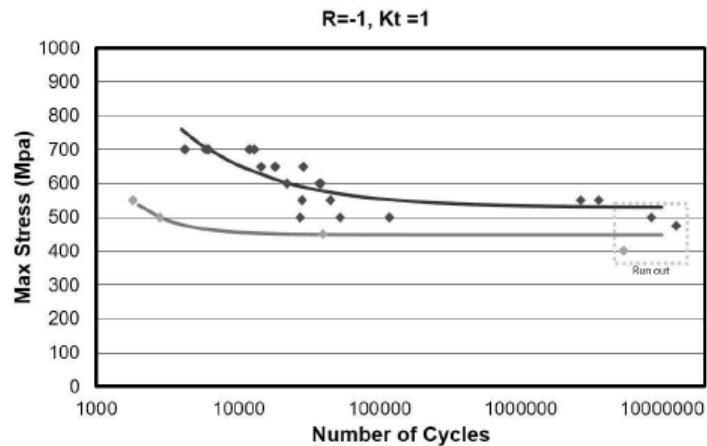


Figura 3.9: Resistencia a fatiga del Ti-6Al-4V. [10]

En la figura anterior se observa el comportamiento típico de un material a ensayo por fatiga. Se puede observar cómo, mediante el envejecimiento, se obtiene una tensión máxima menor para cualquier número de ciclos, siendo la máxima tensión que puede soportar de 450 MPa aproximadamente en el caso del envejecimiento y de 530 MPa aproximadamente en el caso del prensado isostático en caliente. Cabe recordar ahora lo ya mencionado anteriormente, con el prensado isostático en caliente se eliminan las porosidades del material y ayuda a homogeneizar la estructura consiguiendo una mejor resistencia a fatiga. Sin embargo, mediante el envejecimiento, se consigue endurecer el material mejorando sus propiedades mecánicas.

Finalmente, hay que tener en cuenta que el Titanio tiene una alta afinidad con el oxígeno, provocando que estos dos se asocien dando lugar a fragilización del material y la pérdida de propiedades mecánicas como pérdida de resistencia al desgaste, a corrosión y fatiga. Es por ello que se deberá trabajar con una atmósfera controlada, como ya se ha mencionado anteriormente que ocurría con algunos procesos AM.

3.2. Modelado de la pieza base

El siguiente paso en el proceso de diseño es el modelado, es decir, el diseño 3D de la pieza de la que se parte, expuesta anteriormente. Para ello, se empleará el software NX de SIEMENS utilizando las dimensiones expuestas en el apartado anterior, haciendo uso del módulo de modelado de NX.

La base de todo proceso de modelado es el uso de croquis. En ellos, se escoge un plano del espacio tridimensional sobre el que se está trabajando, ya sea uno de los predefinidos como Derecho, En Planta o Frente, o definido por el propio usuario mediante planos de datum para así poder trabajar en el lugar y orientación deseados. A continuación, se dispone de las herramientas de dibujo necesarias para crear la geometría 2D deseada. Posteriormente, mediante la herramienta extrudir, se puede otorgar un volumen a dicho croquis si ha sido creado correctamente. Además, existen multitud de opciones como simetría, redondeo de arista, unir, etc... que permiten retocar el diseño para adaptarlo lo mejor posible a lo deseado. Todas estas funcionalidades se muestran en las Figuras 3.10 y 3.11.

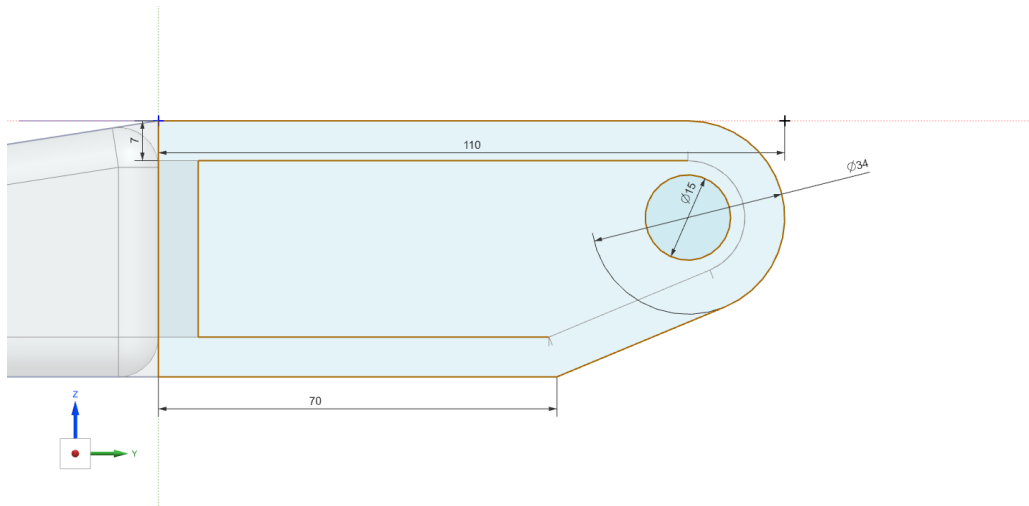


Figura 3.10: Croquis de la parte posterior.

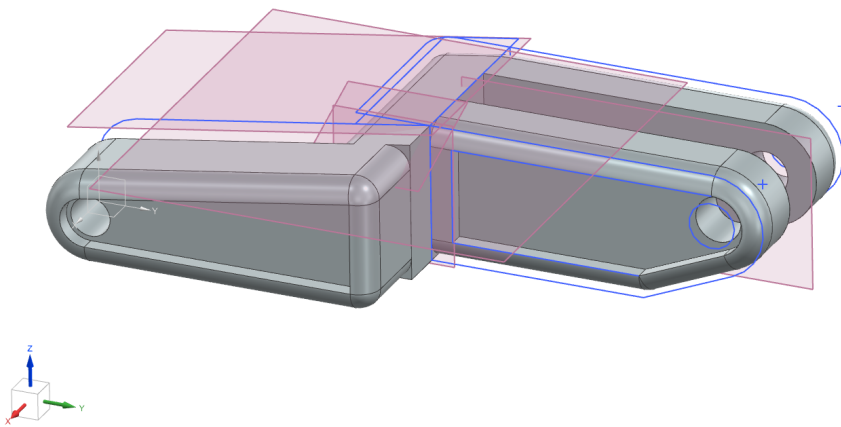


Figura 3.11: Modelado de la pieza original.

Se puede apreciar en este diseño inicial, si se compara con el diseño conceptual de la pieza, que se ha omitido el orificio circular de la parte central. Esto es debido a que, teniendo en cuenta la aplicación que se ha explicado anteriormente y la manera en la que va a trabajar la pieza, se ha considerado que dicho orificio no era necesario. De esta manera, se obtiene una pieza maciza con solamente los orificios de los extremos, que es por donde va a ir enganchada al sistema, por la parte anterior (izquierda), a la otra mitad del scissor link y, por la parte posterior (derecha), al mástil del rotor. Finalmente, tras realizar algún redondeo más con fines estéticos y asignar el material, se muestra el resultado final de este primer modelado en la Figura 3.12.

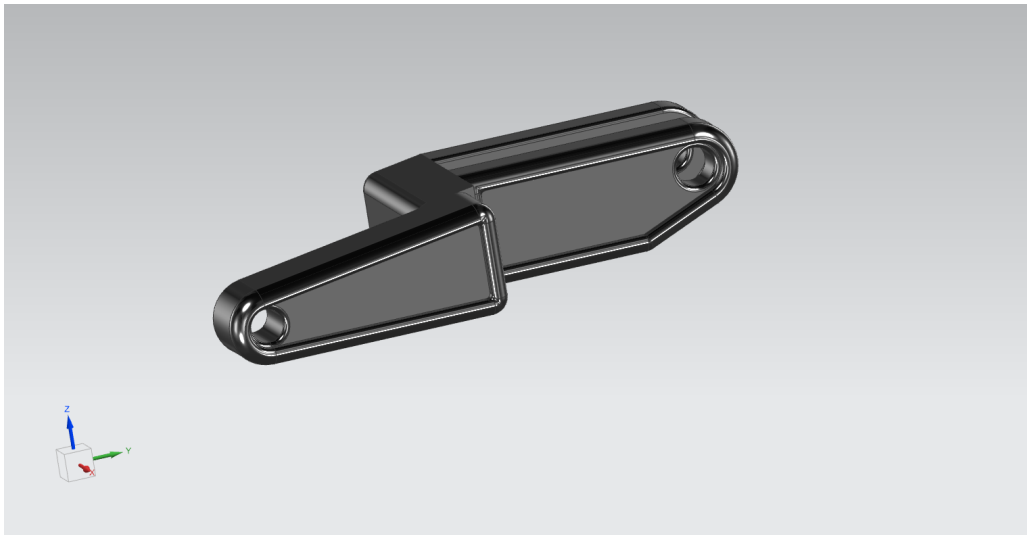


Figura 3.12: Resultado final de la pieza base.

Para recapitular, se ha conseguido obtener un diseño 3D de la pieza que va a ser objeto de estudio de este trabajo. Se han determinado sus dimensiones, su misión junto con el material del que se compone, y en función de esa información, se ha conseguido realizar un modelo 3D de la pieza que se buscaba a partir de un diseño conceptual, adaptándolo a los requerimientos de este estudio.

3.3. Análisis de elementos finitos del caso inicial

A continuación, se realizará un análisis mediante el método de elementos finitos (FEM) a dicha pieza que se acaba de modelar con el fin de observar cómo se comporta al ser sometida a las solicitaciones que se han comentado anteriormente. Además, se usará este primer análisis de elementos finitos para comparar con los resultados que se obtendrán del comportamiento de la pieza optimizada y adaptada a la fabricación DED. Al igual que en el modelado, y en lo que resta de estudio, se utilizará el software NX de SIEMENS para realizar este análisis, concretamente el solver de Nastran incorporado, principalmente porque es el programa sobre el que se está trabajando y, por ello, resulta mucho más sencillo que exportar el archivo a otros programas de cálculo estructural como ANSYS o Nastran.

Para poner en contexto al lector, en caso de que sea desconocedor/a de este tipo de programas, se dará una breve explicación de en qué consiste un cálculo mediante elementos finitos.

El análisis mediante elementos finitos (FEA) es una técnica de simulación computacional utilizado en diversos campos de la ingeniería, especialmente en las industrias aeronáutica, automotriz, electrónica, maquinaria industrial, marina y productos de consumo. El objetivo principal de este tipo de estudio es observar el comportamiento de un producto, previamente modelado, ante una serie de solicitaciones tales como fuerzas, vibraciones, calor, flujo de fluidos u otros efectos físicos que se puedan dar. Para ello, se establecen una serie de puntos sobre el producto llamados nodos, a los que se conectan los elementos finitos en los que se descompone el producto estudiado y que conforman la malla. Esta serie de elementos contienen toda la información sobre el material y la estructura del modelo, de modo que determinan la reacción de este. Además, la calidad de los resultados dependerá de la densidad de esta malla. Para acabar, existen numerosos programas que incluyen cálculo estructural mediante elementos finitos como ANSYS, Autodesk o Nastran, además del que se va a utilizar en este caso, NX de SIEMENS.

Avanzando hacia el caso de estudio de este trabajo, lo primero de todo será, como se ha comentado, realizar una malla para el modelo. Para este caso, se ha elegido un tamaño de elemento de 2 mm y de forma tetraédrica ya que al no poseer secciones extremadamente complejas de analizar, se considera una forma de elemento lo suficientemente aceptable. En la Figura 3.13 se muestra el resultado de esta malla.

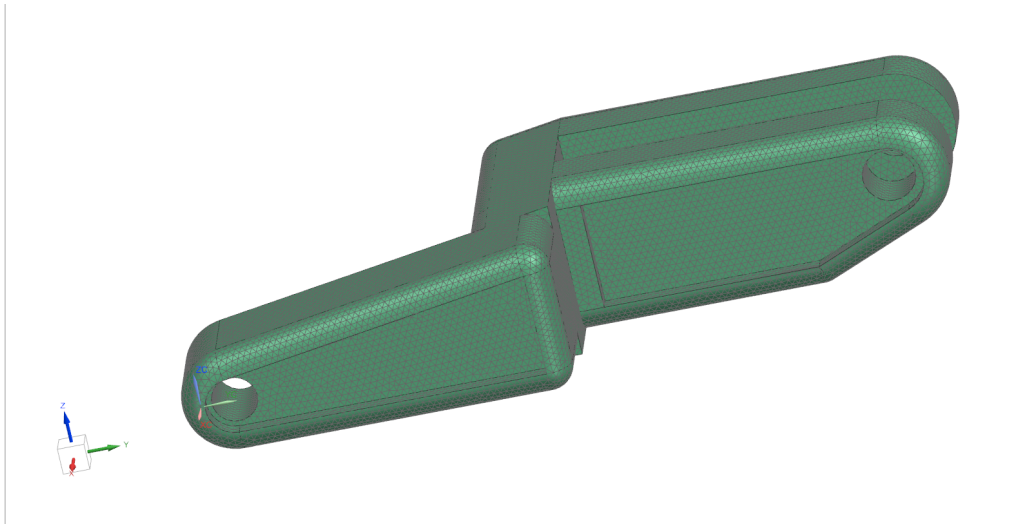


Figura 3.13: Pieza original con una malla de 2 mm.

El siguiente paso será establecer las restricciones y fuerzas a las que está sometida la pieza.

Comenzando con las restricciones, NX ofrece un amplio abanico de opciones en cuanto a restricciones, desde la capacidad de definir todos los grados de libertad por parte del usuario, hasta restricciones de sólo rotación, sólo traslación, restricción fija, de deslizamiento, etc... En este caso, se ha optado por escoger la restricción de únicamente rotación de la cara seleccionada. En dicha opción, se puede establecer diferentes grados de libertad: incremento radial, rotación axial e incremento axial, dejando todas fijas excepto la rotación axial. Como se ha comentado en la sección anterior al asignar una misión y una localización física de la pieza, se ha visto que estaba unida por los orificios circulares que posee, sin la capacidad de desplazarse pero pudiendo rotar alrededor del eje axial de los mismos.

Una vez definidas las restricciones, es hora de asignar las fuerzas, cuyos valores ya han sido mencionados en la Tabla 3.3, de manera que lo único que resta es seleccionar el tipo de fuerza de entre aquellas que ofrece NX y la cara sobre la que se va a aplicar. Empezando con la fuerza centrífuga, esta irá sobre las caras superiores a lo largo de la pieza incluyendo la cara del extremo anterior. La fuerza de tracción irá aplicada exclusivamente en las superficies cilíndricas de las dos partes unidas al rotor. La fuerza de resistencia aerodinámica irá aplicada sobre las caras laterales correspondientes. De todos los tipos de fuerzas que ofrece NX, se seleccionará el tipo "Fuerza.^a todas las anteriores, ya que ello permite fijar la magnitud de la fuerza y el sentido de esta. Además, se indica al programa que existe una velocidad angular constante (nula aceleración angular) y que se está trabajando bajo efectos de la gravedad.

Finalmente, tras definir todos estos parámetros, el modelo antes de ejecutar la simulación queda como se muestra en la Figura 3.14.

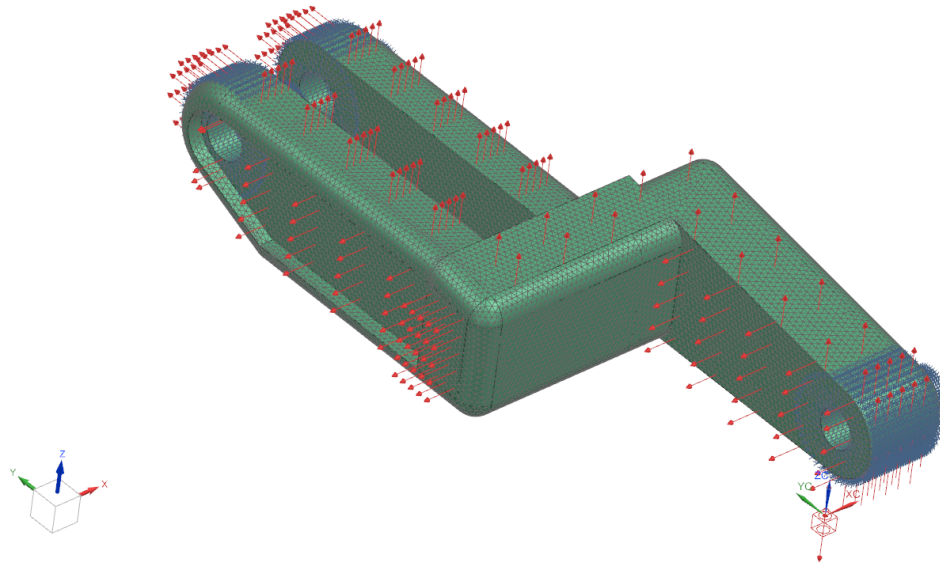


Figura 3.14: Fuerzas y restricciones del modelo.

A continuación, sólo queda empezar a resolver el caso planteado. Después de que el programa acabe de iterar y sume las soluciones de cada uno de los elementos finitos, otorga varias soluciones estructurales del caso de estudio que se comentarán a continuación.

Primero de todo se obtiene el desplazamiento que sufre cada uno de los elementos que conforman la malla, mostrado en la Figura 3.15. Este desplazamiento se espera que sea bastante pequeño, ya no solo por el material que se está utilizando, sino también para asegurar un comportamiento seguro de la pieza durante su funcionamiento.

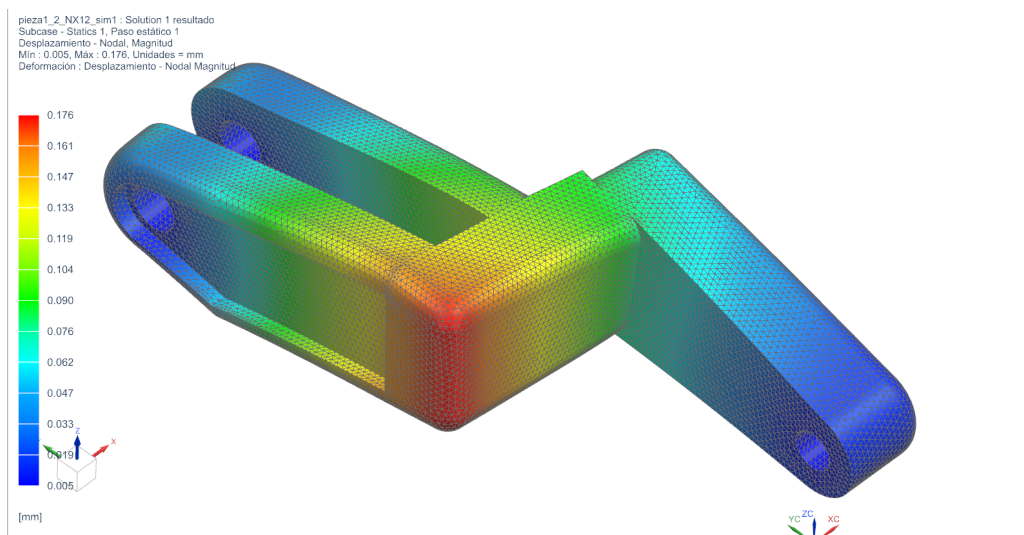


Figura 3.15: distribución del desplazamiento.

Lo primero que se puede observar es que, debido a las solicitaciones, la pieza tiende a torsionarse, especialmente sobre la unión entre las dos mitades, producto de la actuación de la fuerza centrífuga, siendo el mayor desplazamiento en la zona central de la pieza así como en su unión delantera al rotor, donde se aplica la fuerza de tracción, alcanzando su máximo en la esquina de la parte central. También se puede ver cómo la pieza torsiona al tener los dos extremos fijos sus respectivos desplazamientos. Sin embargo, observando los valores obtenidos en la escala cromática, se muestra que estos desplazamientos son muy pequeños, llegando hasta a ser despreciables ya que son incluso menores a 1 mm, lo que afirma la robustez de la pieza original.

Otro resultado interesante de analizar es el esfuerzo de Von Mises. Esta tensión permite observar en qué

zonas de la pieza existe más carga, con lo que se podrán identificar las zonas críticas. Además, a partir de sus valores a lo largo del modelo, se podrá observar si existe riesgo de rotura o deformación plástica, a partir de los datos del Titanio 64 expuestos anteriormente. Los resultados de este parámetro se muestran en la Figura 3.16 y más en detalle en la Figura 3.17.

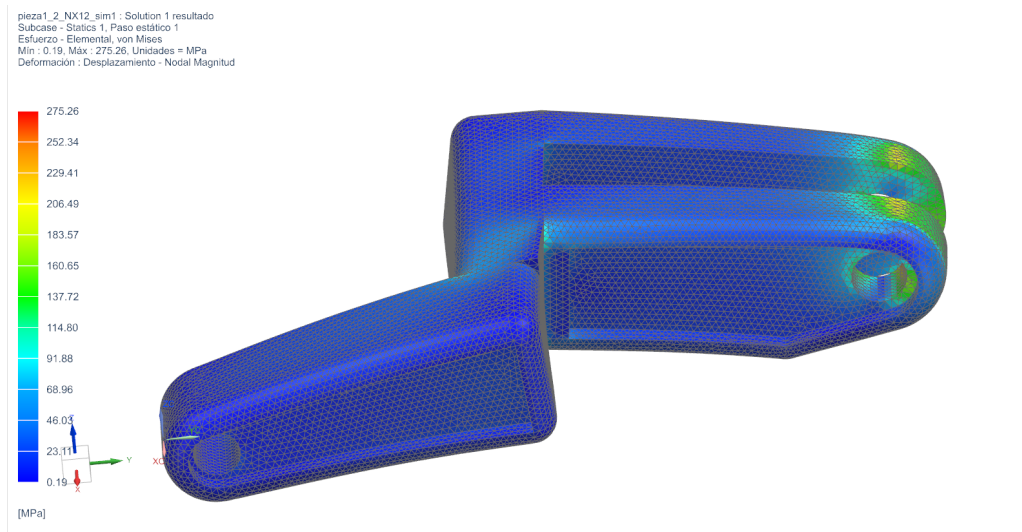


Figura 3.16: Esfuerzo de Von Mises.

Se puede observar que, en este caso, las zonas que soportan mayor esfuerzo son aquellas donde la pieza está unida al rotor. Parece lógico ya que son las zonas donde se aplica la fuerza de mayor magnitud. En la siguiente imagen se puede observar mejor dicha zona.

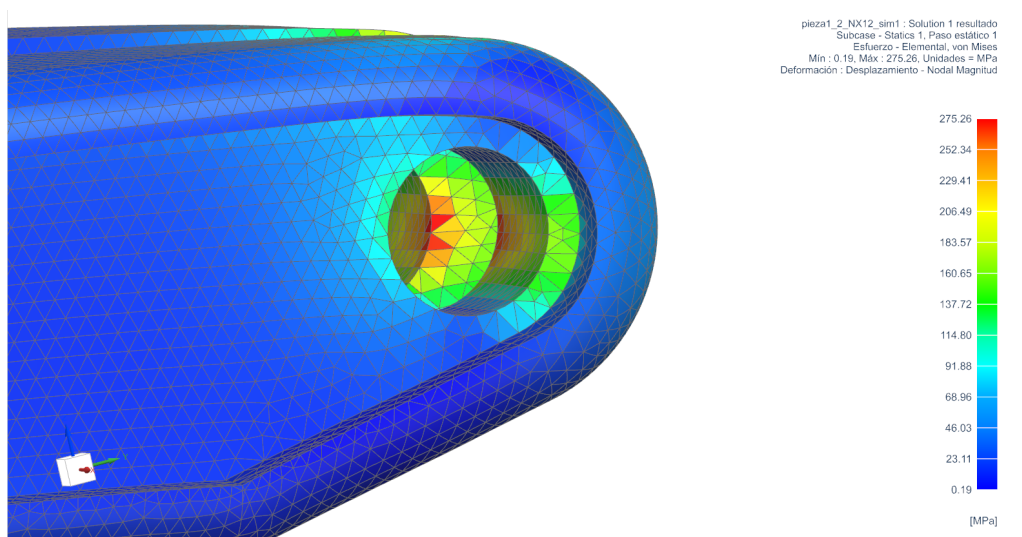


Figura 3.17: Detalle del esfuerzo de Von Mises.

Observando los valores obtenidos, se concluye que los esfuerzos no son suficientes para romper la pieza debido a que el valor máximo de tensión obtenido en el estudio, unos 275 MPa en el enganche, es muy inferior a la tensión máxima a tracción, incluso al límite elástico, con lo que la pieza no se deforma permanentemente, volviendo a su posición inicial una vez son retiradas las fuerzas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a medida que el helicóptero vaya haciendo vuelos, se estará sometiendo a fatiga a la pieza, por lo que habrá que tener en cuenta cual es la tensión última que es capaz de soportar, que además es menor a las anteriores. Observando nuevamente los resultados mostrados comparando con los datos del material, se puede ver que la tensión máxima obtenida en aproximadamente unos 200 MPa menor a la tensión máxima de fatiga. En cuanto a la pieza en general, la mayor parte de ella está sometida a tensiones muy pequeñas, alcanzándose valores de entre 200 y 137 MPa en las zonas más afectadas, siendo de en torno a 100 MPa en las zonas más afectadas de la parte central. Con todo ello, se corrobora el buen comportamiento de la pieza para la misión que le ha sido adjudicada.

Por último, se puede mirar también la fuerza de reacción obtenida con el fin de comprobar si las solicitaciones impuestas generan una reacción excesiva que pueda perjudicar la actuación de la pieza. Estas fuerzas de reacción, actuarán sobre las restricciones establecidas y serán fundamentales para determinar si la pieza está en equilibrio.

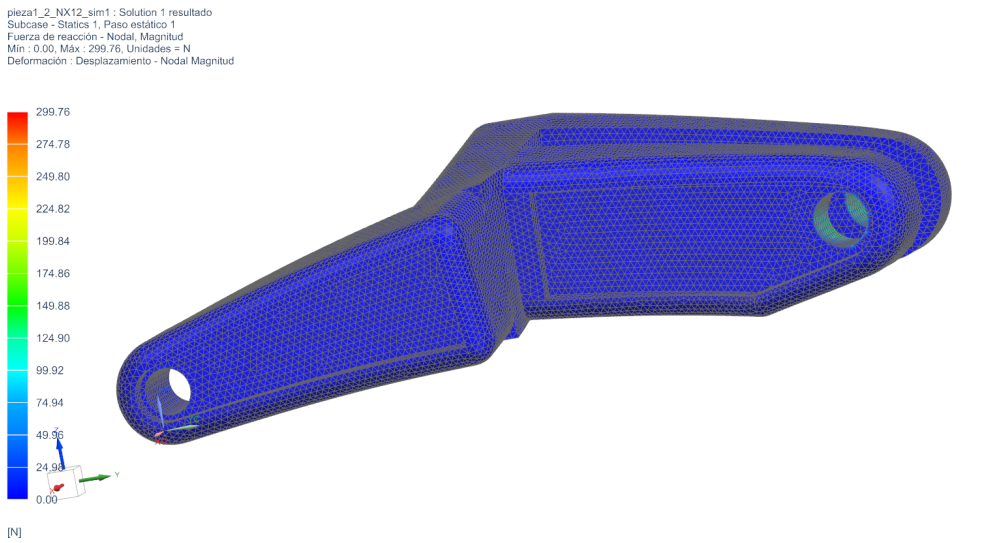


Figura 3.18: Fuerza de reacción.

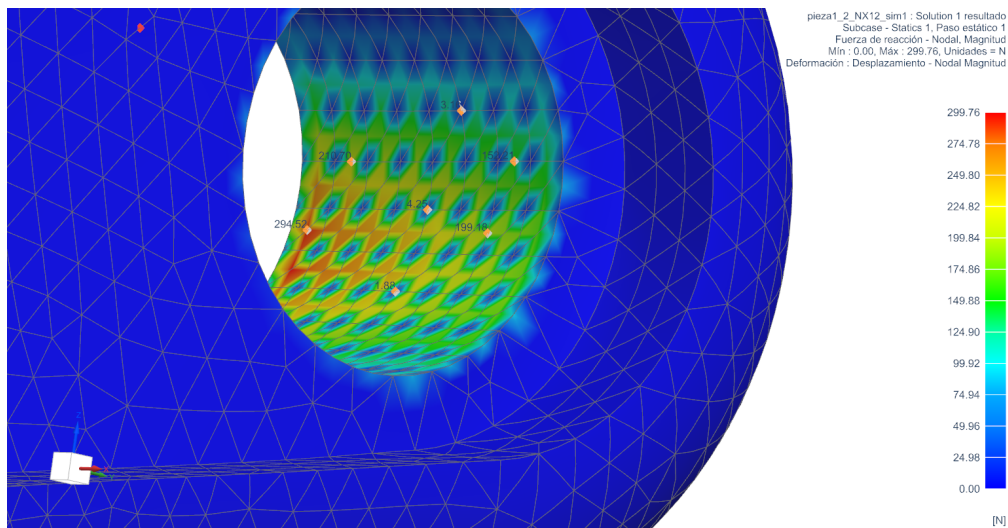


Figura 3.19: Detalle de la fuerza de reacción

En la Figura 3.18 se puede observar la distribución de la fuerza de reacción a lo largo de la pieza. Como se ha comentado, esta fuerza se localiza en los soportes para asegurar el equilibrio estático de la pieza. Haciendo un zoom en la parte delantera, se puede observar que, en la carga donde está enganchada al rotor, se encuentra la mayor distribución de la fuerza de reacción, alcanzándose aquí su máximo valor, de 300 N aproximadamente, como se puede apreciar debido a los valores de los elementos de dicha zona mostrados en la Figura 3.19. Esto es esperable ya que es en esta zona donde se produce más concentración de fuerzas, encontrándose aplicadas en esta área la fuerza de tracción y la centrífuga. El resto de la fuerza se distribuye a lo largo del resto del cuerpo con unos valores mucho menores que la zona de concentración de las fuerzas, siendo valores muy pequeños o nulos.

Cabe recalcar que, en un análisis de elementos finitos, el resultado depende fuertemente de la malla que se ha establecido en el modelo ya que es la que contiene los elementos sobre los que se realizan los cálculos. Por ello, se ha de conseguir la independencia de malla, es decir, trabajar con una malla lo suficientemente pequeña como para que sus resultados sean lo suficientemente fiables. Para lograrlo, se ha de ir realizando el estudio con diferentes mallas, cada vez con un tamaño de elemento menor, hasta que los resultados no varíen significativamente respecto a la anterior malla. Esto se ha ido realizando en este trabajo, siendo la malla mostrada aquella que se ha considerado lo suficientemente precisa, el resto de estudios se pueden ver en los Anexos correspondientes.

Cabe destacar que, la reducción del tamaño de elemento de malla, viene limitado por la capacidad computacional del equipo con el que se esté trabajando, siendo el tamaño más pequeño con el que se ha podido trabajar 2mm.

Para concluir este apartado, se ha obtenido el comportamiento de la pieza bajo las condiciones de trabajo supuestas anteriormente. A partir de los resultados se ha podido comprobar cómo el modelo inicial presenta un buen comportamiento ante estas fuerzas y restricciones. Sin embargo, se va a buscar mantener este buen comportamiento pero reduciendo la masa considerablemente, ello implicará elaborar un diseño más complejo y, en consecuencia una fabricación más complicada, pero gracias a la fabricación aditiva este último problema se podrá solventar. En cuanto al nuevo diseño, se deberá realizar primero un nuevo estudio para ver cómo se ha de realizar.

3.4. Optimización topológica

Para realizar este nuevo diseño hay que partir de una base sólida, pues no se puede rehacer un diseño eliminando masa allí donde parezca oportuno sin tener en cuenta qué zonas son las más importantes. Por suerte, existe un función en los software de diseño que nos permite obtener un nuevo diseño en función de las solicitudes. Esta función recibe el nombre de optimización topológica.

En cada proceso de diseño la optimización es una parte fundamental del proceso. Existen numerosos tipos de optimización como la optimización de tamaño, que permite ajustar el tamaño de los modelos perimétricos. Se trata de un procedimiento muy general que se puede aplicar casi a cualquier problema pero que se vuelve insuficiente si el caso de estudio cuenta con un elevado número de parámetros. Por otra parte, la optimización topológica puede indicar al diseñador dónde conviene eliminar o añadir masa para optimizar su desempeño. No obstante, este tipo de optimización está limitado en cuanto a tipos de restricciones y objetivos de optimización, no siendo tan general como la optimización del tamaño.

Como se verá más adelante, la optimización topológica produce geometrías orgánicas complejas que, dependiendo del proceso de fabricación, puede tener ciertas limitaciones en cuanto a su fabricación directa. Es por ello que también puede servir de base para realizar un rediseño de la geometría original. Además, el número de programas que incluyen esta funcionalidad cada vez es mayor. La optimización topológica tiene como principal objetivo minimizar o redistribuir el material dentro del espacio de diseño en base a unas solicitudes y objetivos impuestos previamente. Con ello, no solo se reduce el peso del componente fabricado, aspecto muy importante en industrias como la aeroespacial, sino también puede acortar el tiempo de impresión.

La optimización topológica consta de una serie de pasos que han de respetar para conseguir la optimización deseada:

1. Definir el espacio de diseño.
2. Establecer los objetivos.
3. Definir cuerpos de construcción.
4. Definir las restricciones del modelo.
5. Definir las fuerzas.
6. Resolver.

A continuación, se describirá cada uno de los pasos para una mejor comprensión de este proceso.

3.4.1. Definir el espacio de diseño

El espacio de diseño es el volumen en el que el algoritmo de optimización topológica va a redistribuir el material, para ello, es necesario que dicho espacio contenga el máximo volumen de la pieza posible y que así dicho algoritmo encuentre la mejor optimización. Además, para mejor la calidad de los resultados, es altamente recomendable simplificar lo máximo posible el modelo inicial, esto es, eliminar detalles prescindibles como redondeos o elementos decorativos. Finalmente, para encontrar el espacio óptimo se necesitarán realizar numerosas iteraciones.

En la Figura 1.16 se puede observar cómo existen una gran cantidad de redondeos que se pueden eliminar con el fin de simplificar la geometrías, además, existen varias hendiduras que son prescindibles también y no afectan

a la geometría de la pieza. Por otra parte, se deben conservar los 3 orificios circulares por los que va enganchada la pieza en ambos extremos, para ello, deberán ser definidos posteriormente como cuerpos de construcción, es decir, espacios que se deben dejar tal y como están en el diseño inicial. Para que después se pueda seleccionar que este volumen permanezca intacto, es necesario crear unos cilindros que los atraviesen. La longitud de los mismos es irrelevante, simplemente se han de posicionar en los huecos correspondientes. Por último, para que el programa identifique la pieza como un único cuerpo, es necesario unir todos los volúmenes previamente en el apartado de modelado, antes de comenzar con el apartado de la optimización topológica. De modo contrario, el programa detectaría que existen una serie de cuerpos en contacto entre sí que, además, necesitan tener dicha unión definida, dando lugar a una interpretación errónea del modelo.

Tras realizar todas estas modificaciones, el modelo que se va a introducir en el módulo de optimización topológica se muestra en la Figura 3.20, donde el espacio de diseño seleccionado será la zona gris, sin incluir los cilindros verdes ya que estos no forman parte de modelo original.

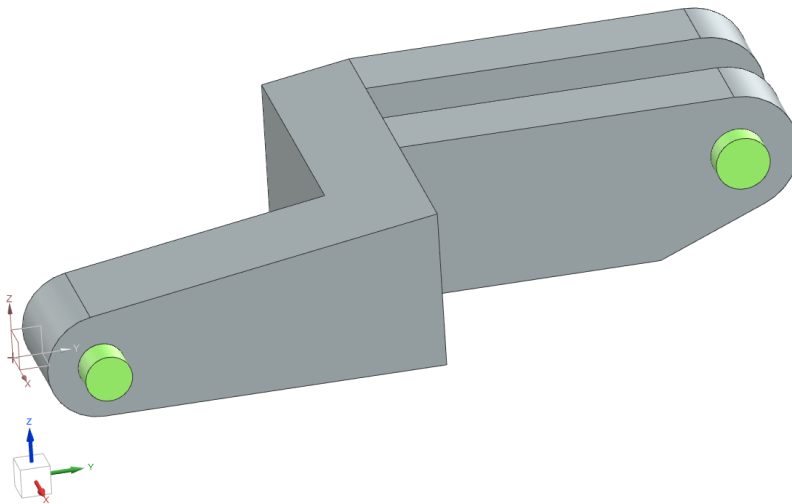


Figura 3.20: Espacio de diseño.

Finalmente, se selecciona el material del modelo en este paso, si no se ha hecho anteriormente, y se pasa a la siguiente fase.

3.4.2. Establecer los objetivos

El resultado de la optimización viene determinado por el objetivo que se le imponga. En la optimización topológica existen diversos objetivos, cada uno con diversas restricciones asociadas. Estas restricciones deben entenderse como una condición que ha de tener la solución proporcionada por la optimización topológica, como qué porcentaje de volumen ha de retenerse o cuál debe ser la máxima tensión que soporte el modelo final. La optimización topológica de NX ofrece tres objetivos para la optimización: minimizar la masa, minimizar el volumen o maximizar la rigidez. Como en este caso se busca conseguir una pieza más ligera, se selecciona *minimizar la masa* como objetivo de la optimización.

A continuación hay que seleccionar qué restricción va a tener el diseño. Al tomar una decisión en cuanto a objetivo, el programa restringe el número de opciones a la hora de escoger una restricción de la optimización inhabilitando aquellas que resulten incompatibles con el objetivo establecido. En este caso, se opta por establecer un límite de esfuerzo máximo, concretamente, que la tensión de rotura sea un 90 % del máximo esfuerzo, esto otorga a la pieza un margen de seguridad del 10 %.

En este paso, también se puede establecer el tamaño de la resolución, orientándola hacia un tipo más fino o más basto. En este caso, se ha escogido por dejarlo ligeramente orientado a basto para tener una solución más gruesa y poder observar mejor la forma final. También se podría fijar el tamaño del voxel si se desase especificar más. Un voxel es el elemento volumétrico unitario que compone un modelo 3D, se podría definir como "un píxel con volumen".

Cabe destacar también que en algunos programas existe la opción de poder añadir restricciones específicamente para casos en los que el diseño esté orientado a la fabricación aditiva. Así, se puede seleccionar un ángulo

máximo por encima del cual no podrán haber caras en el modelo final. Con esto se logra reducir la cantidad de soportes que hay que hacer antes de la fabricación. Además de este ángulo, también se puede seleccionar la dirección de fabricación para adaptar la optimización al proceso de impresión, aunque esta información puede que no se sepa de antemano.

3.4.3. Definir los cuerpos de construcción

Como se ha comentado antes, los cuerpos de construcción son aquellos elementos que se quiere que permanezcan inalterados durante el proceso de optimización. Para ello, suele ser habitual crear un sólido que ocupe el espacio que se desea preservar. En esta pieza, se desea preservar los agujeros circulares, por lo que se han creado una serie de cilindros por dentro como se ha podido observar en la Figura 3.20, de manera que en este paso habría que seleccionar dichos cilindros y seleccionar el grosor de pared que se quiera mantener.

En la Figura 3.21 se puede observar la obtención de uno de estos cuerpos de construcción, con un grosor de pared de 4mm, que es el que se ha establecido para el resto de cuerpos de construcción.

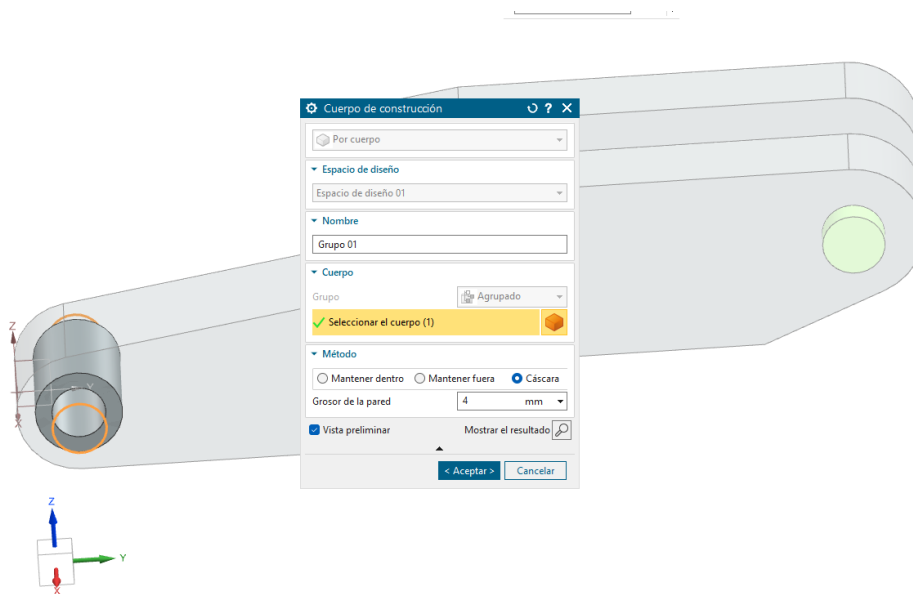


Figura 3.21: Proceso de selección de uno de los cuerpos de construcción.

3.4.4. Definir las restricciones del modelo

Como en la optimización topológica el programa hace un análisis de elementos finitos con el modelo, hay que establecer las fuerzas y restricciones del modelo al igual que se hizo durante el análisis de elementos finitos de la sección 3.3. Sin embargo, las opciones en este caso están bastante más restringidas, tanto en fuerzas como en restricciones, ofreciendo opciones más básicas. Es por ello que se suele recomendar realizar un análisis de elementos finitos del modelo final aparte para certificar su comportamiento.

Las restricciones ya han sido descritas en el apartado anterior, tan sólo quedaría aclarar que la opción escogida en este caso recibe el nombre de *Fijado* y permite la rotación a lo largo del eje del cuerpo cilíndrico seleccionado. Es importante aclarar que para su selección, se ha de seleccionar la cara interior del modelo y no el cilindro creado para la definición de los cuerpos de construcción ya que este no pertenece al espacio de diseño, y tanto las restricciones como las fuerzas han de estar aplicadas sobre caras dentro del espacio de diseño.

3.4.5. Definir las fuerzas del modelo

Ya se ha comentado en el apartado anterior que las opciones de solicitaciones se encuentran más restringidas en el módulo de optimización topológica. Sin embargo, debido a cómo se han definido las fuerzas en la sección 3.3, tampoco habrá especial diferencia ahora. Las fuerzas que se van a aplicar son la de tracción y la centrífuga cuyos valores están expuestos en la Tabla 3.3.

Como se habrá podido notar, en este caso no se está aplicando la fuerza de resistencia aerodinámica, y, es que, en la optimización topológica, el programa suele conservar prácticamente enteras las caras donde detecta

que hay aplicada una fuerza. Teniendo esto en cuenta, además del hecho de que, por su valor, la resistencia aerodinámica es despreciable en comparación a la fuerza de tracción y la centrífuga, se decide prescindir de ella y que el programa sólo tenga en cuenta las fuerzas predominantes. Este razonamiento se respalda en no querer que el programa conserve una pared de la pieza que está sometida a una fuerza órdenes de magnitud menor que otras paredes que se van a conservar automáticamente también, además, así se conseguirá un diseño final un poco más nítido, pudiendo apreciar mejor qué estructuras ha creado el programa para optimizar la pieza.

Finalmente, queda aplicar la fuerza de gravedad que, si bien también es despreciable, se puede dejar impuesta para ser más fiel al caso inicial. Por otra parte, debido a la reducción en cuanto a posibilidades, no se puede establecer ahora que la pieza posee una velocidad angular constante.

Tras definir las fuerzas y restricciones, el modelo antes de la optimización se puede observar en la Figura 3.22.

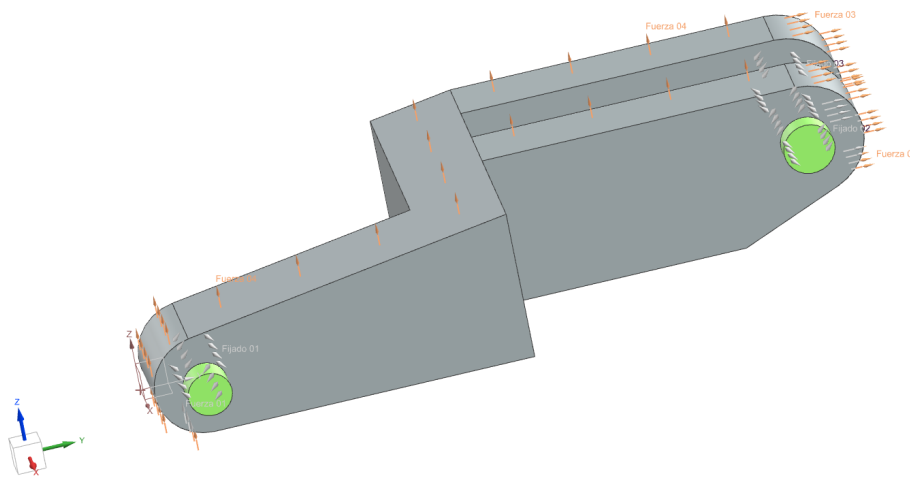


Figura 3.22: Modelo con las fuerzas y restricciones establecidas.

3.4.6. Resolver

Por último, sólo queda iniciar la optimización topológica y observar qué modelo sugiere el programa como solución al problema. El tiempo que lleva este proceso depende de la complejidad del caso. En el estudio que se está haciendo, la optimización puede llevar entre 10 a 40 minutos dependiendo del tipo de cargas y restricciones que se haya decidido poner finalmente. Para obtener un buen resultado, es importante realizar varias optimizaciones introduciendo cambios de un estudio a otro como el tipo de fuerzas o restricciones, experimentando sin alejarse del caso original y contemplando todas las posibles soluciones que da el programa. Además, habiendo realizado varias optimizaciones, se tendrá una mejor perspectiva de cuál es el diseño óptimo comparando las diferentes partes de la pieza es las diferentes optimizaciones. Se trata, por tanto, de un proceso iterativo y es lo que se ha hecho en el presente caso de estudio, siendo la solución obtenida la que se ha considerado de mejor calidad o más representativa de la pieza optimizada.

Finalmente, la solución obtenida se presenta en la Figura 3.23.

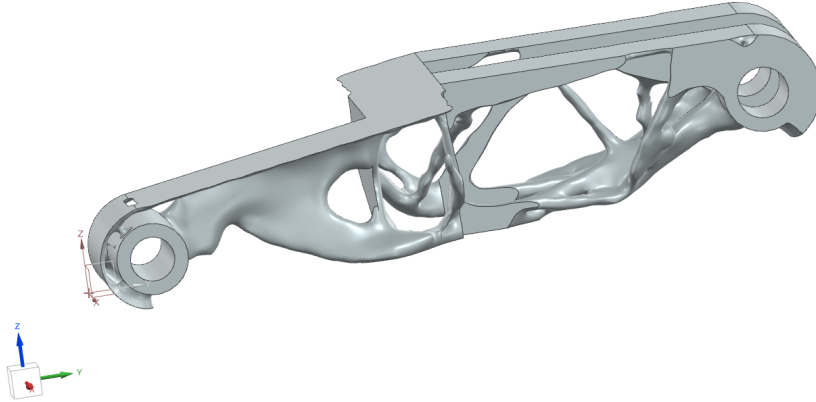


Figura 3.23: Solución de la optimización topológica.

Lo primero que se puede observar es la gran eliminación de masa que ha realizado el programa, creando uniones donde ha quitado masa, dando una forma más orgánica a la pieza. Además, se puede apreciar que ha respetado los cuerpos de construcción, preservando los espacios circulares por donde va enganchada la pieza. Por otra parte, ha preservado todas las caras superiores, al igual que las cilíndricas donde va aplicada alguna fuerza. En la zona anterior de la pieza (izquierda) es donde ha dejado más masa sin cambiar ya que detecta que, debido a los esfuerzos, es mejor dejar esta parte así.

Como resultará comprensible, esta forma no puede ser definitiva. Por una parte, una forma tan orgánica no puede ser trabajada por una máquina DED ya que esta trabaja con formas más simples como se verá posteriormente. Además, aunque la forma está optimizada de acuerdo con las solicitaciones, resulta evidente que no acaba de ser una forma funcional ya que tiene uniones y contornos excesivamente irregulares y que pueden ser engrosados además de otros que se quedan flotando en el aire. Es por ello que, a partir de este diseño optimizado, se realizará un nuevo diseño de la pieza original.

Hay que mencionar que este no es el único proceder y que, comúnmente en la industria se puede trabajar sobre el modelo optimizado para adaptarlo al proceso de fabricación. Una opción es el refinado de la malla de la optimización, produciendo resultados satisfactorios para impresiones únicas, el modelo obtenido en facetas no estará relacionado con el CAD inicial, dificultando la introducción de posibles modificaciones. Por otra parte, está la interpretación NURBS para conseguir un modelo paramétrico, aunque ello tiene una complicación elevada y el modelo final no contiene información sobre el original. Por último, está el rediseño manual, que es el que consume más tiempo, pero con el que se obtiene un modelo paramétrico muy controlable, siendo esta la opción más recomendada.

3.5. Rediseño de la pieza original

El siguiente paso de este largo proceso de diseño es el rediseño del modelo original tomando como base el resultado de la optimización topológica. De esta manera, se pretende crear un modelo con una forma más asumible para el proceso de fabricación. Nótese que guarda cierta complicación, ya que, al no poder imprimir directamente ese modelo optimizado, exige cierto esfuerzo para pasar de un modelo tan orgánico a uno más geométrico, tratando de adaptar las nuevas uniones creadas por el software a algo más asumible durante el modelado. Para ello, será necesaria cierta habilidad a la hora de modelar, teniendo en cuenta que no se podrá llegar a un diseño como el de la optimización por su elevada complejidad, pero a uno aproximado usando la visión espacial y la creatividad.

En la Figura 3.23 se ha comprobado que el diseño óptimo incluye añadir cierta curvatura a la parte izquierda de la pieza, pudiendo estrecharla ligeramente, ganando así espacio y reduciendo la masa total. En la otra mitad de la pieza, se aprecia que se han de establecer ciertos nervios entre las caras superiores e inferiores, manteniendo la superior intacta o con pequeñas modificaciones.

Tras un proceso de interpretación de los resultados y buscando la manera de "traducirlos" a un diseño más geométrico hecho a mano, se ha obtenido el siguiente diseño que se muestra en la Figura 3.24.

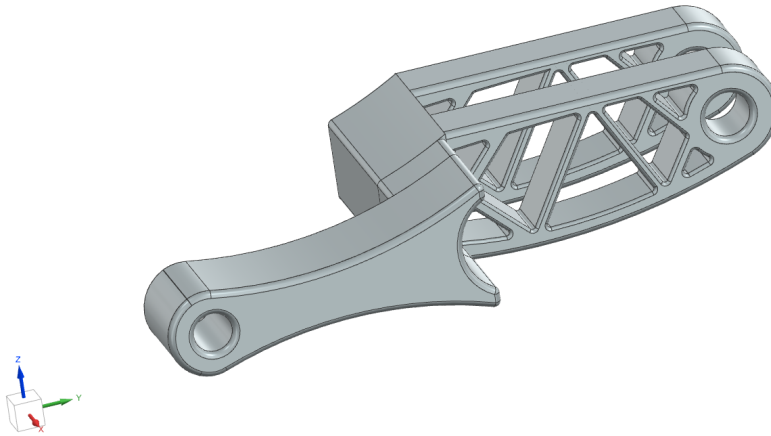


Figura 3.24: Rediseño del modelo original.

En este nuevo diseño se ha estrechado la parte izquierda de la pieza, como ya se había comentado, y se han establecido una serie de nervios alternantes entre la parte superior e inferior de la parte posterior de la pieza imitando el resultado de la optimización topológica. En cuanto a parte central, unión de ambas mitades, el resultado de la optimización resultaba difícil de interpretar y de integrar en el nuevo diseño, por ello, se ha optado por realizar una prolongación de la parte izquierda de la pieza, pero de menor longitud, asegurando la unión entre las dos partes. Queda, por tanto, no tan optimizada como otras partes de la pieza, pero con la seguridad de una unión robusta. Las dimensiones generales se han tratado de respetar para no interferir con la posición supuesta de la pieza.

A continuación, se muestra en la Figura 3.25, como se hizo con el modelo original, la pieza con el material asignado pero desde una perspectiva diferente en esta ocasión para poder apreciarla mejor.



Figura 3.25: Resultado final del rediseño.

3.6. Análisis de elementos finitos del rediseño

Al igual que se hizo con el modelo original, es interesante observar cuál es el comportamiento de este nuevo diseño antes las solicitaciones establecidas y que, además, servirá de base para posteriores comparaciones como se verá más adelante. Para que dicha comparación sea más verosímil, la simulación se realizará con exactamente los mismos parámetros que la anterior, ello quiere decir mismo tamaño de malla, misma forma de elemento, mismas fuerzas y mismas restricciones.

Aclarado esto, el primer paso es, nuevamente, generar la malla que, en concordancia con lo realizado en el anterior análisis de elementos finitos, será con elementos tetraédricos y con un tamaño de 2 mm, como se puede apreciar en la Figura 3.26.

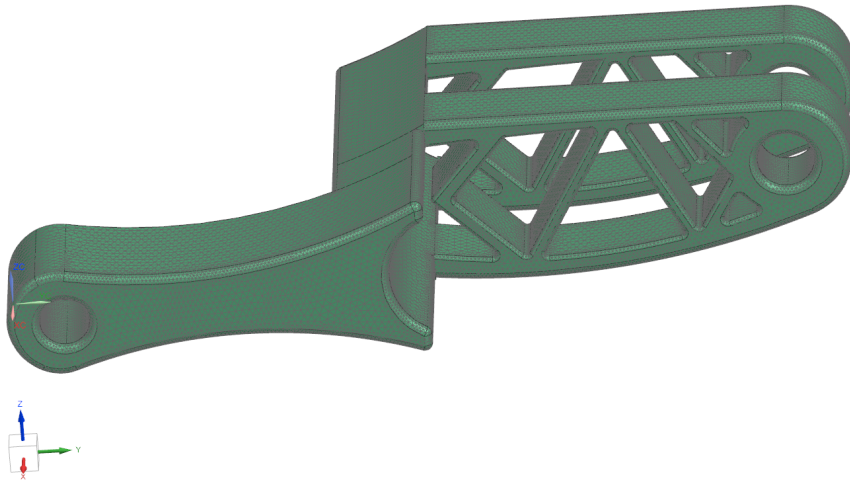


Figura 3.26: Generación de la malla del nuevo modelo.

A continuación, se establecen las fuerzas y restricciones, con el mismo valor y sobre las mismas caras que en el anterior estudio, como se puede observar en la Figura 3.27.

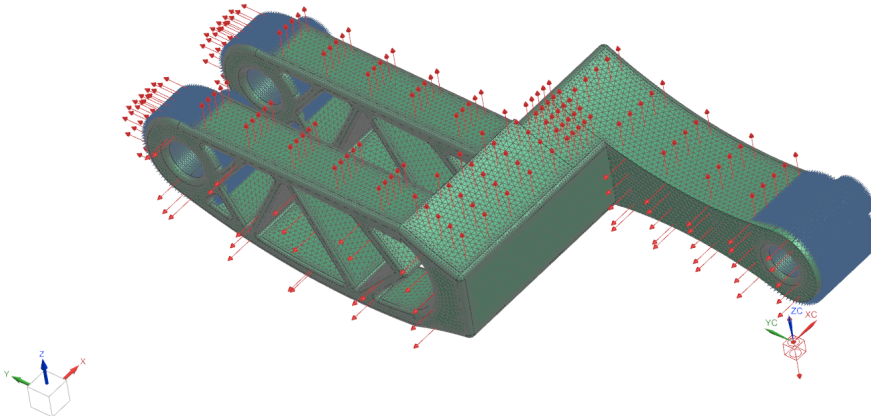


Figura 3.27: Fuerzas y restricciones del nuevo modelo.

Finalmente, se proceden a analizar los resultados del estudio, comparando en qué han variado respecto al caso base sin optimizar.

Primero de todo, se estudia el desplazamiento, mostrado en ambas partes de la pieza en la Figura 3.28. A primera vista, se puede observar que la distribución de la deformación es similar a la del caso base, alcanzando los mínimos y máximos valores en las mismas zonas, como cabría esperar al aplicar las mismas restricciones y fuerzas. Se puede ver que la eliminación de material en la zona central donde ahora hay nervios no ha cambiado dicha distribución, manteniéndose los extremos sin a penas desplazamiento debido a la aplicación de las restricciones. Como aspectos destacables, se podría remarcar la curvatura que adquiere la parte delantera de la pieza y la torsión que se genera en la zona central.

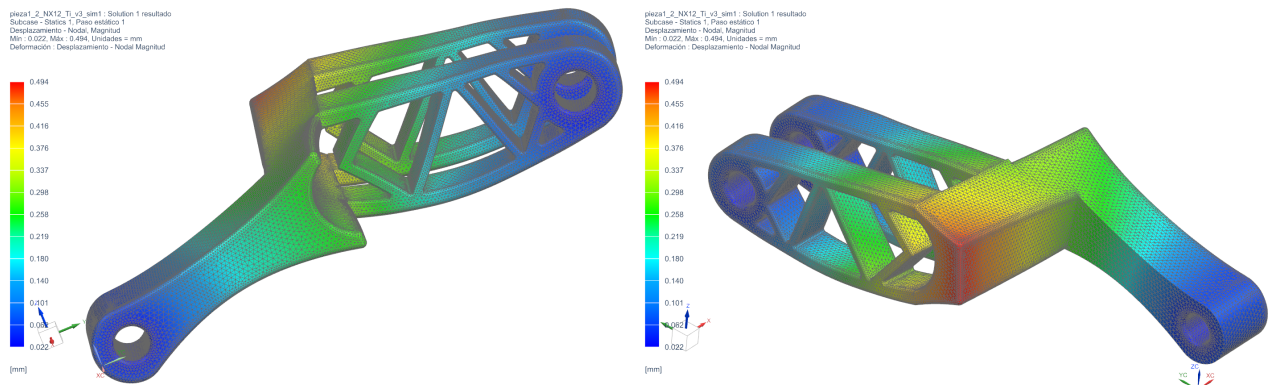


Figura 3.28: Desplazamiento de la pieza tras la optimización.

Por otra parte, si se atiende ahora a los valores obtenidos, se puede apreciar un aumento del desplazamiento generalizado a lo largo de la pieza, alcanzando desplazamientos de hasta medio milímetro. Sería un resultado esperable, pues al haber eliminado gran parte del material de la pieza, especialmente en la zona de los nervios, es inevitable la pérdida de robustez frente a una pieza totalmente maciza. No obstante, a pesar de la subida de la deformación, los resultados no parecen alarmantes, pues a pesar de la gran reducción de masa, la pieza solamente se deforma a penas medio milímetro en su zona más débil, por lo que sigue siendo funcional. Hay que tener en cuenta también el material con el que se está trabajando, cuya alta resistencia contribuye a este comportamiento. Para acabar de corroborar esto, se procederá a analizar los resultados de las tensiones para acabar de verificar el buen comportamiento de la pieza a pesar de la reducción de masa establecida.

A continuación, en la Figura 3.29, se muestran los resultados de la distribución de la tensión de Von Mises. En un primer vistazo, la tensión en la mayor parte de la pieza es relativamente baja, por debajo de los 200 MPa en general, concentrándose en los puntos más críticos del modelo como la zona donde va aplicada la fuerza de tracción, la zona de unión de los dos brazos a la parte central o algunas esquinas formadas por los nervios de dichos brazos. Se trata, por tanto, de zonas de concentración de tensiones debido a que confluyen distintos cuerpos en un pequeño volumen de la pieza.

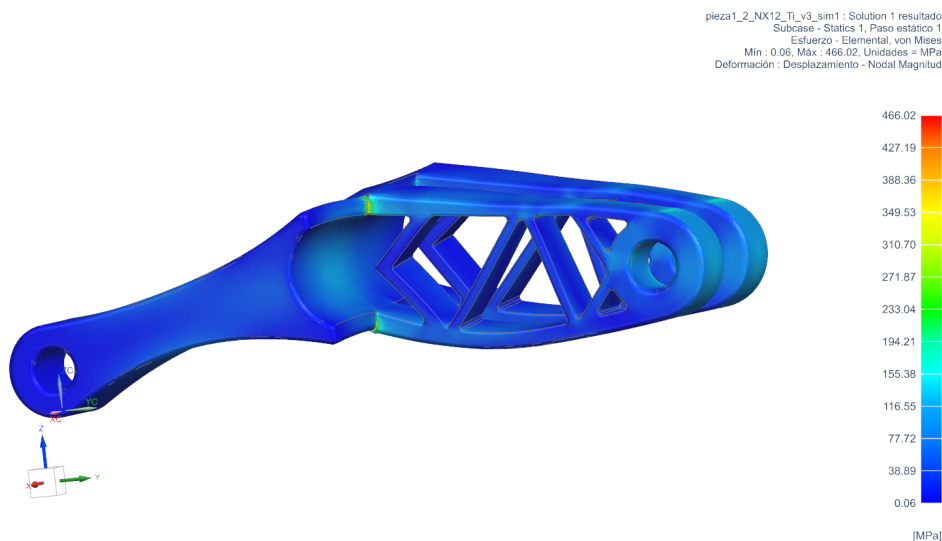


Figura 3.29: Tensiones de Von Mises a lo largo de la pieza.

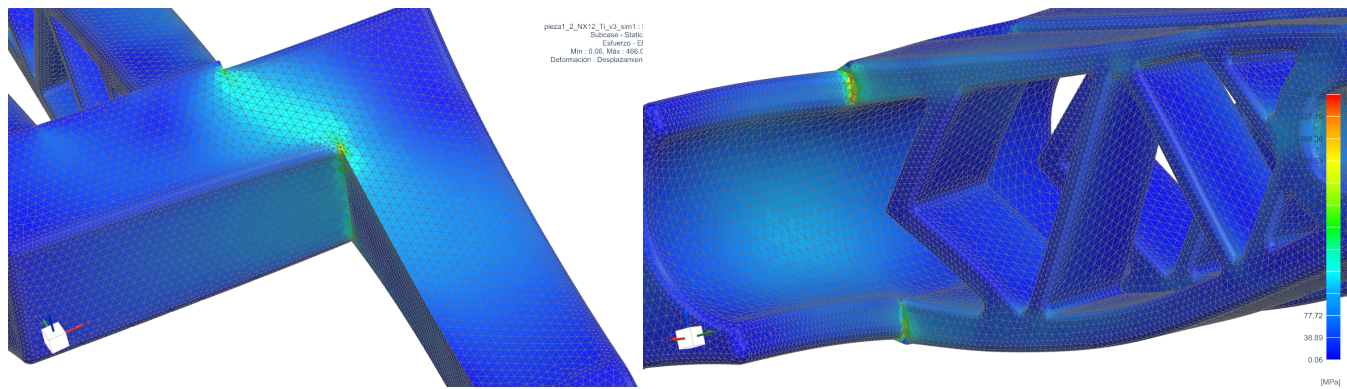


Figura 3.30: Zonas de concentración de tensiones.

En cuanto a valores, si se analiza la escala cromática proporcionada por la solución, se puede ver que las tensiones son bastante más altas que en el caso anterior, alcanzándose valores por encima de los 400 MPa en las zonas más críticas, acentuándose allí donde ya eran altas en la pieza completa. Sin embargo, es importante realizar un análisis algo más profundo para ver hasta qué punto esto es realmente así.

Empezando por la mayor parte de la pieza que está sometida a tensiones más bajas, como la parte izquierda o incluso las paredes de los nervios, se puede ver que, aunque en este caso las tensiones son ligeramente mayores, superando los 150 MPa, no supone una variación alarmante. Si se observa ahora las caras sobre las que se ha aplicado la fuerza de tracción, aunque ahora se muestre de otro color, pues ha cambiado la escala cromática, los valores son realmente similares en ambos casos a pesar de haber reducido considerablemente la masa de la pieza, en parte porque en esta zona en específico no se han realizado cambios significativos, estando ahora entre 150 y 190 MPa. Finalmente, poniendo atención ahora en las zonas críticas antes mencionadas, mostradas en la Figura 3.30, sí se obtienen tensiones más altas que en el caso anterior, sin embargo, por debajo de las tensiones de rotura y de límite elástico. En cuanto a fatiga, dependiendo del tratamiento del titanio, podría llegar a estar ligeramente por encima, pero cabe aclarar que los valores más extremos obtenidos se dan sólo en determinados elementos que casi son imperceptibles, de manera que no se puede considerar que una tensión de estos valores sea una tensión extendida por una amplia zona, manteniéndose las zonas críticas por debajo del umbral de seguridad.

Finalmente, observando la fuerza de reacción, se puede notar que la magnitud de esta fuerza es menor en este caso que en el anterior, no llegando ni siquiera a los 200 N. Esto se atribuye a que, al reducir la masa del componente, se generan menores fuerzas de inercia y, en consecuencia, menores fuerzas de reacción, además de la reducción de rigidez que conlleva la eliminación de material que provoca una mayor deformación, como se ha visto con el desplazamiento, reduciendo así la reacción que se genera en los soportes. En la Figura 3.31 se muestra la fuerza de reacción en el enganche al rotor, donde la magnitud de esta fuerza es mayor en toda la pieza.

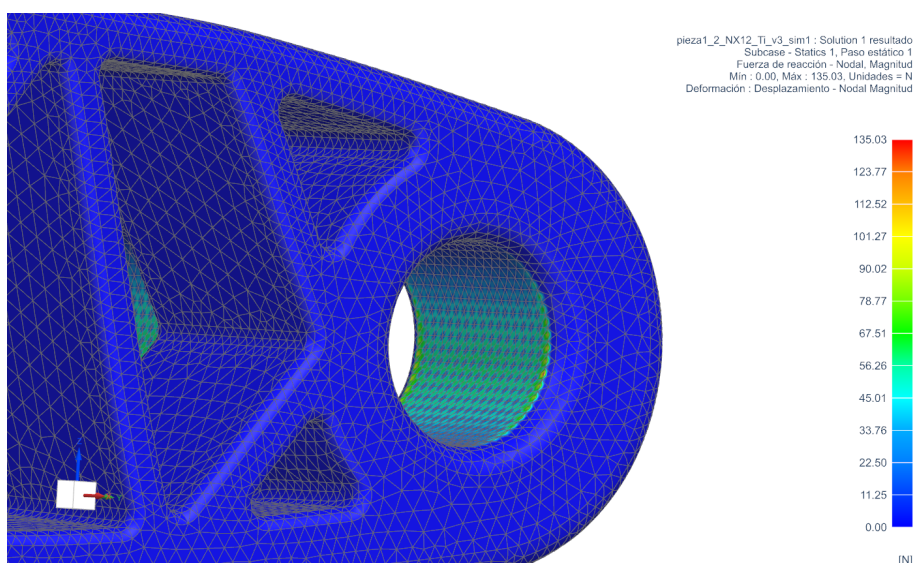


Figura 3.31: Fuerza de reacción de la pieza optimizada.

Para concluir este apartado, se ha podido ver cómo, aunque la pieza se deforma ligeramente más que el caso original, sigue sin ver comprometida su funcionalidad, conservando una distribución de tensiones baja a lo largo de la pieza y por debajo de los valores de tensión críticos que pudieran causar problemas durante su funcionamiento. De esta manera, se ha conseguido reducir considerablemente la masa de la pieza y, en consecuencia, el material usado para la fabricación de la misma, manteniendo a la pieza dentro de unos límites de seguridad razonables. Con todo ello, se avanza hacia el siguiente paso.

3.7. Adaptación del modelo a los requisitos de fabricación

Una vez aprobado el modelo por AIDIMME, se proporcionan dos requisitos de diseño que han de cumplirse para poder meter el diseño en la máquina:

- La dirección de fabricación.
- Ángulo máximo de desmoldeo.

Estos requisitos están estrechamente relacionados con las características de la máquina en la que se va a conformar la pieza final, de manera que habrá que retocar nuevamente el diseño para poder fabricar la pieza sin lugar a errores.

Primeramente, es necesario establecer la dirección de fabricación, es decir, la dirección en la cuál va a crecer la pieza durante el proceso de impresión o, dicho de otra manera, la dirección en la que se van a ir depositando las capas de material una sobre otra. Es un parámetro muy importante a la hora del diseño y, además, está estrechamente relacionado con el ángulo máximo de desmoldeo. En este caso, la dirección de fabricación escogida por el estudiante y aprobada por la empresa es el eje y negativo, es decir, la pieza se va a ir creando en vertical, empezando por la parte derecha, si se está mirando la Figura 3.24, hasta acabar en la parte izquierda de la misma imagen. Cabe recalcar que esta dirección no es la única posibilidad, cada dirección conllevará hacer unas modificaciones sobre el diseño u otras. En cualquier caso, la dirección definida permitirá una rápida creación de la pieza ya que el cabezal no se tendrá que desplazar tanto como si se construyese a lo largo del eje z por ejemplo, aunque conllevará una serie de modificaciones que se comentarán más adelante.

Por otra parte, sin olvidar que se va a utilizar la técnica de DED, debido a la precisión de la máquina a la hora de depositar material, existe un ángulo máximo que las caras pueden formar con el eje que marca la dirección de fabricación, en este caso el y, que para este caso, es de 20° . Además, habrá que crear una serie de soportes para que tampoco queden voladizos en la pieza. Este requisito ayudará a impedir que, mientras se está depositando el material, se produzcan desprendimientos que arruinen por completo el proceso de fabricación.

Está claro que, al añadir elementos al modelo final, será necesario un post procesado de la pieza, en el que se retirarán dichas partes sobrantes y se crearán aquellas que sean necesarias mediante un proceso de mecanizado tradicional. Ya se ha visto en el capítulo 2 que combinar el uso de la fabricación aditiva con procesos de mecanizado tradicional es una práctica común entre empresas del sector y que posee ciertos beneficios, especialmente en técnicas más limitadas en cuanto a libertad de geometría con un acabado superficial más pobre como la de DED.

Después de haber realizado todas estas aclaraciones, el primer paso en este nuevo proceso de rediseño es realizar un análisis de la figura para ver qué caras forman un ángulo mayor de 20° con la dirección de fabricación para poder determinar qué zonas se han de modificar y dónde hay que añadir algún soporte para la fabricación. NX posee una función para hacer justamente este estudio llamada Análisis de Desmoldeo, en la que seleccionando el cuerpo o caras que se quieren analizar, permite definir la dirección de interés y el ángulo límite que pueden formar los elementos con dicho eje, mostrando mediante colores, que el usuario también puede definir, qué zonas están dentro del umbral deseado y cuáles no lo están.

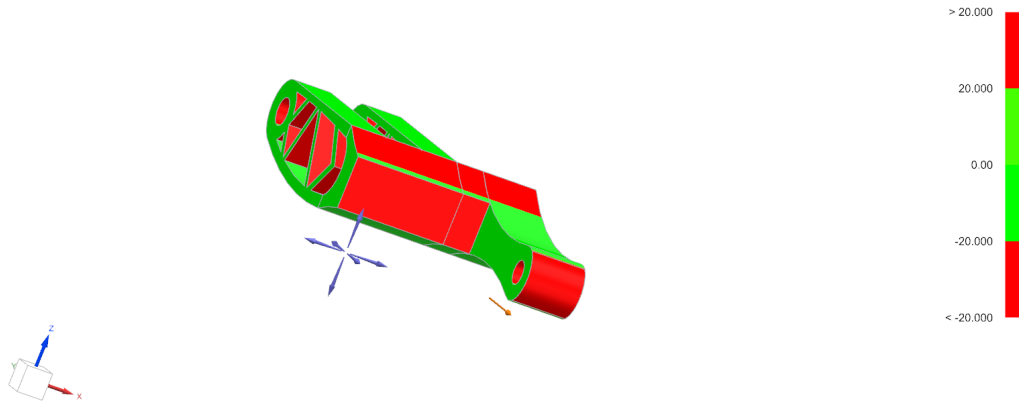


Figura 3.32: Análisis de desmoldeo plano ZX.

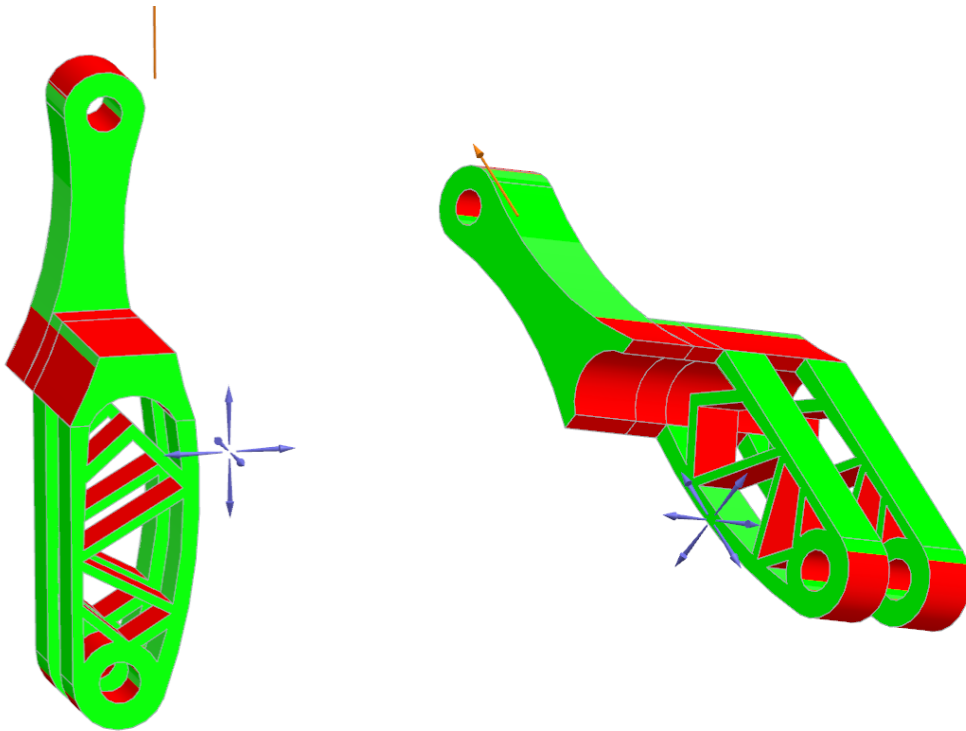


Figura 3.33: Análisis de desmoldeo plano ZY.

Figura 3.34: Análisis de desmoldeo de la pieza en perspectiva.

En las Figuras 3.32, 3.33 y 3.34 se puede observar el análisis de desmoldeo hecho en la pieza junto con la leyenda en esta última Figura. De su observación, se puede observar que varias caras forman un ángulo demasiado pronunciado con el eje de fabricación. Se puede ver que hay que rehacer los nervios de la pieza de acuerdo con este nuevo requisito, por otra parte, habrá que modificar la parte central, ya que esta también forma un ángulo demasiado pronunciado. Finalmente, las secciones circulares se habrán de eliminar ya que estas se realizarán mediante el mecanizado posterior, por lo tanto, los orificios circulares se habrán de eliminar y en las partes redondeadas habrá que crear un soporte sobre el que se pueda construir la pieza. No obstante, hay un aspecto muy importante que falta comentar, y es que no pueden haber voladizos, ya que durante la fabricación estos no se pueden realizar pues necesitan un soporte que, obviamente, tendrá que cumplir con los requisitos de fabricación.

Después de un nuevo proceso de diseño añadiendo soportes, eliminando o modificando caras y realizando todas las operaciones pertinentes, se obtiene el modelo apto para introducir en la máquina de fabricación que se muestra en la Figura 3.35.

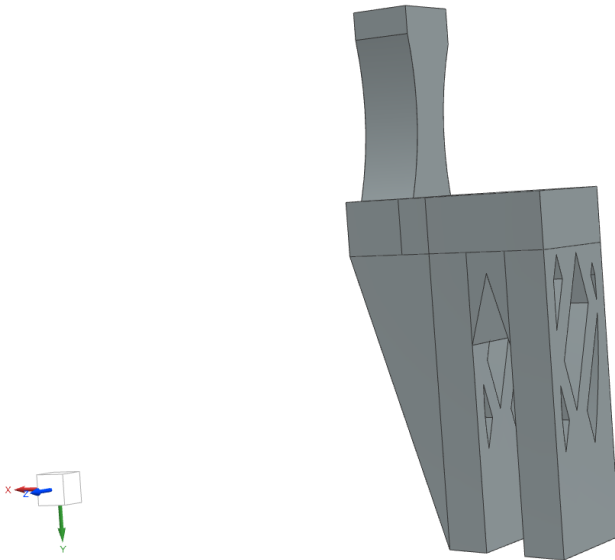


Figura 3.35: Modelo para introducir en la máquina de fabricación.

Como se puede observar, se han creado soportes en la zona central donde se divide la pieza en dos para evitar un voladizo, al igual que la unión de la parte anterior de la pieza con la parte central, donde se ha creado un gran soporte de 18° , para cumplir con las especificaciones. Además, se han eliminado los orificios circulares, que se crearán mediante el mecanizado posterior y, se han eliminado las caras curvadas, convirtiéndolas en caras rectas para que se puedan fabricar correctamente, lo que conlleva alargar ligeramente la pieza para crear soportes sobre los que se puedan empezar a imprimir.

A continuación, se deberá realizar un nuevo análisis de desmoldeo para verificar que ninguna cara excede de los 20° que se han impuesto. Dicho análisis se muestra en las Figuras 3.36, 3.37, 3.38.

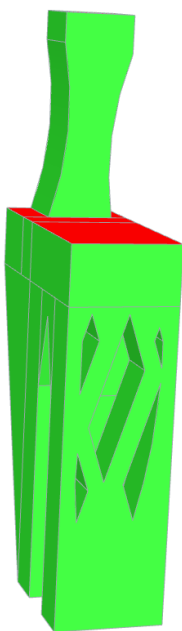


Figura 3.36: Análisis de desmoldeo en plano ZY.

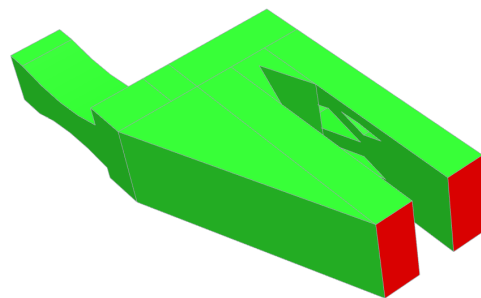


Figura 3.37: Análisis de desmoldeo de la pieza en perspectiva.

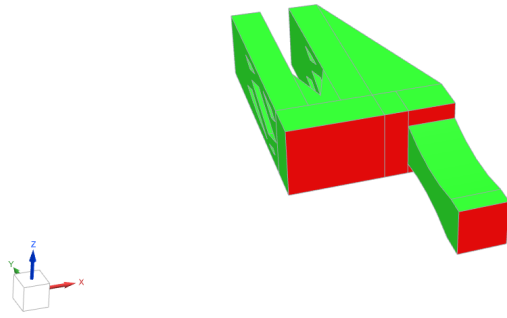


Figura 3.38: Análisis de desmoldeo plano ZX.

Como se puede observar, ninguna de las caras supera los 20° de ángulo máximo establecido. De esta manera, el diseño se envía a AIDIMME para su inspección. Tras comprobar por su parte cómo sería el crecimiento de la pieza, se detecta un problema en la zona del soporte triangular central que se puede apreciar en las Figuras 3.36 y 3.37. Para solventarlo, se pidió realizar una serie de redondeos para evitar las aristas vivas y conseguir un mejor acabado, por lo que se realizó una modificación de este diseño aplicando redondeos de radio 5 mm salvo en los orificios más pequeños, ya que un redondeo excesivo en estas zonas deformaba en exceso el diseño. El resultado se puede apreciar en la Figura 3.38, y la modificación de este soporte central en la Figura 3.39.

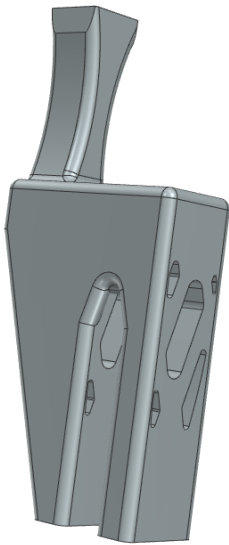


Figura 3.39: Modelo redondeado.

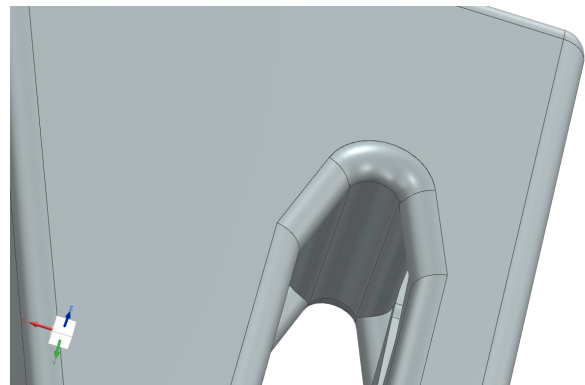


Figura 3.40: Detalle del soporte central.

Finalmente, el modelo fue enviado nuevamente a la empresa para su valoración y chequeo final. Tras analizarlo, la empresa decidió seguir adelante con el modelo sin redondear y, aunque se respetó prácticamente todo el diseño, realizaron una ligera modificación en dicho soporte central, creando un chaflán de unos 30° . Cabe destacar que se trata de una modificación muy sutil pero basada tanto en la experiencia en modelado para fabricación aditiva de los trabajadores como del conocimiento profundo del modo de trabajo de la máquina de fabricación, dos elementos que, lógicamente, no posee un estudiante de grado. Sin embargo, como se ha explicado en este documento, aún así todo el diseño fue realizado por el alumno, siendo esta última modificación una pequeña excepción con el fin de agilizar el proceso de trabajo, ya que, el hecho de estar enviando y rehaciendo constantemente los diseños sin poseer el conocimiento específico de la empresa resulta contraproducente, tanto por la disponibilidad del encargado de la empresa para revisarlos como para el rápido desarrollo del TFG.

Cabe destacar que, además, ellos poseen el software específico para simular la generación de la pieza durante la impresión, pudiendo identificar así los puntos débiles del diseño de una manera mucho más eficaz.

Por último, el modelo que se procederá a meter en la impresora será el que se muestra en la Figura 3.41.

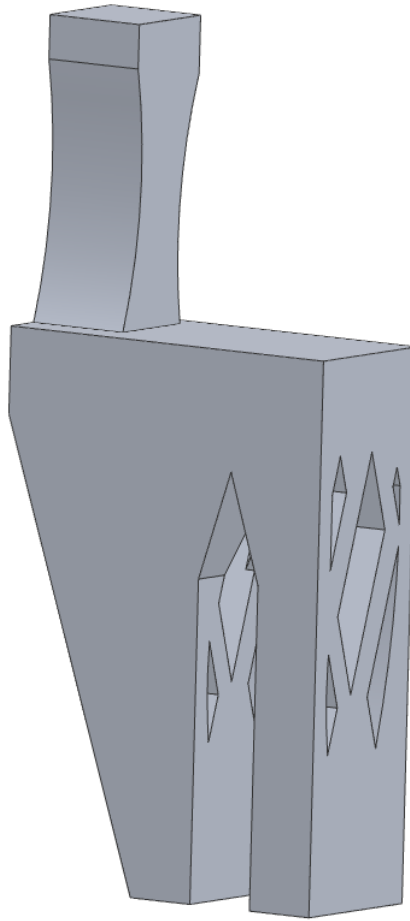


Figura 3.41: Modelo final.

Para una mejor comprensión, en las Figuras 3.41 y 3.42, se muestra cómo ha quedado dicha modificación. No obstante, su visualización puede seguir siendo complicada a partir de unas pocas imágenes, en cualquier caso, el objetivo es captar la idea de que se han construido una serie chafanes en dicha zona.



Figura 3.42: Modificación soporte central

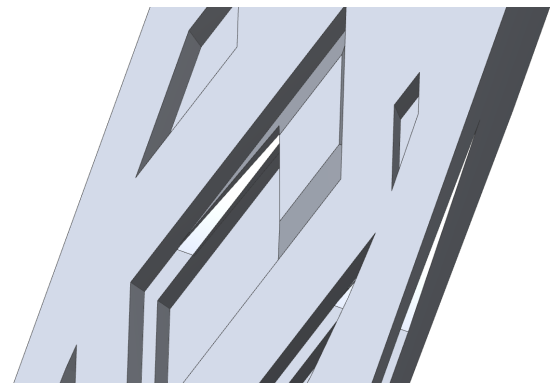


Figura 3.43: Interior del soporte central

3.7.1. Diseño del modelo final

Como se ha podido observar, finalmente se ha obtenido un modelo apto para introducirse en la máquina de impresión, pero que se desvía del modelo original realizado a partir de la fabricación aditiva. Por ello, sería

interesante plantear un modelo final, realizado a partir de este último, suponiendo que se le puede hacer un mecanizado para conseguir un diseño mejor. Por tanto, se partirá del archivo de la pieza que se va a imprimir y se realizarán una serie de modificaciones realizables sobre la pieza directamente salida de la impresora.

En esta parte, hay que tener especial cautela con el nuevo proceso de diseño, procurando realizar modificaciones basadas en la extracción de material del modelo salido de la impresora, mostrando especial atención en no realizar redondeos o nuevas formas que requieran un material que ya no está, creando agujeros, acortando la pieza, y alargando los nervios hasta donde haga falta.

Finalmente, tras realizar la modificaciones pertinentes, se obtiene el modelo que se muestra en la Figura 3.44.

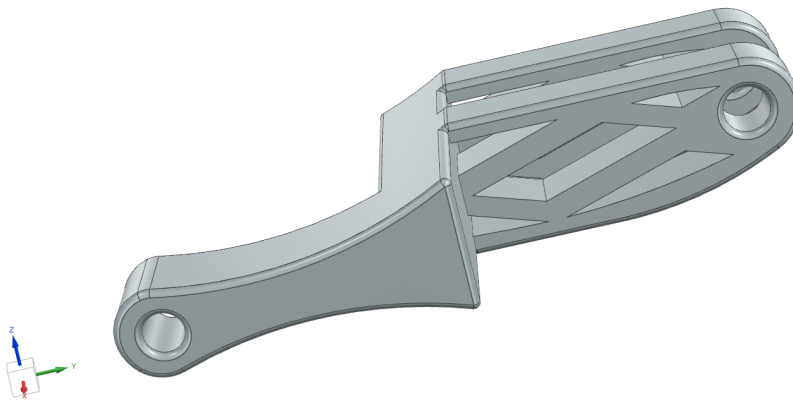


Figura 3.44: Modelo final modificado.

Lo primero que se puede observar es que se ha respetado la forma general, tratando de ser similar al modelo realizado tras la optimización topológica. Los nervios son los mismos que los del modelo impreso, no podía ser de otra manera ya que, como se ha dicho, las modificaciones se debían realizar sobre dicha pieza, pero es importante remarcar este aspecto, de manera que, simplemente, se han alargado los huecos entre estos. Por otra parte, se ha recortado la pieza por ambos extremos para mantener las dimensiones de anteriores modelos (recuérdese que para introducir el modelo en la impresora, se había tenido que alargar la pieza con el fin de crear ciertos soportes rectos). A los dos brazos se les ha dado cierta curvatura. En cuanto a la parte central, en esta ocasión se ha dejado maciza, al contrario que en anteriores aproximaciones donde presentaba una curvatura. El motivo de esta decisión es, por una parte, facilitar el proceso de mecanizado, ya que se trata de una operación compleja y, además, así mantiene fijos los nervios, rigidizando la pieza. Por último, se ha realizado redondeos en los bordes exteriores de la pieza y los orificios circulares pero no en la zona de los nervios, por una parte, por razones de solapación entre ellos y errores durante el proceso de diseño, en cuanto a los redondeos exteriores y, por otra, especialmente en los pliegues de unos con otros, porque al redondear, el programa añade cierta cantidad de material para crear un redondeo del radio correspondiente cosa que no se puede hacer como ya se ha explicado. De esta manera, se obtiene un modelo final optimizado y al que, cabe recalcar debido a su importancia, se puede llegar a partir del modelo salido de la impresora mediante la extracción de material.

A continuación, en la Figura 3.45, se muestra la pieza final con el material aplicado.

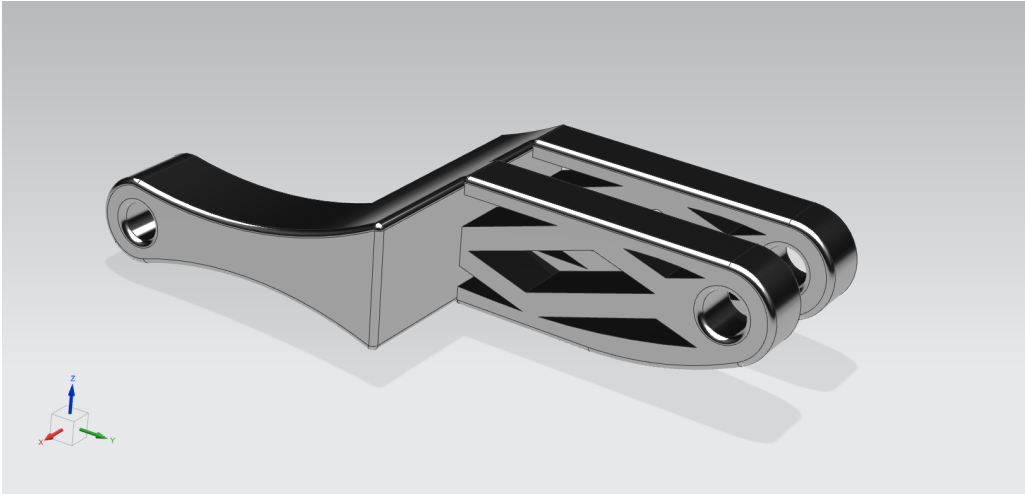


Figura 3.45: Pieza final.

3.7.2. Análisis de elementos finitos del modelo final modificado

Como no podía ser de otra manera, se ha de realizar un nuevo análisis de elementos finitos para comprobar que la funcionalidad de la pieza no se ha perdido. La malla utilizada tiene un tamaño de elemento de 2 mm y utiliza elementos tetraédricos. Las fuerzas y restricciones son exactamente las mismas que en los anteriores estudios, por lo que no es necesario recordarlas, si el lector lo desea, puede recordarlos en las secciones anteriores. Todo ello se muestra en la Figura 3.46.

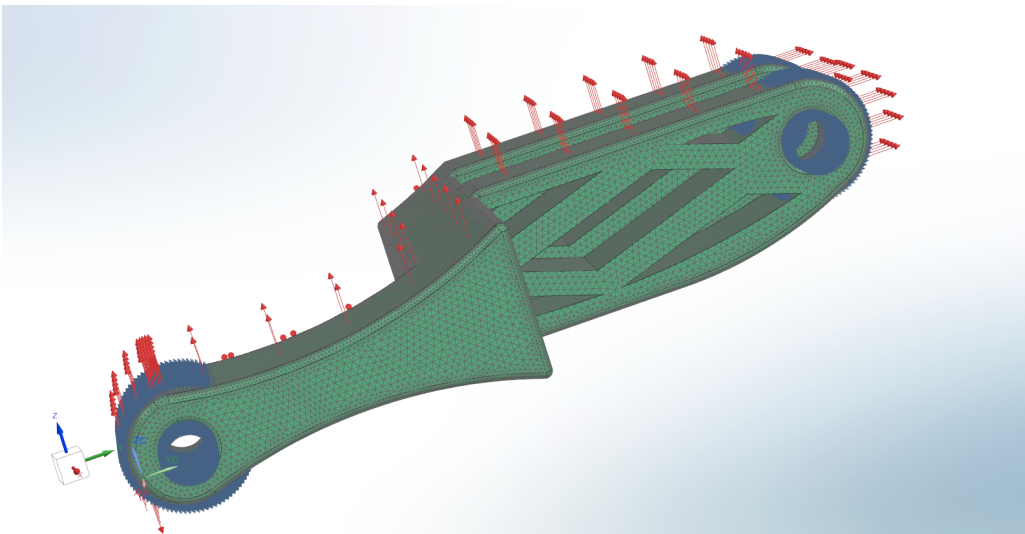


Figura 3.46: Malla y restricciones del modelo final.

Empezando nuevamente con el desplazamiento, se puede apreciar en la Figura 3.47 que la distribución es similar a los casos anteriores, alcanzando el máximo de nuevo en la esquina central. En cuanto a valores, sigue siendo mayor que en el caso base (todo macizo y, por tanto, más resistente) pero menor que en la anterior optimización, estando por debajo de 0.4 mm. Al haber aumentado el ángulo que forman los nervios y el grosor de los mismos, el desplazamiento ha disminuido ligeramente respecto a la optimización. Aunque también hay que tener en cuenta el hecho de mantener la parte central maciza, que fija los nervios y hace que la pieza en general sea más resistente, disminuyendo así el desplazamiento. En cuanto a la deformación, sigue produciéndose torsión al estar en constante rotación y tener que transmitir este movimiento, y por otra parte, la deformación de los dos brazos es mucho menor al caso anterior, estando su desplazamiento entre 0.1 y 0.3 mm aproximadamente, por lo tanto, se ha rigidizado la pieza.

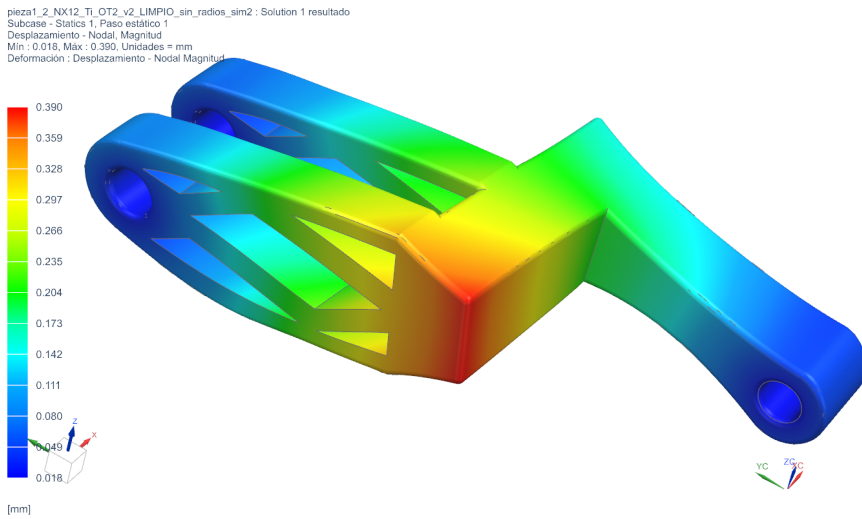


Figura 3.47: Desplazamiento del modelo final.

A continuación, en la Figura 3.48 se observan las tensiones de von mises a lo largo de la pieza, comenzando con la visualización de las mismas sobre la pieza completa. En estas primeras imágenes ya se puede observar que, en concordancia con los resultados del desplazamiento, las tensiones que sufre la pieza también son menores que en la optimización al haber fortalecido la pieza, siendo de menos de 330 MPa en sus puntos más críticos, mientras que, en general varían desde menos de 100 MPa hasta puntos donde se superan los 240 MPa.

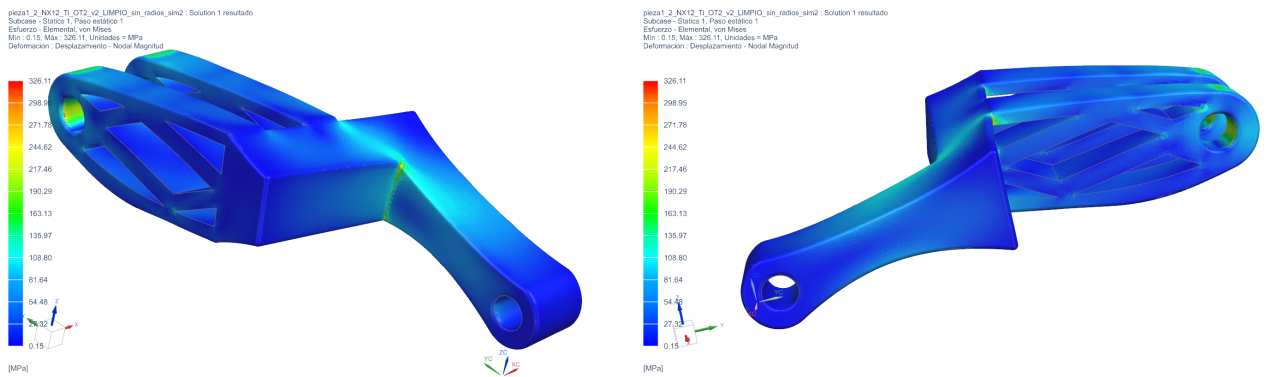


Figura 3.48: Tensiones de Von Mises a lo largo de la pieza.

Lo primero que se puede apreciar es que existe una mayor distribución de la tensión de Von Mises que en el caso base ya que, al poseer menos masa y existir más espacios vacíos y esquinas, se generan zonas donde la tensión es mayor provocando mayor variación de tensiones a lo largo de la pieza. A continuación, se muestran en detalle algunas de esas zonas en la Figura 3.49.

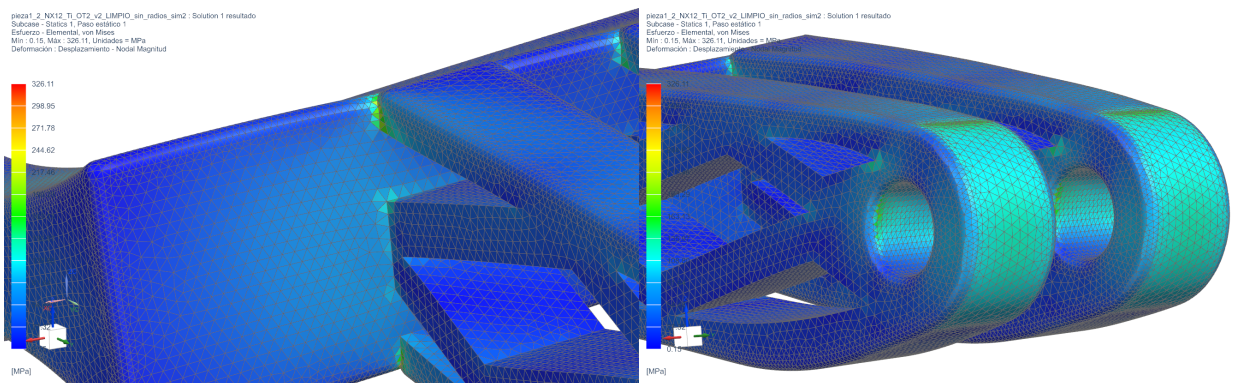


Figura 3.49: Zonas de concentración de tensiones.

Estas zonas, en general, son similares a las de la pieza optimizada, se trata de las zonas de unión de los

brazos que contienen los nervios a la parte central y la unión de la pieza al rotor, donde se alcanzan las máximas tensiones. Si se observan estos valores, son algo mayores que en el caso base, pero significativamente menores que en la optimización. Esto es en gran medida gracias a los aspectos comentados en el desplazamiento, una unión más rígida consigue fortalecer la pieza. Cabe añadir que, como estos valores son inferiores a los valores críticos de esta aleación de Titanio, la pieza podrá trabajar sin problemas.

Siguiendo en la línea de los otros estudios, se va a analizar ahora la fuerza de reacción. Primero, se muestra la pieza completa en la Figura 3.50 donde, como en los anteriores casos, esta fuerza es baja o directamente nula, debido a que esta fuerza se concentra en las zonas donde se aplican las restricciones.

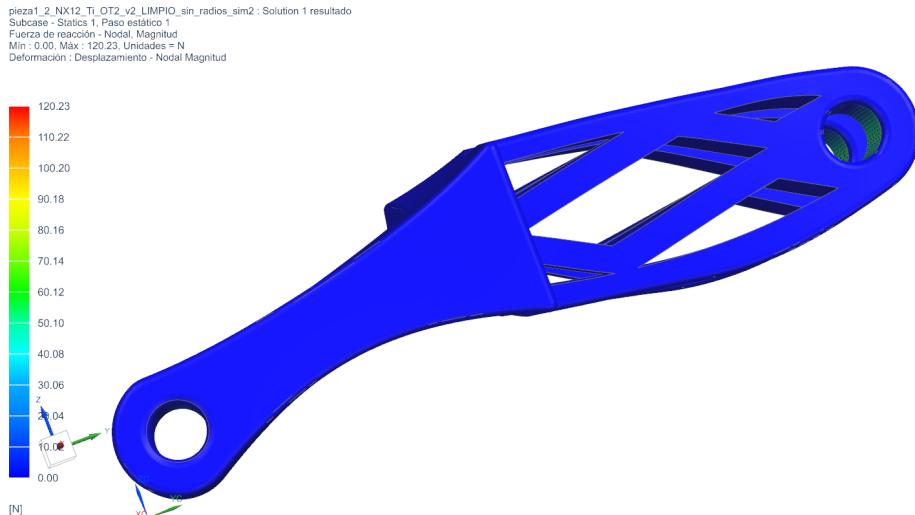


Figura 3.50: Fuerza de reacción a lo largo de toda la pieza.

En cuanto a los valores que toma esta fuerza, se sitúa en la línea del caso de estudio de la optimización, con valores por encima de los 100 N en las zonas más afectadas, siendo notablemente inferior al caso base. Las razones ya han sido comentadas en el estudio anterior, al reducir la masa de la pieza, las fuerzas de inercia son menores y, por tanto, la reacción que sufren los soportes de la pieza también lo será. En las Figuras 3.51 y 3.52, se muestran en detalle las zonas donde están aplicadas las restricciones.

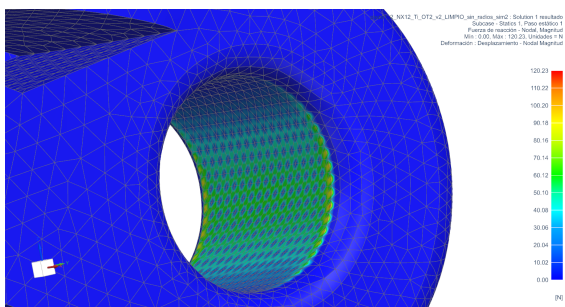


Figura 3.51: Zona de enganche posterior.

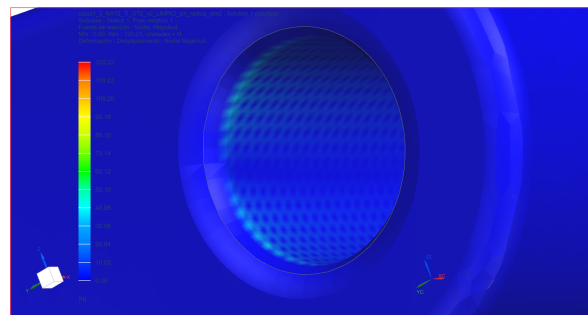


Figura 3.52: Zona de enganche anterior.

Para concluir esta sección, se ha conseguido realizar un modelo final para esta pieza. Este modelo, se puede obtener directamente de la pieza salida de la máquina de fabricación mediante eliminación de material y presenta un comportamiento mejor que el obtenido de la optimización. Comparado con el modelo original, posee menos material, lo que conlleva un ahorro del mismo a la vez que una complicación de la geometría de su diseño. Esta complicación de la geometría será asumida por su fabricación mediante fabricación aditiva, siendo necesarios varios arreglos por mecanizado posterior.

3.8. Introducción del modelo en la máquina de fabricación

En este punto, el diseño de la pieza ya ha acabado, por tanto, se deberá exportar el diseño final en formato .STL para poder meterlo en la impresora encargada de conformar la pieza. Como el proceso DED ya ha sido explicado en la parte inicial de este documento, en esta sección simplemente se va a introducir cuál va a ser la

máquina encargada de realizar tal labor y algunas de sus características.

La fabricación de esta pieza se realizará mediante el llamado *prototipo ATiLA*, un equipo de fabricación aditiva basado en la tecnología DED especialmente para la implementación del Ti-6Al-4V (material que se va a usar en este trabajo). Esta tecnología está desarrollada por MELTIO, una entidad que también trabaja con fabricación aditiva para metales mediante la tecnología LMD y que posee numerosas impresoras 3D para fabricación con metales. Dicho prototipo ATiLA es similar a la impresora Meltio M600. Aunque el proyecto tiene un enfoque médico debido a la implicación en el proyecto de la Fundación de Investigación del Hospital General Universitario de Valencia (FIHGUV), el objetivo sigue siendo la producción de piezas mediante fabricación aditiva.

Todo ello se enmarca en el llamado proyecto ATiLA, nacido para investigar y desarrollar un proceso AM basado en la tecnología de deposición directa de metal por hilo mediante multi láser (DED) adaptada al procesamiento del Ti64. Como ya se ha dicho, con un enfoque sanitario, siendo el objetivo la producción de prótesis personalizadas. La implicación de AIDIMME en este proyecto radica en desarrollar las tareas sobre el desarrollo de los parámetros que gobiernan el proceso, la caracterización microestructural, química y mecánica, los tratamientos térmicos y la guía de diseño para implantes médicos personalizados en Ti-6Al-4V. Además, lidera el consorcio multidisciplinar que conforma este proyecto y en el que participan entidades como la FIHGUV, MELTIO o la Universidad de Salamanca.

El prototipo ATiLA, mostrado por dentro en la Figura 3.53, es una máquina de fabricación aditiva mediante la tecnología DED que puede trabajar con numerosos materiales. La fuente de energía utilizada es, en este caso, un láser azul. El color del láser, es decir, su longitud de onda, influye enormemente durante el proceso, ya que, determinados materiales pueden reflejar parte del láser de manera que no absorben toda la energía y el proceso necesita más potencia para fundir el material. La elección del láser azul, en este caso permite que los materiales absorban muy bien la energía dirigida y se pueda trabajar con menos potencia. Por otra parte, la máquina dispone de una plataforma móvil, siendo el cabezal fijo, que puede ser de varios tamaños. En esta fabricación, se ha utilizado la bandeja más pequeña, situando la pieza al final de esta para que, en caso de que falle la fabricación, haya espacio para realizar nuevos intentos. Otras máquinas pueden mantener fija la base y mover el cabezal, una desventaja de esto es que puede perjudicar los conductos conectados al cabezal por los movimientos de este.

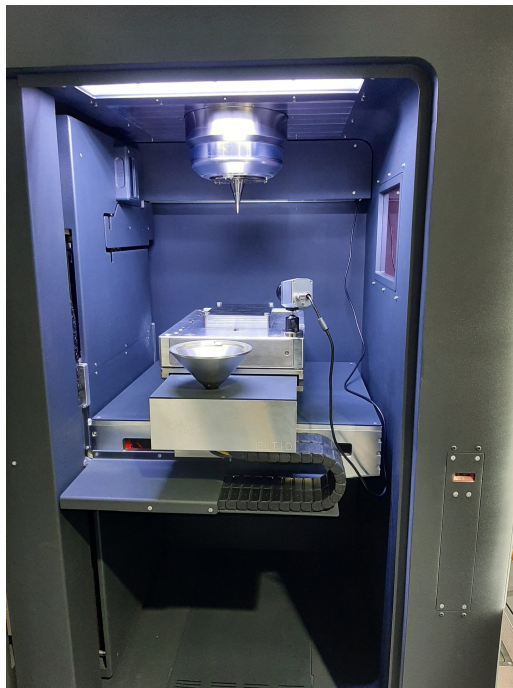


Figura 3.53: Interior del prototipo ATiLA. Fuente: Elaboración propia.

En la imagen anterior se puede observar el cabezal desmontado. En él están implementados los láseres junto con el cable de material, que se dispone en vertical en la punta de este, y al que apuntan los láseres para fundirlo.

La máquina puede trabajar con una gran variedad de materiales metálicos, no sólo con el Ti64. Sin embargo, sólo puede trabajar con un único material en cada proceso de impresión. El prototipo ATiLA posee un

compartimento inferior, donde se almacena el material en formato cable, de donde obtiene el material durante el proceso. Dicho compartimento se muestra en la Figura 3.54.



Figura 3.54: Depósito de material. Fuente: Elaboración propia.

El cable que se puede ver a la izquierda de la imagen corresponde al Titanio Grado 5 usado en este caso. A la derecha, está almacenado otra aleación de Titanio, en este caso de grado 23.

El cable del material que se esté utilizando, está conectado a un dispositivo, mostrado en la figura 3.55 en la parte superior de la máquina que, a su vez, está conectado al cabezal de impresión.

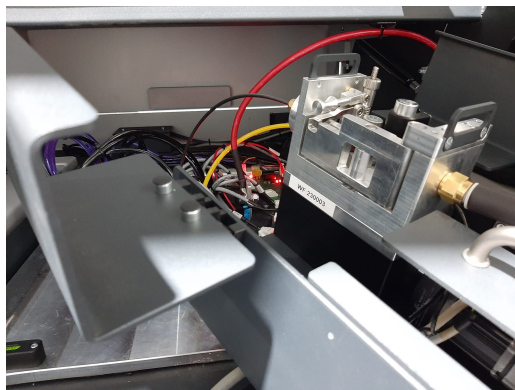


Figura 3.55: Parte superior del prototipo ATiLA. Fuente: Elaboración propia.

Durante el proceso de conformado, se ha de establecer una atmósfera protegida. Esta máquina utiliza Argón, que es inyectado de manera continua durante el proceso. Este gas noble permite proteger al titanio de que se fragilice ante la presencia de oxígeno, cuyo presencia está muy controlada durante todo el tiempo de fabricación, y, sobretodo, enfría la pieza, ya que esta puede alcanzar temperaturas de entre 700-900°C durante la deposición. Es por ello que se realizan paradas programadas durante la impresión, en las que se deja de fundir material y la pieza se enfría notablemente. Si no se hiciera esto, al estar aplicando una gran cantidad de energía de manera constante, la pieza podría alcanzar temperaturas extremas, provocando que la pieza se deforme y se abombe. Otra función extra del uso del Argón es la protección de la parte superior de la máquina de la acumulación de residuos que puedan salir de la fundición.

Ya se ha mencionado que la máquina encargada de llevar a cabo el proceso de fabricación es similar a la impresora M600 de Meltio, por lo que se van a exponer sus características para dar una idea de la idiosincrasia de ese sistema. Dicha impresora se muestra en la Figura 3.53.



Figura 3.56: Impresora M600. [9].

La M600 es una impresora industrial para fabricación aditiva con metales creada por la empresa Meltio [9]. Dicha impresora posee un gran volumen de fabricación, mucho mayor que el de la M450, además de poseer una cámara completamente inerte para conservar las propiedades de los materiales. Para la impresión, lleva incorporado un complejo proceso de control junto con avanzados sensores y monitoreamiento en tiempo real del proceso, permitiendo conformar piezas de manera constante. En cuanto a las herramientas de deposición, posee un cabezal con 3 grados de libertad y utilizar láser azul para fundir el material, que puede variar desde aceros inoxidables, aceros al carbono, aleaciones de níquel o aleaciones de titanio, entre otros. Como añadido, tiene la capacidad de trabajar con varios materiales en el mismo proceso mediante la capacidad de incorporar cables con 2 o 4 materiales, pudiendo calentarlos de antemano par mejorar el ratio de deposición. A continuación, se muestran algunas de las características de este sistema en la Tabla 3.6.

Dimensiones	1050 x 1150 x 1950 mm
Espacio de trabajo	300 x 400 x 600 m
Peso	800-1000 kg (dependiendo de las opciones implementadas)
Control del entorno	Control O2 y humedad
Tipo de Láser	Láseres de diodo directo
Longitud de onda del láser	450 nm (azul)
Potencia total del láser	1000 W
Interfaces	USB, Internet, Wi-Fi
Diámetro del cable de material	0.8 - 1.2 mm

Tabla 3.6: Características de la M600 [9]

Esta máquina ofrece una serie de valores añadidos al mercado como la facilidad para imprimir, que permite introducir el modelo y con un sólo botón se pone a trabajar, ofreciendo una experiencia más rápida, segura y productiva. También se destaca desde la empresa la reducción del mantenimiento que necesita gracias a su cabezal de deposición de alta tecnología y a su sistema de movimiento mejorado para maximizar su periodo de vida útil. Además, se destaca su facilidad de uso al incluir una serie de sistema como sensores avanzados o una interfaz de usuario simplificada para minimizar la interacción del operario con la máquina, teniendo también una fiabilidad muy alta.

Finalmente, se cargan tres archivos en la impresora, el escenario, la pieza y el material. El software de Meltio permite cambiar varios parámetros tanto geométricos como del proceso de impresión además de realizar una simulación con todas las capas de impresión. Debido a las grandes dimensiones del diseño, se opta por escalar

la pieza a un tamaño menor para que así pueda fabricarse en un tiempo menor. Esta modificación se puede comprender desde el punto de vista que la pieza realmente no se va a montar en un helicóptero sino que se trata de mostrar el concepto del diseño para fabricación aditiva. De esta manera, el tiempo de impresión estimado será de 3 horas y media aproximadamente. Como dato, el tiempo de fabricación de la pieza completa llevaría unas 8 horas.

Con todos estos parámetros establecidos, comienza la fabricación del componente. En la Figura 3.56 se puede ver el proceso real de fabricación de la pieza, donde se está fundiendo material de manera constante mientras se deposita.



Figura 3.57: Proceso de fabricación. Fuente: Elaboración propia.

Esta impresora tiene una pantalla táctil a su derecha donde se indican varios parámetros como el nivel de oxígeno o la cantidad de Argón inyectado además de una representación del progreso de construcción del modelo, como se puede observar en la Figura 3.57. También posee una serie de cámaras desde donde se puede observar el proceso en tiempo real desde diferentes ángulos.



Figura 3.58: Pantalla táctil de la impresora. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo se pueden encontrar más imágenes de la impresora y del proceso de fabricación.

Capítulo 4 Conclusiones

Para cerrar esta parte del trabajo y obtener un punto de vista más global, se va a hacer una recapitulación de todo lo expuesto hasta este momento para obtener una serie de conclusiones finales a partir de todo ello incluyendo una serie de apreciaciones y aclaraciones sobre el trabajo.

En un primer momento, se ha hecho una disertación sobre en qué consiste la fabricación aditiva así como las principales tecnologías AM que existen en el mercado, siendo algunas más utilizadas que otras. Se ha podido observar cómo es el proceso de trabajo de cada una de ellas y el nicho específico en el que se encuadran dentro de la industria. Entre ellas, se encuentra la tecnología de deposición de energía dirigida (DED) que es la tecnología concreta que se ha utilizado para conformar la pieza de estudio. Por otra parte, se ha podido apreciar la gran variedad de materiales que se pueden trabajar con estas tecnologías, que supone una gran ventaja respecto a los métodos tradicionales de fabricación, desde plásticos o polímeros, usados en tecnologías como Binder Jetting o Vat Photopolymerization, hasta metales y aleaciones utilizadas en Powder Bed Fusion Technologies o Directed Energy Deposition. Se ha visto que la fabricación aditiva es una tecnología realmente útil debido a la capacidad de creación de piezas y partes de geometría complejas que mediante otros métodos de fabricación sería realmente complicado reproducir, consiguiendo además una reducción de los tiempos de conformado y entrega debido a la manera en la que trabajan estas máquinas y la capacidad de establecerse en lugares más allá de los talleres. Sin embargo, vienen con una serie de inconvenientes como la incapacidad, por el momento, de establecer cadenas de producción en masa de piezas mediante fabricación aditiva debido a que el tiempo de producción aumentaría demasiado, siendo idóneas para volúmenes de fabricación más pequeños y personalizados. También algunas de estas tecnologías pueden presentar problemas de resolución en cuanto a acabado y pueden requerir un post procesamiento para afianzar sus características. Finalmente, su mayor inconveniente es la gran inversión que requieren, tanto en la adquisición de toda la maquinaria como en el mantenimiento de la infraestructura. Cabe mencionar también que, de cara al futuro, expertos han recomendado encarecidamente realizar una serie de estándares para estas tecnologías y proteger también la propiedad intelectual. Finalmente, se ha podido comprobar que una práctica realizada en la industria consiste en combinar la fabricación aditiva con los procesos tradicionales de mecanizado, aprovechando así las sinergias de ambos procesos de fabricación, un proceder que se considerará aplicable al caso práctico de estudio posterior.

En cuanto al caso de estudio que atañe a este trabajo de fin de grado, dicho estudio se ha basado en la elaboración de un proceso de diseño y optimización de una pieza susceptible de poder ser rediseñada para ser fabricada mediante tecnologías AM. Para ello, se ha comenzado con una búsqueda bibliográfica de piezas candidatas para el trabajo, a partir de la cuál se ha obtenido un diseño conceptual al que se le ha otorgado una posible aplicación dentro del mundo aeronáutico, permitiendo así, establecer una serie de dimensiones y solicitaciones para realizar el estudio. De esta manera, primero se ha modelado la pieza original y se ha sometido a un análisis de elementos finitos para realizar futuras comparaciones. A partir de ese punto, se ha realizado la optimización topológica de la pieza, obteniéndose así un diseño que se ha tomado como base para la realización de un nuevo modelo de la pieza con una reducción notable de material. Finalmente, se ha debido de adaptar este segundo modelo a los requisitos de fabricación, obteniéndose una nueva pieza que también se ha debido analizar mediante un estudio de elementos finitos para comprobar que las modificaciones no han perjudicado gravemente el comportamiento de la pieza y que ésta ha mantenido su funcionalidad.

De la comparación del modelo original, se ha podido comprobar que la reducción de masa llevada a cabo provoca que la pieza sufra desplazamientos mayores que la pieza original, pero a pesar de ello, siguen siendo lo suficientemente pequeños como para considerarse asumibles, pues el incremento respecto del modelo inicial son 0.4 mm aproximadamente, además, las tensiones quedan distribuidas de manera muy similar sin sobrepasar los valores críticos del Titanio 64, de manera que ni se romperá la pieza, ni se deformará plásticamente. Además, la fuerza de reacción generada a lo largo de la pieza es moderada. Por todo ello, al mantenerse la pieza dentro de unos límites razonables, tanto de desplazamiento como de tensiones aplicadas, habiendo reducido la cantidad

de material del modelo de manera considerable como se puede apreciar en las imágenes, se considera aceptable esta primera optimización de la pieza.

Por otra parte, debido al modo de trabajo de la máquina de impresión, ha sido necesario adaptar este modelo optimizado según una serie de directrices de fabricación. Se ha comprendido pues, la importancia de respetar el ángulo máximo de desmoldeo en función de la dirección de fabricación escogida ya que, si no se respeta, podrían producirse desprendimientos durante el proceso de conformado y la fabricación de la pieza sería un fracaso. Por ello, es muy importante saber con qué dirección de fabricación se está trabajando. Además, la realización de un nuevo diseño al añadir cuerpos y soportes a la pieza da lugar a un modelo más distinto al que se pretendía llegar en un primer momento, por ello, es interesante realizar un tercer diseño a partir de este último que se va a producir en la impresora. Mediante mecanizado, se podría trabajar la pieza salida de la máquina, eliminando material. Debido a ello, se puede hacer un tercer diseño, como se ha comentado, dando lugar a la pieza final. Es muy importante, durante este último proceso de diseño trabajar con cautela, asegurándose que todas las modificaciones que se están realizando sobre el diseño salido de la máquina se pueden conseguir eliminando material, prestando especial atención a posibles modificaciones que, sin pretenderlo, requieran un volumen que no está en la pieza. Para acabar, es importante realizar un análisis de elementos finitos de este diseño final para comprobar que la buena funcionalidad de la pieza no se haya perdido y que no se está fabricando una pieza que ya no soporta las cargas.

Tras realizar este análisis, se ha obtenido un desplazamiento menor que en el modelo optimizado debido a la nueva distribución del material y del hecho de que se ha reforzado la parte central, reduciéndose también las tensiones de Von Mises al tener una pieza más rígida que en el caso anterior. Al comprobar que los valores entran dentro de lo considerado aceptable, se da por finalizado el diseño de la pieza.

Durante la realización de este trabajo se ha ido viendo cómo es un proceso de diseño de una pieza para fabricación mediante tecnología DED. Se ha mostrado cómo ésta, permitiendo diseños con reducción del material utilizado, necesita que su diseño esté trabajado y adaptado a la máquina en la que se va a trabajar. En otras tecnologías como PBF, la libertad en el diseño es mayor, pudiendo crear formas más orgánicas y complejas que en DED. No obstante, el tamaño de las piezas fabricadas mediante esta tecnología (PBF) es generalmente menor que en DED, además de tener un acabado superficial distinto. Por otra parte, debido al acabado de la tecnología DED y a las modificaciones al diseño que hay que aplicar, es muy habitual aplicar un mecanizado posterior a la pieza salida de la impresora para alcanzar el diseño deseado. El coste temporal puramente de fabricación incluye desde pocas horas hasta medio día dependiendo del tamaño de la pieza. Otros métodos, como el ya mencionado PBF, se podrían extender incluso más tiempo, llegando a tardar varios días en fabricar completamente la pieza debido a la puesta en marcha de la máquina, la creación de una atmósfera deseada y el enfriamiento o tratamientos térmicos posteriores. En cuanto a las prestaciones de la pieza, el material utilizado influye muy positivamente en ellos, debido a su gran resistencia al tratarse de una aleación de titanio, razón por la que en ningún momento ninguno de los diseños ve comprometida su funcionalidad.

Finalmente, siempre es beneficioso comentar ciertos aspectos de la realización del trabajo o qué partes podrían ser mejoradas, ya que el punto de partida del estudiante es un nivel relativamente bajo en este campo del diseño industrial, debido a que no es una materia que se trate en profundidad durante el grado. Por ello, al final del trabajo se dispone de una visión más amplia y se pueden apreciar aspectos que podrían ser modificados o mejorados. Sin embargo, lo más importante a destacar es la manera en que ha sido realizado el proceso de diseño. Si bien ha sido supervisado y aprobado por una entidad como AIDIMME, para otras aplicaciones de fabricación aditiva, es habitual trabajar con diseños más orgánicos (opción que, como se ha visto, no es viable para la técnica DED), como el que se obtiene directamente de la optimización topológica, a partir de los cuales se puede trabajar directamente mediante las herramientas de diseño correspondientes, creando nuevas uniones o dando forma al conjunto. Sin embargo, para ello es necesario un tipo de software (y las licencias que van asociadas) que en el ámbito académico no son muy frecuentes, especialmente para un campo tan específico y novedoso como la fabricación aditiva. Un ejemplo de ello puede ser el programa Inspire Altair o el módulo de fabricación aditiva de NX, con los que además se puede simular el proceso de impresión, destacando que todo ello requiere un nivel alto en el dominio de dichos software. Dicho todo esto, en este estudio se ha hecho un diseño válido para fabricación aditiva partiendo de las herramientas y conocimientos que disponían, expandiéndolos y tratando de aprender a medida que se iba desarrollando el proyecto, entrando en contacto con el proceder de la industria en este campo de diseño. Como propuesta de mejora, sería interesante elaborar un nuevo diseño optimizado de la pieza trabajando esta vez con un diseño más orgánico directamente obtenido de la optimización topológica, probando otras técnicas de fabricación aditiva. Por otra parte, siguiendo en la línea del proceder de este documento, sería interesante probar a refinar la malla del análisis de elementos finitos en las zonas más problemáticas, o cambiar el tipo de elemento para tratar de obtener resultados todavía más precisos. También se podría tratar de determinar con más rigor las fuerzas que actúan sobre la pieza aunque,

como ya se ha explicado, dependiendo de la aplicación, puede llegar a ser extremadamente complicado y requerir mucho más tiempo. Todo ello, daría lugar a un estudio más profundo con una inversión de tiempo mucho mayor.

Para concluir, se puede afirmar que se han cumplido los objetivos, tanto bibliográficos como prácticos, establecidos en la primera sección de este documento. Aunque siempre hay lugar para proponer mejoras en ciertos aspectos, el estudio realizado sirve, por una parte, para dar a conocer la fabricación aditiva y sus diferentes disciplinas y, por otra, para mostrar cómo puede ser un proceso de diseño industrial para un componente, en este caso, de una aeronave para ser fabricado mediante una técnica AM junto con los estudios estructurales pertinentes. Todo ello otorga al trabajo una profundidad considerable, abierta siempre a ser mejorada mediante diferentes aspectos como los expuestos anteriormente.

Capítulo 5 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Los objetivos de desarrollo sostenible son una serie de metas globales adoptadas por líderes de todo el mundo en 2015, conformando así la agenda de desarrollo sostenible conocida como Agenda 2030. De esta manera, se definen como un plan para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos. Cada uno de estos objetivos contiene metas particulares que se han de alcanzar para el año 2030. Para que ello sea posible, todo el mundo debe realizar su parte, por ello, en la Tabla 5.1 se establecerá en cuales de los 17 objetivos de desarrollo sostenible se encuadra este trabajo.

Objetivos de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No procede
1.Fin de la pobreza				X
2.Hambre cero.				X
3.Salud y bienestar.				X
4.Educación de calidad.			X	
5.Igualdad de género.				X
6.Agua limpia y saneamiento.				X
7.Energía asequible y no contaminante.				X
8.Trabajo decente y crecimiento económico.				X
9.Industria, innovación e infraestructuras.	X			
10.Reducción de las desigualdades.				X
11.Ciudades y comunidades sostenibles.			X	
12.Producción y consumo responsables.	X			
13.Acción por el clima.				X
14.Vida submarina.				X
15.Vida de ecosistemas terrestres.				X
16.Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
17.Alianzas para lograr objetivos.				X

Tabla 5.1: Evaluación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en diferentes niveles de prioridad.

A continuación, se procede a explicar más detalladamente la relación del trabajo con los ODS que presentan una mayor afinidad con el mismo.

5.1. Industria, innovación e infraestructuras

Este objetivo se define como aquel que pretende modernizar y renovar la industria de una manera sostenible mediante la construcción de infraestructuras resilientes. El mundo es un lugar cada vez más cambiante, generando desigualdades y agravando el cambio climático. El declive de la industria manufacturera mundial ha sido constante durante los últimos años, incluso anterior a la pandemia de COVID-19, debido a la inflación, la crisis energética, los aranceles y las tensiones comerciales así como las interrupciones en el suministro de materias primas y productos intermedios, desacelerando así la economía mundial. Por ello, es necesario crear un sistema industrial sostenible basado en la investigación, la modernización y la innovación.



En este contexto aparece la fabricación aditiva, un nuevo sistema de manufacturación más rápido, sostenible e innovador. Mediante la implementación de los diferentes procesos AM se puede conseguir la modernización de la industria, contribuyendo a acelerar el desarrollo económico así como poder implementar nuevos diseños en la industria, tanto aeronáutica, automotriz o médica, promoviendo el desarrollo tecnológico y la innovación. Además, esta tecnología resulta más sostenible y eficiente, ya que, mediante los métodos sustractivos tradicionales se genera mucho material de deshecho, en la fabricación aditiva se utiliza sólo el material necesario.

5.2. Producción y consumo responsables

El objetivo de desarrollo sostenible número 12 busca crear un sistema de producción sostenible y conseguir así mantener los medios de subsistencia de las generaciones actuales y futuras. El incremento de la población y la reducción de los recursos puede llegar a crear una gran crisis global en las futuras décadas por la escasez de recursos naturales que permitan mantener los estilos de vida actuales. Para tratar de evitar todo esto, sería necesario reducir los niveles de consumo actuales, cambiando los hábitos y tomando medidas para buscar sistemas sostenibles.



Como se ha comentado anteriormente, la fabricación aditiva supone uno de estos nuevos sistemas de producción sostenibles, ya que, mediante la optimización de los diseños, se puede lograr la creación de piezas funcionales con una cantidad de material mucho menor, haciendo, de esta manera, un uso más eficiente de los recursos y los materiales, que es lo que se ha mostrado en este trabajo. Además, el material que no se haya utilizado, es susceptible de ser usado en otros casos.

Parte II

Pliego de condiciones

Capítulo 6 Pliego de condiciones

El pliego de condiciones es el documento contractual donde se recogen los derechos, obligaciones y responsabilidades mutuas entre la empresa contratista y la empresa contratante. A continuación, se desarrollarán las todas las condiciones utilizadas durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado para asegurar su reproducibilidad o para disponer de una referencia en caso de que dichas condiciones sean modificadas.

6.1. Objeto

La redacción de este documento se va a realizar con el propósito último de establecer una serie de pautas y condiciones que aseguren un adecuada ejecución de los procedimientos detallados. Se trata, por tanto, de establecer una serie de responsabilidades mutuas entre la empresa contratista y la contratante, donde la empresa contratista sería, en este caso, la encargada de fabricar la pieza en cuestión.

Será necesario establecer una serie de condiciones técnicas, legales, facultativas y económicas. Las condiciones técnicas determinarán los requisitos necesarios para una correcta fabricación de la pieza, incluyendo los controles de calidad y así como las condiciones de los materiales y el equipo utilizado. Por su parte, las condiciones legales estipularán los límites de cada una de las partes involucradas en el contrato. Las condiciones facultativas detallarán las tareas de las partes así como los tiempos del proyecto. Finalmente, se detallarán unas condiciones económicas que se deberán respetar.

En el caso se presente algún aspecto no especificado adecuadamente en el siguiente Pliego de Condiciones, se deberá atender a las normas de buena práctica.

6.2. Condiciones técnicas

6.2.1. Condiciones de los materiales

El material con el que se habrá de realizar la pieza es la aleación de Titanio 64 en formato cable para su uso en la impresora dedicada a conformar la pieza mediante la técnica de fabricación aditiva Directed Energy Deposition.

Durante la compra de este material, se exigirá a los proveedores un contrato que garantice la buena calidad del material, respetando cuidadosamente su composición química, propiedades de la aleación y diámetro del cable. Este, deberá ser entregado por el proveedor y, posterior a su recepción, se deberá realizar un conjunto de pruebas para corroborar que el material se ajusta a las especificaciones expuestas en el contrato.

6.2.2. Condiciones de transporte

Tras la conformación de la pieza, se deberán realizar las comprobaciones que correspondan para asegurar su comportamiento y posteriormente, se preparada para su transporte. Durante esta etapa, la pieza deberá ser guardada en un contenedor con el debido amortiguamiento para evitar fracturas o desperfectos durante el trayecto. Una vez terminado este, se sacará la pieza y se comprobará que no haya ningún desperfecto.

6.2.3. Condiciones de seguridad

A continuación, se determinarán qué acciones preventivas se habrán de adoptar durante el proceso de fabricación para evitar daños o lesiones al operario.

Seguridad personal

El operario encargado de interactuar con la máquina impresora tanto para su mantenimiento, como para retirar la pieza una vez haya acabado el proceso, deberá llevar un equipo de seguridad acorde para evitar lesiones de cualquier tipo, ello incluye guantes, gafas protectoras, máscara, vestimenta anti-quemaduras y todo aquel equipo que se considere necesario.

Control de la seguridad

Será imprescindible la instalación de sensores y monitores que permitan detectar cualquier posible inconveniente que pueda derivar en un problema mayor como un incendio o cortocircuito. Además, deberá haber en la sala un extintor en caso de emergencia.

Formación del personal

Todo aquel que vaya a manipular la máquina o se encuentre presente en la sala deberá conocer de antemano el funcionamiento de esta así como los posibles riesgos y protocolos de actuación ante cualquier tipo de emergencia.

6.2.4. Condiciones de equipo

En esta sección se van a detallar los diferentes equipos utilizados para el desarrollo de la actividad con el objetivo de servir de referencia a la hora de querer replicar el estudio.

Hardware

Para la realización tanto del diseño de la pieza como de la optimización topológica, se ha utilizado un portátil de gama media, fácil de encontrar en el mercado, sus características se detallan a continuación:

- **Sistema operativo:** Windows 11 Home.
- **Procesador:** 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.40 GHz.
- **RAM instalada:** 12,0 GB (11,7 GB usable).
- **Tipo de sistema:** Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64.
- **Lápiz y entrada táctil:** La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla.

Para la realización de los análisis de elementos finitos se ha utilizado un equipo de sobremesa en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. La razón del cambio radica en la presencia de una Licencia NX 12 presente en estos equipos que permiten al usuario efectuar análisis de elementos finitos.

- **Sistema operativo:** Windows 11 Home.
- **Procesador:** Intel(R) Xeon(R) Gold 6154 CPU @ 3.00GHz 2.99GHz (3 procesadores).
- **RAM instalada:** 26,0 GB.
- **Tipo de sistema:** Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64.
- **Lápiz y entrada táctil:** La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla.

Para la fabricación de la pieza, se ha utilizado el prototipo ATiLA presente en las instalaciones de AIDIMME. Sus especificaciones no están disponibles, pero se podría establecer un símil con la impresora M600 de la empresa MELTIO.

Software

Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado se han utilizado los siguientes programas informáticos aunque algunos no se hayan visto plasmados en este documento:

- SIEMENS NX Student Edition.
- SIEMENS NX 2312.
- Wolfram Mathematica 13.3.
- Overleaf.

6.3. Condiciones legales

6.3.1. Contratista

El contratista será el encargado de asegurarse de que el modelo es fabricado correctamente, siguiendo las pautas estipuladas en el contrato y haciéndose cargo de cualquier tipo de percance que pudiera surgir durante el transcurso de la actividad.

El contratista estará obligado, por tanto, de disponer de los recursos necesarios para la realización del trabajo, tanto a nivel de personal como material, proporcionando el equipo adecuado a sus empleados y un lugar de trabajo adaptado a las necesidades.

Además, deberá adaptarse a la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales, por la que, textualmente,

"Se determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo."

De acuerdo con todo ello, el contratista será responsable de cualquier daño o perjuicio ocasionado durante el desarrollo de la actividad, garantizando la seguridad y haciéndose cargo de cualquier tipo de indemnización.

6.3.2. Contrato

El contrato es el documento donde se detallarán todas las etapas del proceso incluyendo tiempos, gastos, equipo y las condiciones de trabajo. Cualquiera de las dos partes estará en derecho de solicitar que el contrato quede todo por escrito. Dicho documento deberá ser redactado de acuerdo con el Código Civil español

Antes de ser firmado, ambas partes deberán haberlo leído, comprendido y aceptado para que pueda darse por válido. Una vez se ha producido el acuerdo, existe la posibilidad de ser revocado si existe un consenso entre ambas partes.

6.4. Condiciones facultativas

6.4.1. Dirección técnica

La dirección técnica poseerá la capacidad de tomar decisiones durante el desarrollo de la actividad pudiendo introducir modificaciones en el diseño, plazos u otros aspectos. Dicha autoridad recaerá sobre la parte contratante pudiendo ser relegada si así lo desea sobre otra persona o entidad.

Esta toma de decisiones deberá realizarse con el consenso de la parte contratista y con la justificación pertinente, asegurándose de que ésta se puede adaptar a los cambios. Además, se deberán comunicar con su debida antelación.

6.4.2. Contratista

La parte contratista será la encargada de fabricar el modelo final y/o llevar a cabo todo el proceso de diseño.

Estará en su deber presentar un plan de trabajo al comienzo del proyecto y supervisar constantemente que se están cumpliendo los objetivos estipulados en el contrato dentro de los tiempos establecidos. Además, deberá asegurar la calidad de los materiales y proporcionar un lugar de trabajo perfectamente equipado, seguro y funcional.

Si el contratante solicita revisar una cierta fase del proyecto o realizar una visita a las instalaciones, la parte contratista se verá obligada a responder a tales demandas reservándose el derecho de establecer la fecha de realización. En caso de una visita, deberá asegurar que ésta se realiza dentro de los estándares de seguridad pertinentes, proporcionando información de aquello que se le solicite.

6.4.3. Material e infraestructura

Antes de la firma del contrato, el contratista deberá disponer de todos los recursos necesarios para el correcto desarrollo de la actividad o, al menos, comprometerse a disponer de ellos para la fecha en la que se vaya a iniciar

el proyecto.

Una vez reunidos todos los equipos y el material necesario, se realizará una inspección previa obligatoria, tras la cual, y si es superada, podrá da comienzo la actividad.

6.4.4. Desarrollo de la actividad

Todo el proceso de trabajo deberá ser realizado según lo acordado en el contrato firmado por ambas partes, en él, se indicarán las fases y tiempos de producción que haya establecido la parte contratante y haya sido aceptado por la parte contratista.

A lo largo del proyecto, se irán realizando supervisiones del trabajo realizado para corroborar que se están siguiendo unas pautas y se están alcanzando los objetivos iniciales. Durante este tiempo, la parte contratante podrá introducir modificaciones en forma de nuevos objetivos, alteración de las etapas de trabajo o de los tiempos de producción, si son debidamente justificados, que deberán asumirse por parte de la parte contratista.

6.4.5. Entrega final

Tras la fabricación y el post procesado se deberán realizar una serie de comprobaciones para asegurar que el producto final cumple con los objetivos iniciales, modificando el producto y realizando nuevas comprobaciones si esto no es así. Posteriormente, la parte contratista deberá hacer llegar el producto final al cliente. Cuando este lo reciba, firmará el documento correspondiente para justificar su recepción.

6.4.6. Control de calidad

La calidad del producto final será responsabilidad de la parte contratista y deberá responder ante la parte contratante o el cliente si no se llegan a unos mínimos, haciéndose responsable de las modificaciones específicas que requiera realizar para llegar a unos mínimos de calidad.

La adopción de un sistema de gestión de calidad deberá realizarse conforme a la norma **ISO 9001:2015**. De esta manera, se adoptará un sistema de gestión de calidad que permita a la parte contratista adaptarse a las necesidades de los clientes.

Por otra parte, para asegurar un buen proceso de diseño y un buen nivel de seguridad durante el trabajo con máquinas de fabricación, se deberá atender a la norma *ISO 12100:2010* sobre seguridad de las máquinas: principios generales de diseño, evaluación y reducción de riesgos.

6.4.7. Garantía

La pieza fabricada tendrá una garantía de 2 años a partir del momento en el que se haya firmado el documento de recepción por parte del cliente. Se realizará de acuerdo con la Directiva 2019/771 sobre contratos de compraventa de bienes, por la que se establece una garantía mínima de 2 años.

Durante ese periodo de tiempo, la parte contratista poseerá la responsabilidad de asumir cualquier modificación o reparación de la pieza, llegando incluso a reemplazarla si así se requiere. No obstante, esta garantía no se aplicará si se ha realizado alguna modificación sobre la pieza final o se le ha dado un uso indebido, liberando a la parte contratista de cualquier responsabilidad con dicho producto.

6.4.8. Certificación y aeronavegabilidad

Debido a que se trata de un componente aeronáutico, deberá cumplir con una serie de requisitos adicionales.

De acuerdo con el **Reglamento 748/2012** de la EASA, se deberá certificar la aeronavegabilidad inicial del componente. Este reglamento desarrolla un Anexo, concretamente la Parte 21, donde se desarrolla las especificaciones de certificación (CS) de Aeronaves y productos.

El mantenimiento de la misma estará integrada en el mantenimiento de aeronavegabilidad continuada de una aeronave según dicta el **Reglamento (UE) 1321/2014**.

6.5. Condiciones económicas

En este apartado se va a exponer una serie de responsabilidades económicas que se deberían asumir al llevar a cabo el proyecto. No obstante, cabe recalcar que para el caso desarrollado en este documento, la integridad de los gastos ha sido asumida por la empresa fabricante y no se ha obtenido un beneficio económico o industrial por la realización del proyecto.

6.5.1. Presupuesto

Los costes de fabricación deben ser expuestos previo a la firma del contrato en un documento con el presupuesto total del que se dispone para realizar la actividad. El presupuesto podrá variar o ser revisado a lo largo de las etapas del proceso debido a modificaciones en la planificación o eventos ocasionales que pudieran dar lugar a ello, pudiendo ser asumido por la parte contratante o contratista según sea el caso.

6.5.2. Medios de producción

Como se ha mencionado en apartados anteriores, será la parte contratista la que deberá de disponer de los medios adecuados para la realización del proyecto, asumiendo la integridad de sus costes, no entrando estos en el presupuesto total a excepción del material a utilizar. No obstante, el coste asociado al uso de dichos medios de producción sí influirán en la negociación del presupuesto inicial.

6.5.3. Penalización

Existe un mecanismo de sanción a alguna de las partes implicadas si se detecta que infringe algún aspecto del contrato, siendo el caso extremo la rescisión unilateral del contrato por la parte afectada, asumiendo los costes asociados a este evento por la parte infractora.

En caso de un impago, se dispondrá de un plazo de un mes para realizar el pago. Pasado ese periodo de tiempo, la parte contratista tendrá el derecho de decidir la rescisión unilateral del contrato o no. En cualquier caso, la fianza no se devolverá y, en caso afirmativo, la parte contratante deberá abonar el equivalente a los gastos hasta dicho momento.

6.5.4. Pagos

Los diferentes pagos deberán abonarse a la parte contratista según los plazos y cantidades acordados en el momento de firmar el contrato. Además, se otorgará una fianza del 7% del total por parte del contratista que será devuelta en un plazo de un mes a partir de la firma del documento de recepción por parte del cliente.

Parte III

Presupuesto

Capítulo 7 Presupuesto

En este capítulo se pretenderá dar un valores aproximado de la cuantía total del desarrollo de este proyecto. Para ello, será necesario tener en cuenta el coste asociado a cada uno de los diferentes aspectos que forman parte del mismo. Además, se mostrará el coste de fabricación de la pieza, no sólo mediante fabricación aditiva, si no también el coste de la fabricación por mecanizado del modelo inicial, con el fin de establecer una comparación entre el coste de fabricar el modelo simplificado con el coste asociado a obtener el modelo optimizado.

Para realizar este apartado, se desglosarán los costes en: costes de personal, costes de equipo, costes de material y costes de fabricación.

7.1. Costes de personal

En esta sección se pretenderá estimar un coste aproximado asociado a la dedicación de cada una de las partes implicadas. Para ello, se hará una estimación del tiempo total dedicado a este trabajo y, por otra parte, se obtendrá un sueldo por hora orientativo tanto del estudiante como del resto de partes implicadas.

Lo primero de todo es hacer un acopio de todas las horas invertidas en este trabajo. Se estima que este proyecto ha sido realizado en el intervalo de 2 meses y medio aproximadamente por lo que, asumiendo que han habido una serie de días que, suponiendo que se ha hecho en régimen laboral, habrías que descontar los fines de semana, dando lugar a un total de 55 días laborables o, dicho de otra manera, 1320 horas. Si se considera que se le han dedicado 6 horas al día, por parte del estudiante, se estiman unas 330 horas laborables. De esas 330, se estima que 80 han sido para la revisión bibliográfica y búsqueda de la pieza, incluyendo estimación de misión, solicitudes y dimensiones, siendo las 250 restantes para el proceso de diseño y redacción del documento, pues esto se ha realizado de manera simultánea.

Un estudiante de ingeniería aeroespacial en prácticas cobra unos 500€. Si un mes tiene 120 horas laborables en jornadas de 6 horas, el sueldo por hora del estudiante sería:

$$\frac{500}{120} = 4,16\text{€/h} \quad (7.1)$$

Por otra parte, el salario medio anual de un profesor universitario en España ronda los 2500€ mensuales de media. La tarea del tutor ha sido de asistencia al estudiante, resolviendo dudas y ayudando con las gestiones asociadas al desarrollo del trabajo de fin de grado. El tiempo dedicado por parte del tutor universitario a lo largo del desarrollo del mismo se estima en unas 20 horas en total aproximadamente, lo que serían unas 8 horas al mes. Por tanto, teniendo en cuenta los supuestos anteriores, el sueldo por hora del tutor universitario sería:

$$\frac{2500}{120} = 20,83\text{€/h} \quad (7.2)$$

Finalmente, se ha contado con la asistencia y orientación de un empleado de AIDIMME durante el diseño. Esta figura ha actuado como apoyo y ha orientado al alumno durante varias partes del proceso, mediante videollamadas, resolución de dudas, revisión de los diseños y orientación general, incluyendo la fabricación de la pieza. Por tanto, se estima que esta parte ha dedicado unas 35 horas al proyecto. El sueldo de un diseñador industrial con experiencia en España puede aproximarse a los 2100€ mensuales, de manera que el sueldo unitario por hora quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{2100}{120} = 17,5\text{€/h} \quad (7.3)$$

De esta manera, los costes asociados a todas las partes implicadas quedaría como se resume en la Tabla 7.1:

Personal	Sueldo por hora €/h	Horas de trabajo	Total €
Alumno	4,16	330	1372,8
Tutor universitario	20,83	20	416,6
Asistencia AIDIMME	17,5	35	612,5
TOTAL			2401,9

Tabla 7.1: Coste de personal.

Los costes de personal suman un total de **2401,9€**.

7.2. Costes de equipo

A continuación, se procederá a ofrecer el coste asociado a la adquisición de la infraestructura que se ha utilizado, tanto para la parte de diseño, como para la fabricación de la pieza. En este caso, se han usado 2 equipos informáticos, como se ha comentado anteriormente, sin embargo, para el presupuesto se va a contabilizar sólo el ordenador personal del estudiante ya que las simulaciones de elementos finitos se pueden realizar en ese mismo equipo en caso de obtener la licencia correspondiente de NX. Asimismo, se incluirá el valor del software utilizado durante el trabajo que resulte imprescindible para su réplica.

7.2.1. Hardware

Para la realización del trabajo se ha utilizado un ordenador portátil HP con procesado Intel i5 y un ratón HP inalámbrico cuyos precios se muestran a continuación en la Tabla 7.2:

Hardware	
Portátil	599,99 €
Ratón	12,99 €
Prototipo ATiLA	228.690,00*€
TOTAL	612,98€

Tabla 7.2: Coste del hardware.

*El precio de la impresora se debe tratar de manera aproximada ya que puede variar notablemente y no es de dominio público. Esta estimación se ha realizado en base a otras similares. No obstante, se contabilizará sólo su coste asociado al proceso de fabricación con el fin de obtener un presupuesto más realista.

7.2.2. Software

Por otra parte, el coste del software se debe exclusivamente a la licencia de NX de SIEMENS. Para este trabajo, se han utilizado dos licencias simultáneamente, cada una en un equipo distinto: NX Student y NX 12. La licencia Student es una versión gratuita del programa que SIEMENS concede a las universidades, por tanto, sólo se especificará el valor de la licencia de pago. Además de ella, durante los dos meses y medio que ha durado el trabajo, se han utilizado más softwares que se van a detallar.

Software	
SIEMENS NX 12	549 €/mes
Microsoft 365	8,25 €/mes
Overleaf	0 €/mes
TOTAL	1393,13€

Tabla 7.3: Coste del software

Finalmente, los costes asociados al equipo y programas utilizados para el desarrollo de la actividad ascienden a **2006,11 €**.

7.3. Costes de material

Como ya se ha mencionado, el material con el que se va a conformar la pieza es el Ti-6Al-4V. Este material se encuentra a la venta en distintos formatos, como por barras o en polvo, dependiendo de la aplicación que se le pretenda dar. A continuación, se van a mostrar diferentes precios de esta aleación de Titanio en sus diferentes opciones de adquisición, sin embargo, habrá que tener en cuenta que, en el proyecto, se ha utilizado en formato cable y el coste final asociado al material dependerá del peso de la pieza, es decir, de la cantidad de material que se ha utilizado. Los precios de mercado de esta aleación de Titanio en distintos formatos se muestra en la Tabla 7.4.

Ti-6Al-4V	
Varilla* [7]	1762,82 €/m
Polvo** [1]	109 €/kg
Alambre*** [8]	37,49 €/kg

Tabla 7.4: Coste del Ti-6Al-4V.

*Varilla de 1m de largo y 50 mm de diámetro. **10kg de polvo con un tamaño de partícula de 20-63 μ . *** si la cantidad comprada oscila entre 100 y 499 kg.

Es importante aclarar que estos precios dependen tanto de la longitud como del diámetro o peso del formato comprado, dando lugar a posibles variaciones a la hora de su adquisición dependiendo de la aplicación que se le pretenda otorgar. No obstante, dichos valores se consideran suficientemente representativos del valor de este material.

Por otra parte, el precio del material concreto usado en la fabricación se puede ver en el apartado 7.4: Costes de fabricación. La información de esta sección queda para hacer una idea de los precios que se manejan en la compra en la web de este material.

7.4. Costes de fabricación

En este apartado, se van a exponer los costes asociados a la manufacturación de la pieza. Como ya se ha comentado, se va a realizar en el prototipo ATiLA con la aleación de Ti64. Adicionalmente, se van a exponer los costes de fabricación de la pieza original mediante mecanizado tradicional, con el fin de observar las diferencias de presupuesto, complementando así el trabajo realizado.

En primer lugar, en la Tabla 7.5, se va a presentar el presupuesto proporcionado por AIDIMME para la fabricación de la pieza a tamaño real, con Titanio en el prototipo ATiLA, con los distintos gastos asociados a este proceso desglosados.

Presupuesto fabricación	
Titanio	232,08€
Gas Argón	55,35€
Mano de obra*	64€
Equipamiento	237,60€
TOTAL	589,03€

Tabla 7.5: Presupuesto fabricación en AIDIMME.

*Preparación del fichero, preparación de la máquina y separación de la pieza de la placa.

De esta manera, el coste asociado a la fabricación de la pieza diseñada, sin contar el mecanizado posterior planteado, sería de **589,03€**.

Además, el tiempo de fabricación para esta pieza sería es de 14 horas y 41 minutos.

A continuación, y de manera adicional, se van a mostrar los presupuestos obtenidos para el mecanizado CNC de la pieza original. Durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado, se contacto con algunas empresas del sector para obtener un presupuesto aproximado para fabricar la pieza original. De esta manera, se pretendió observar la diferencia entre usar el modelo inicial con el diseño optimizado, realizado para ser fabricado mediante fabricación aditiva.

Presupuesto mecanizado		
Xometry	24 días	1269,47 €
Weerg*	20 días	1095,53 €

Tabla 7.6: Presupuesto mecanizado.

*Acero Inoxidable 303 X8CrNiS18-9.

En la Tabla 7.6 se muestran los presupuestos que ofrecieron las empresas contactadas para la fabricación de la pieza mediante mecanizado CNC, junto con el tiempo estimado de reparto. Es importante remarcar que esos precios pueden variar según la época y los plazos de entrega. Una desventaja que se observó durante la búsqueda de empresas de mecanizado es que no todas trabajan con el Ti-6Al-4V requerido para este caso, se manera que usando la aleación de Titanio el precio subiría.

De la comparación de estos dos presupuestos, se puede observar que el coste de realizar la fabricación aditiva es bastante menor. Cabe recalcar que no se ha contado el mecanizado posterior, que se debería contabilizar a parte. No obstante, tanto por el tiempo como por el gasto de material, saldría más rentable la fabricación aditiva, teniendo en cuenta, además, que sólo se está fabricando una unidad de la pieza, un aspecto que encarece notablemente el mecanizado de una pieza desde cero. Como ya se ha comentado, es muy habitual tener que mecanizar las piezas fabricadas por DED, incluso hay maquinaria, presente también en la propia AIDIMME, que combina estas dos técnicas para agilizar el proceso. No obstante, la labor de AIDIMME acaba con la fabricación de la pieza mediante DED.

7.5. Costes totales

En esta sección, se va a realizar la suma de todas las partes relacionadas con el proceso, hasta el momento de acabar la fabricación, teniendo en cuenta el beneficio que se puede sacar de la pieza a partir de su valor de venta. En la Tabla 7.7 se muestra esta cuenta.

Presupuesto final del proyecto	
Personal	2401,9€
Equipo	2006,11€
Fabricación	589,03€
Precio de venta	864,00€
TOTAL	4133,04€

Tabla 7.7: Presupuesto final.

Finalmente, el presupuesto total de todo el proceso de diseño hasta acabar la fabricación aditiva sería de **4133,04€**.

Bibliografía

- [1] Metal 3DP. Ti6al4v polvo polvo metálico con base de titanio para fabricación aditiva. <https://met3dp.com/es/producto/ti6al4v-powder/>, 2024. Consultado: 10 de julio de 2024.
- [2] Aviación al día. Las aerolíneas obtendrán un margen de beneficio neto del 2,7 <https://aviacionaldia.com/2023/12/las-aerolineas-obtendran-un-margen-de-beneficio-neto-del-27-con-ingresos-record-en-2024.html#:~:text=Aerol%C3%ADneas-,Las%20aerol%C3%ADneas%20obtdnr%C3%A1n%20un%20margen%20de%20beneficio%20neto%20del%202,con%20ingresos%20r%C3%A9cord%20en%202024&text=La%20Asociaci%C3%B3n%20de%20Transporte%20A%C3%A9reo,en%20gran%20medida%20en%202024.>, 2023. Consultado: 30 de Mayo de 2024.
- [3] Joamin Gonzalez-Gutierrez y otros Damir Godec. *A Guide to Additive Manufacturing*. Springer, 2022.
- [4] Dirección General de Aeronáutica Civil. *BELL 212/412 AOG AVIACIÓN*. Departamento de Seguridad Nacional - Subdepartamento Licencias, 2024.
- [5] Desconocido. Bell 212. https://www.wikiwand.com/es/Bell_212#introduction, 2024. Consultado: 8 de junio de 2024.
- [6] Ashley Eckhoff. Additive manufacturing + aerospace industry = efficiency. <https://blogs.sw.siemens.com/nx-manufacturing/additive-manufacturing-aerospace-industry-efficiency/>, 2018. Consultado: 30 de mayo de 2024.
- [7] Evek GmbH. Precio varilla redonda titanio grado 5. https://evек.red/titanio/694-60845-varilla-de-titanio-de-grado-5-de-titanio-ti6al4v-barra-redonda-de-titanio-37164-dia-20-200mm-eje-s-lido-01-25-metros.html#/12-largo-1_meter/108-talla-90mm, 2024. Consultado: 10 de julio de 2024.
- [8] Made in China. Alambre de titanio precio fábrica precio por kg gr5 ti-6al-4v titanio cable. https://es.made-in-china.com/co_lycombat/product_Titanium-Wire-Price-Factory-Price-Per-Kg-Gr5-Ti-6al-4V-Titanium-Wire_yseeusonig.html, 2024. Consultado: 10 de julio de 2024.
- [9] Meltio. Meltio m600. <https://meltio3d.com/metal-3d-printers/meltio-m600/>, 2024. Consultado: 9 de julio de 2024.
- [10] Meltio. *Meltio Titanium Datasheet*. Meltio, 2024.
- [11] Carlota V. The complete guide to directed energy deposition (ded) in 3d printing. <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/#!>, 2019. Consultado: 10 de junio de 2024.

Parte IV

Anexos

Capítulo A Análisis de elementos finitos (malla 2mm)

En este anexo simplemente se van a adjuntar más capturas de los resultados de las simulaciones para dar una visión más global del resultado.

A.1. Modelo inicial

A.1.1. Desplazamiento

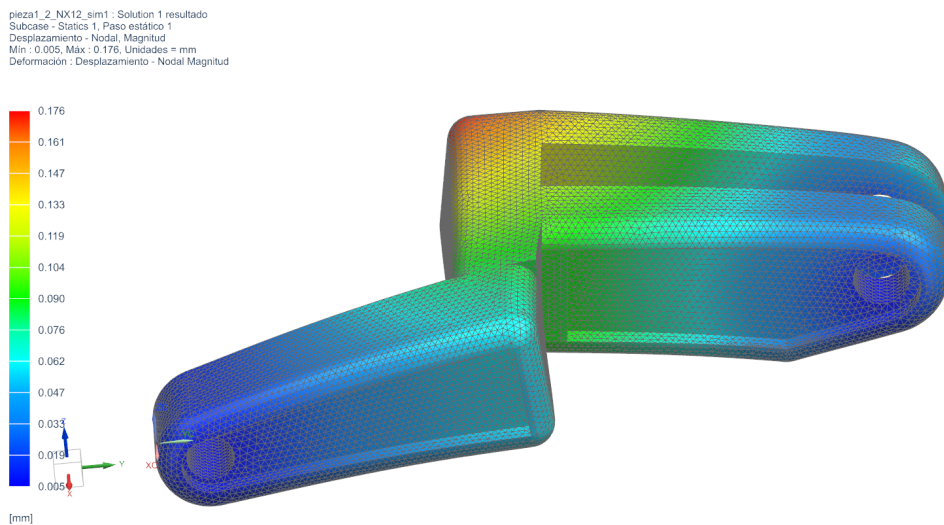


Figura A.1: Desplazamiento

A.1.2. Von Mises

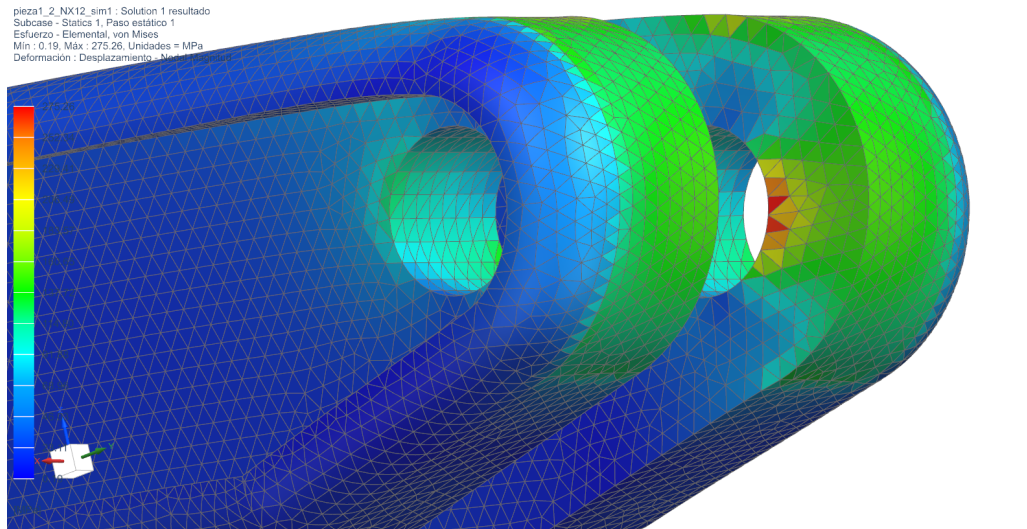


Figura A.2: Distribución de la tensión de Von Mises

A.1.3. Fuerza de reacción

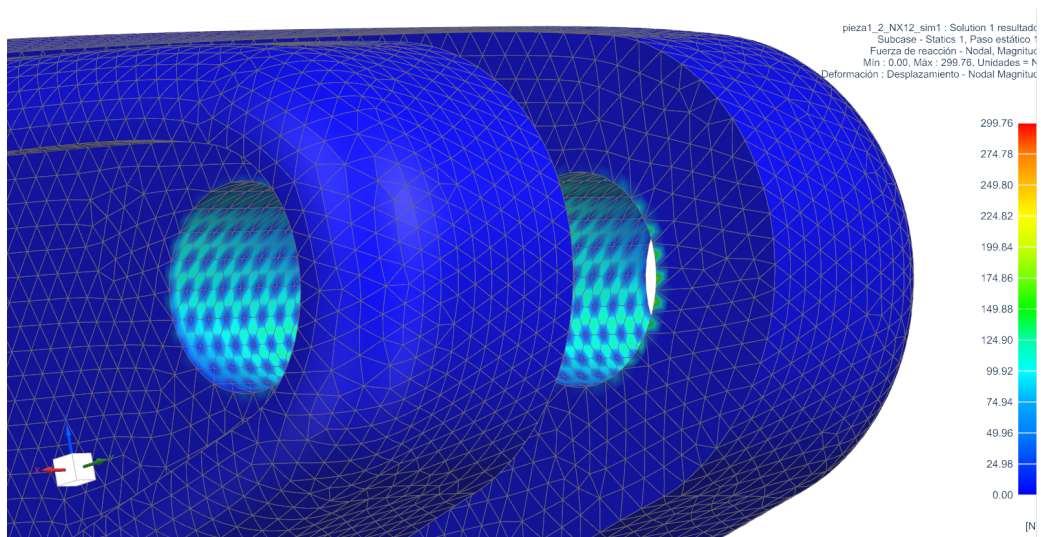


Figura A.3: Fuerza de reacción

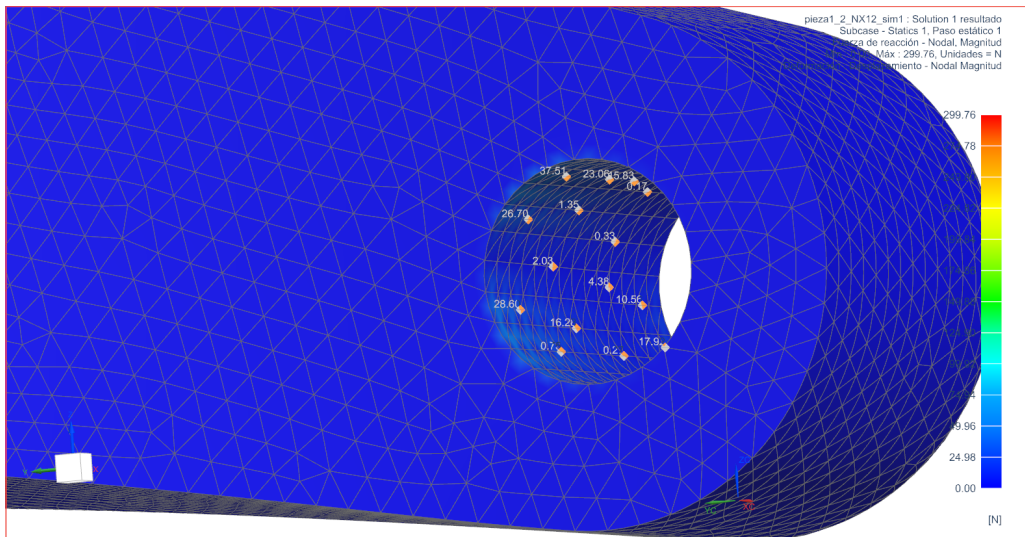


Figura A.4: Fuerza de reacción

A.2. Modelo optimizado

A.2.1. Desplazamiento

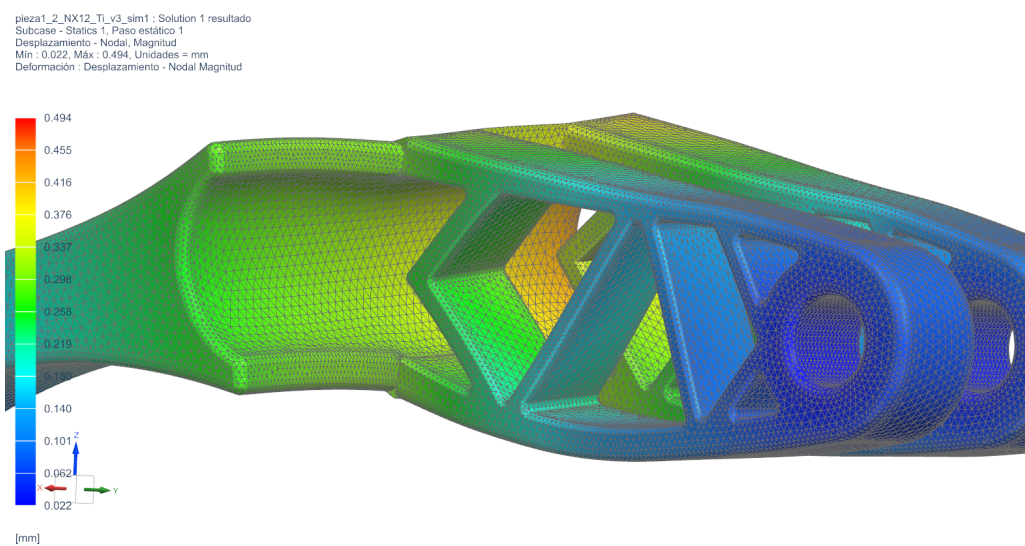


Figura A.5: Desplazamiento

A.2.2. Von Mises

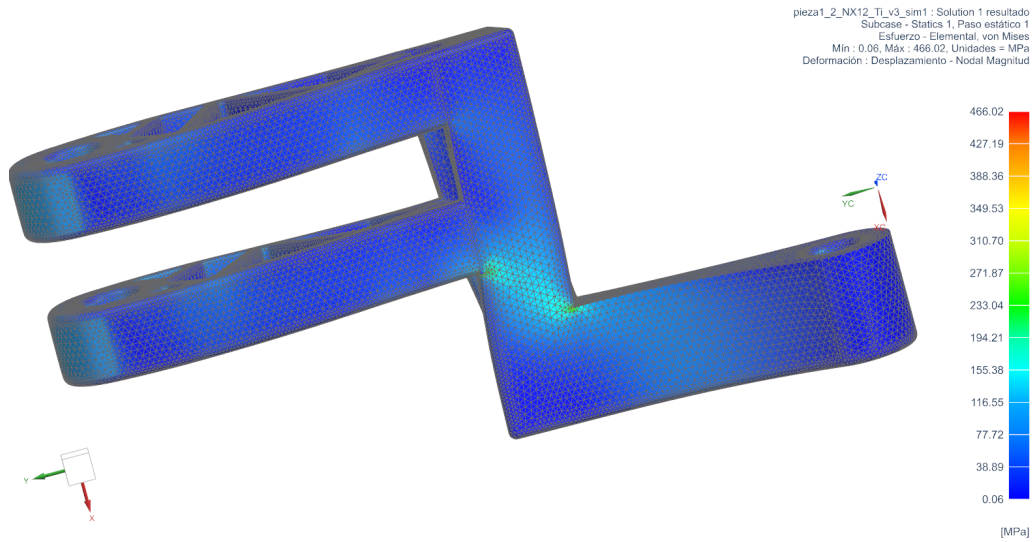


Figura A.6: Distribución de la tensión de Von Mises

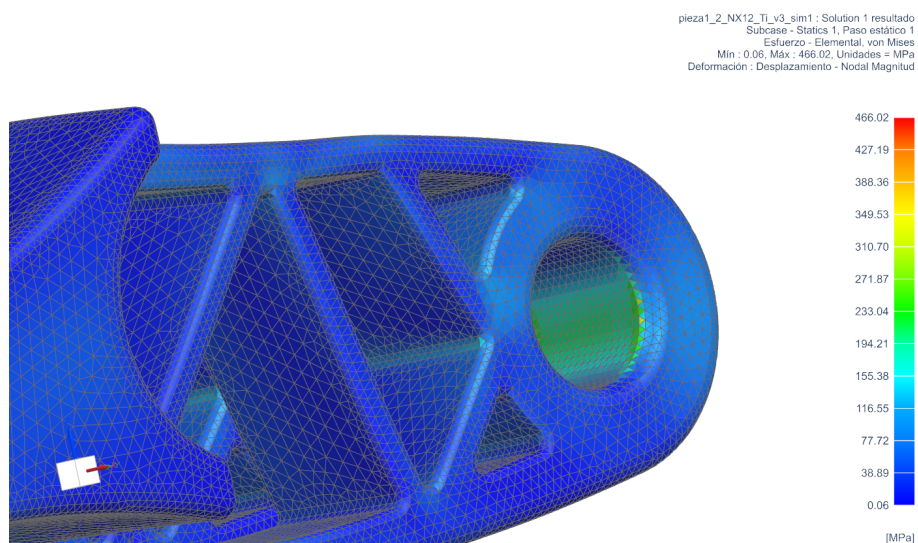


Figura A.7: Distribución de la tensión de Von Mises

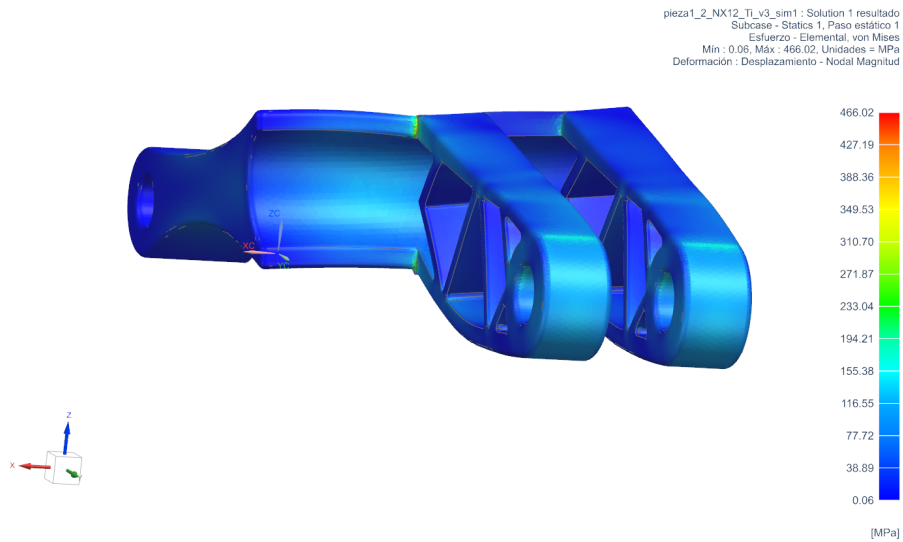


Figura A.8: Distribución de la tensión de Von Mises

A.2.3. Fuerza de reacción

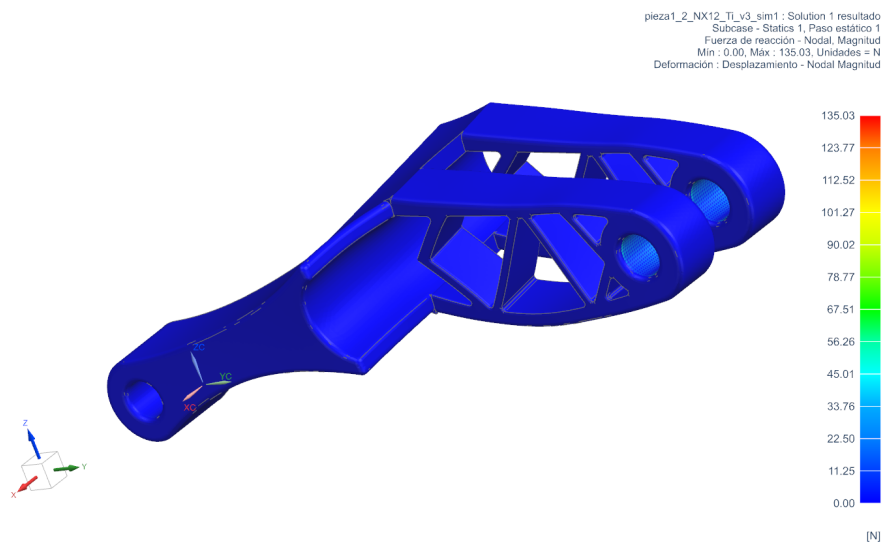


Figura A.9: Fuerza de reacción

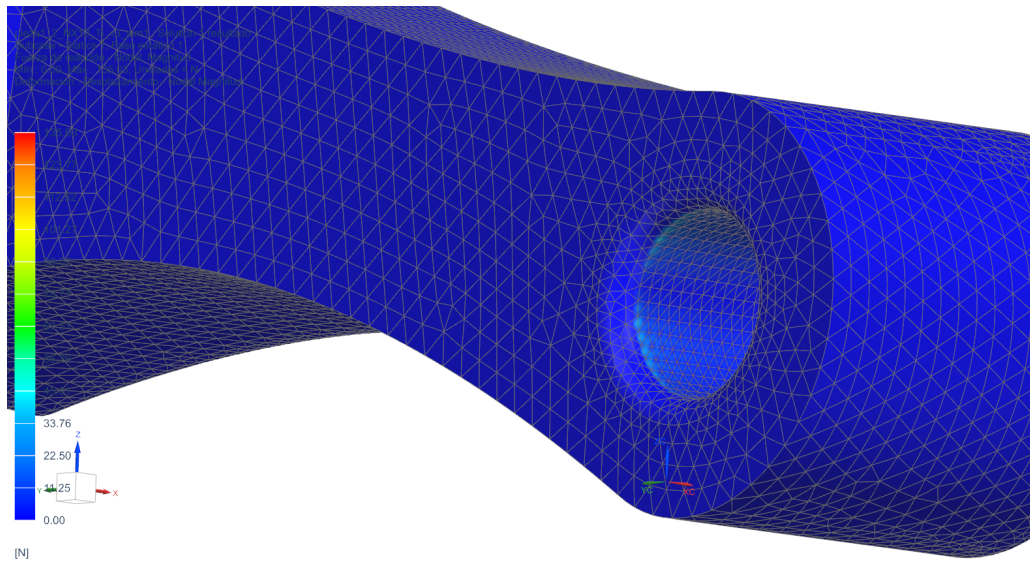


Figura A.10: Fuerza de reacción

A.3. Modelo final

A.3.1. Desplazamiento

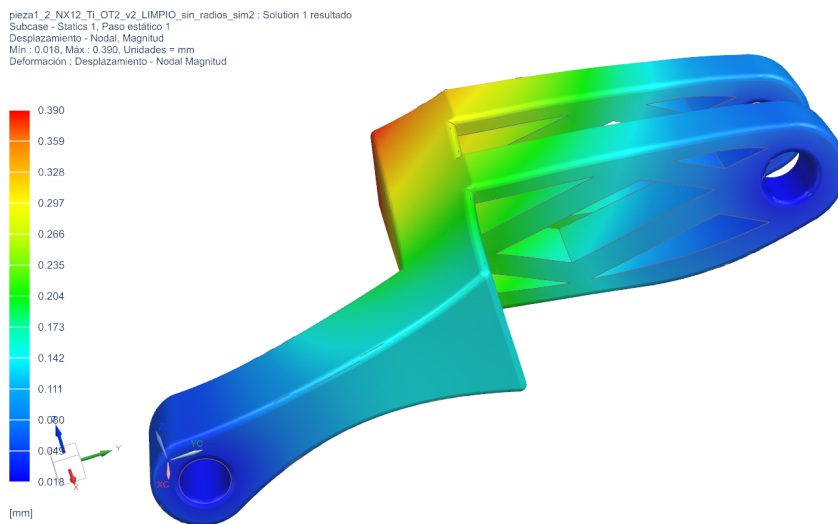


Figura A.11: Desplazamiento

A.3.2. Von Mises

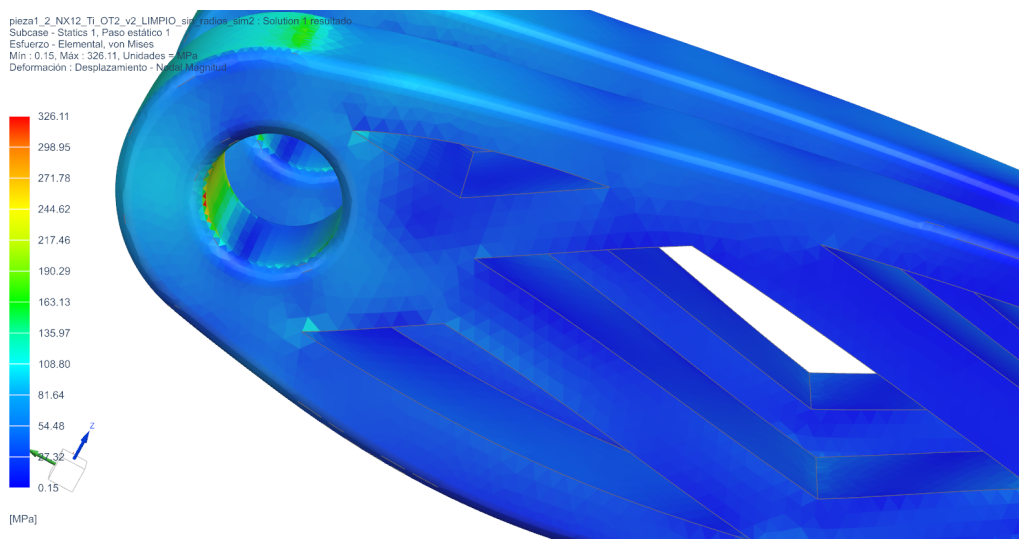


Figura A.12: Distribución de la tensión de Von Mises

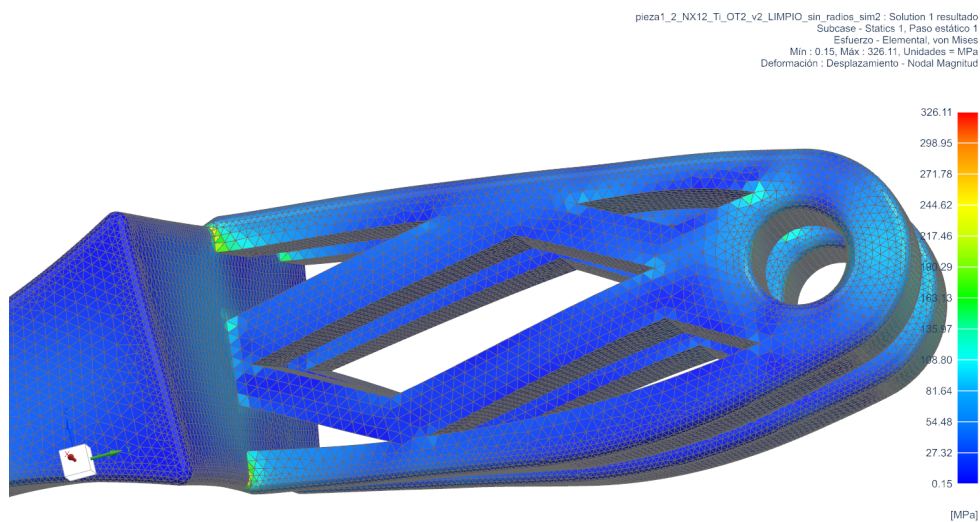


Figura A.13: Distribución de la tensión de Von Mises

A.3.3. Fuerza de reacción

Con las imágenes de la memoria se considera que hay suficiente información para observar el comportamiento de la pieza.

Capítulo B Análisis de elementos finitos (malla 4mm)

En este anexo se van a mostrar los resultados obtenidos en los análisis de elementos finitos usando un tamaño de elemento mayor. Con ello, se pretende justificar el uso de las mallas expuestas en la memoria. Las fuerzas y restricciones son las mismas que las explicadas en la memoria. Finalmente, cabe destacar que el tamaño más pequeño de malla con el que se ha podido trabajar ha sido de 2mm.

B.1. Modelo inicial

B.1.1. Desplazamiento

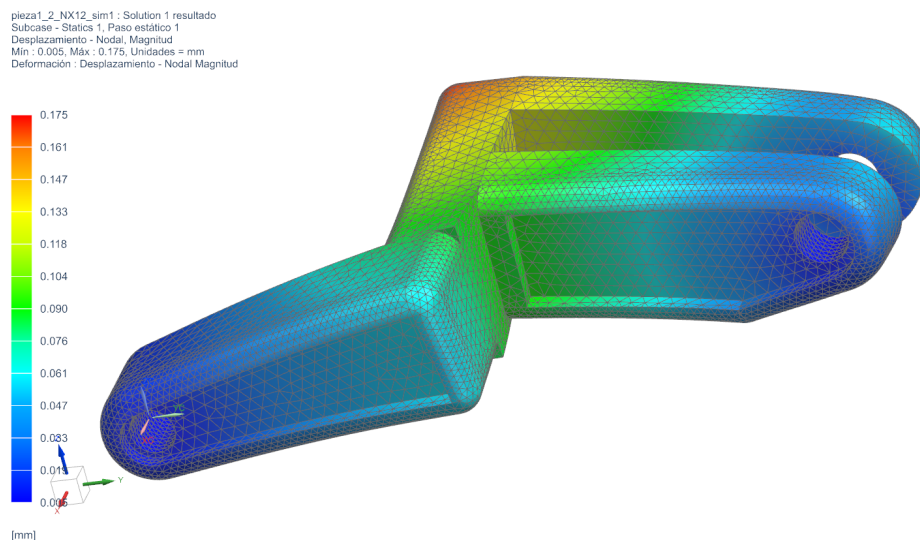


Figura B.1: Desplazamiento

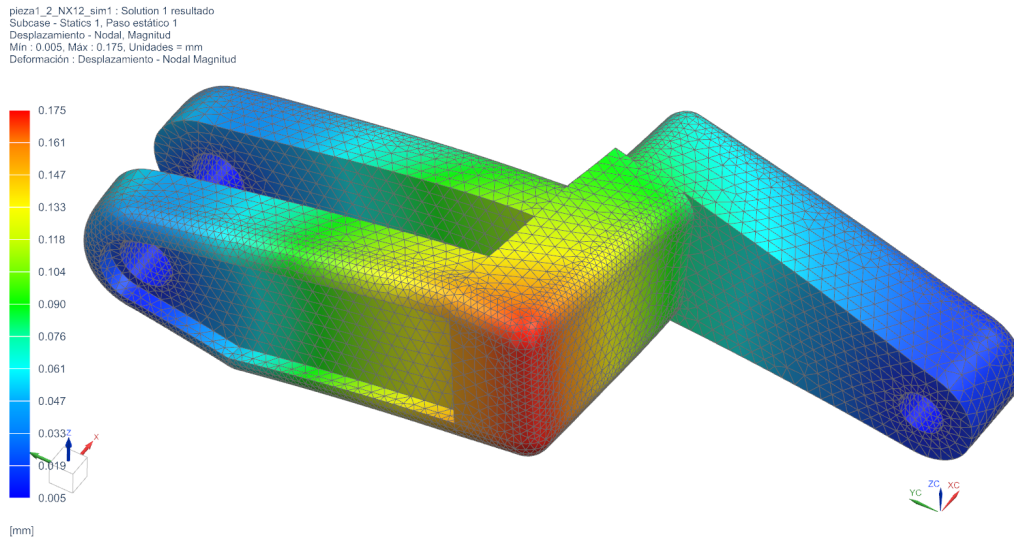


Figura B.2: Desplazamiento

B.1.2. Tensión de Von Mises

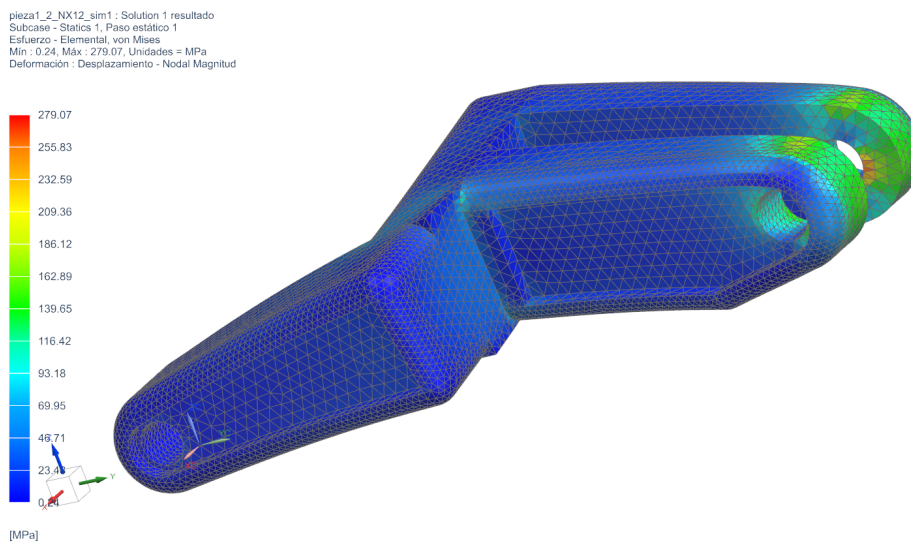


Figura B.3: Distribución de la tensión de Von Mises

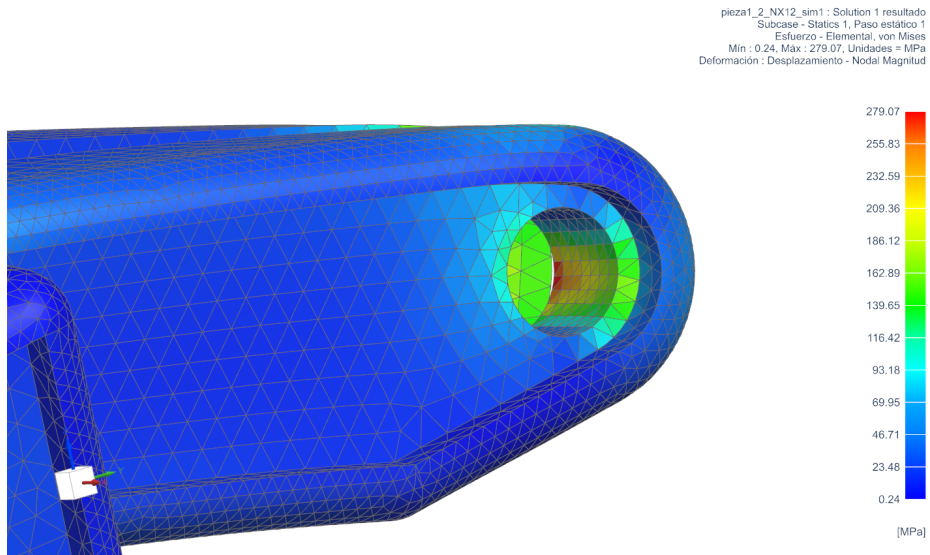


Figura B.4: Distribución de la tensión de Von Mises

B.1.3. Fuerza de reacción

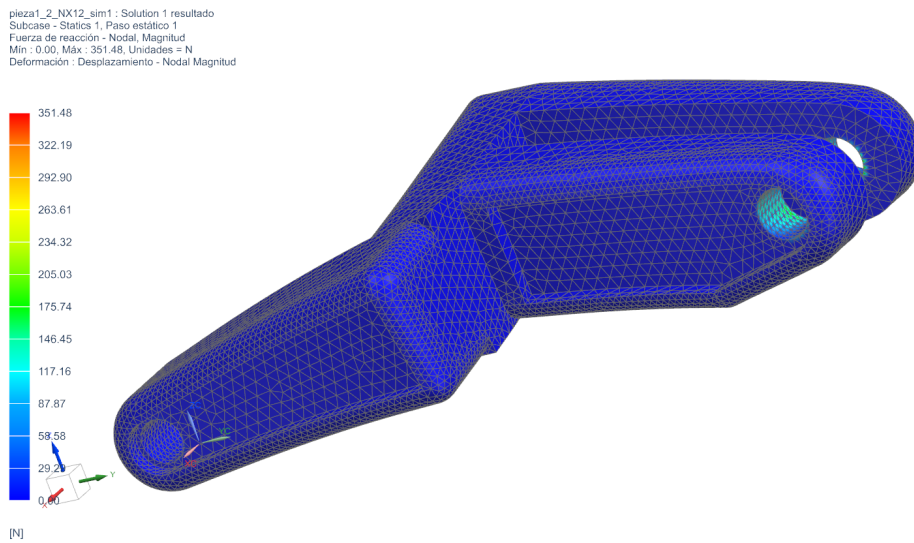


Figura B.5: Fuerza de reacción

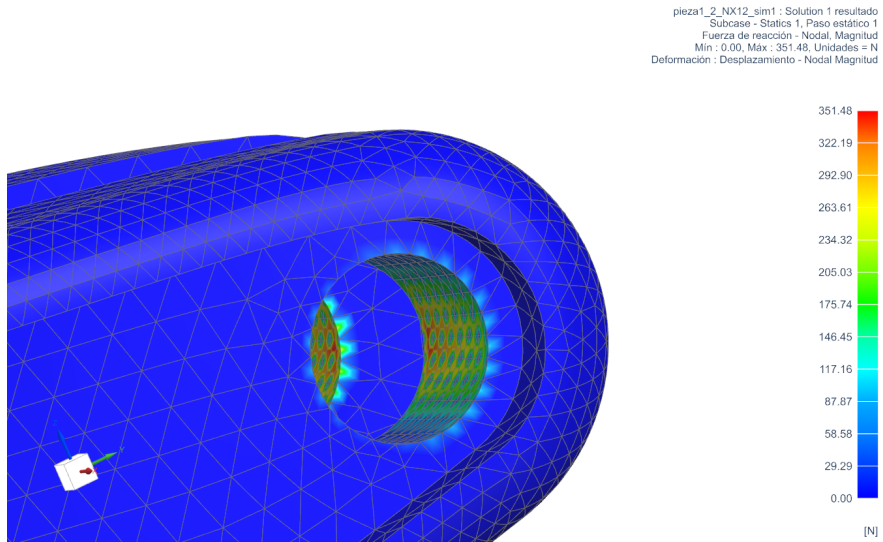


Figura B.6: Fuerza de reacción

B.2. Modelo optimizado

B.2.1. Desplazamiento

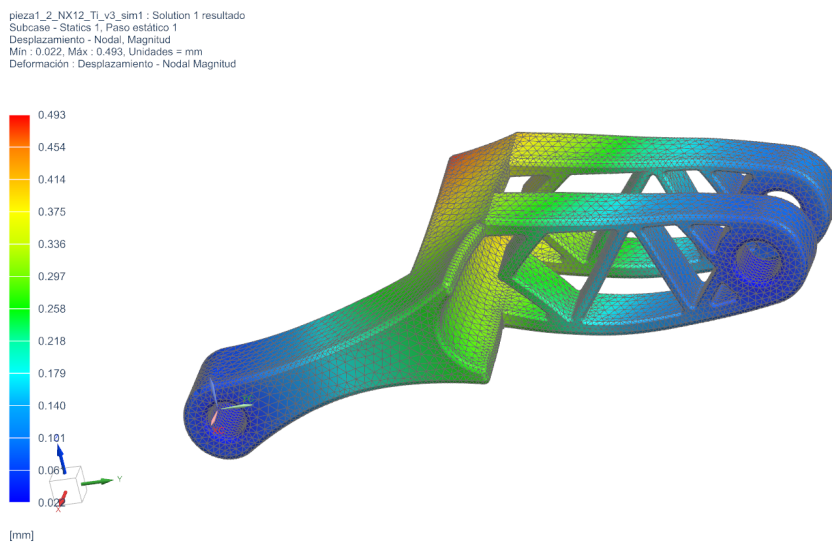


Figura B.7: Desplazamiento

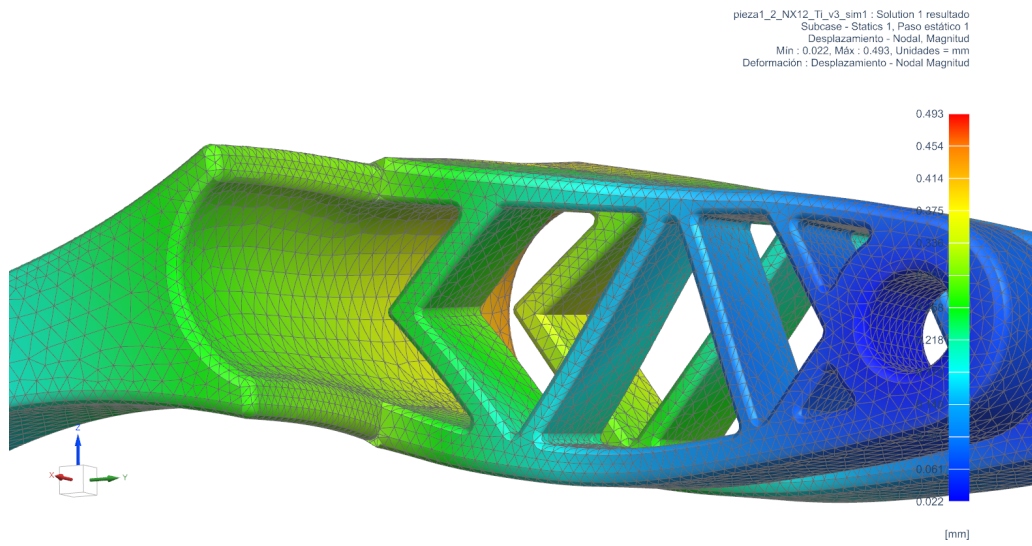


Figura B.8: Desplazamiento

B.2.2. Tensión de Von Mises

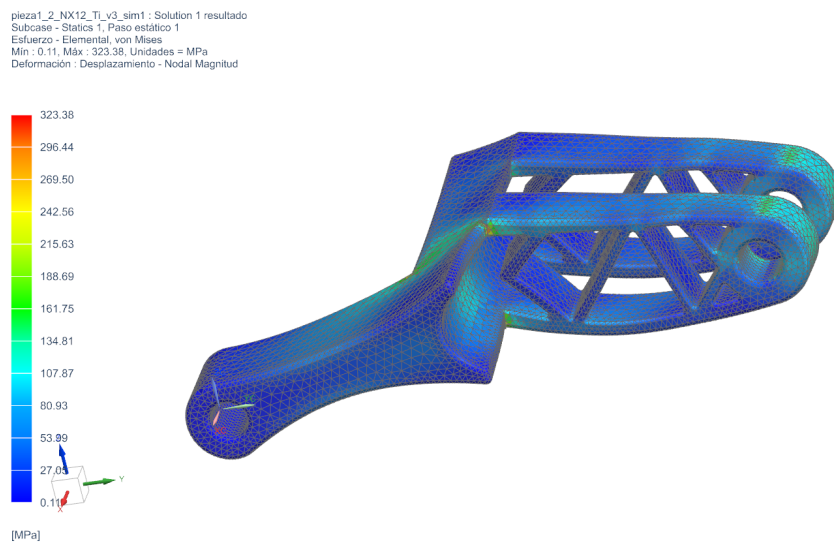


Figura B.9: Distribución de la tensión de Von Mises

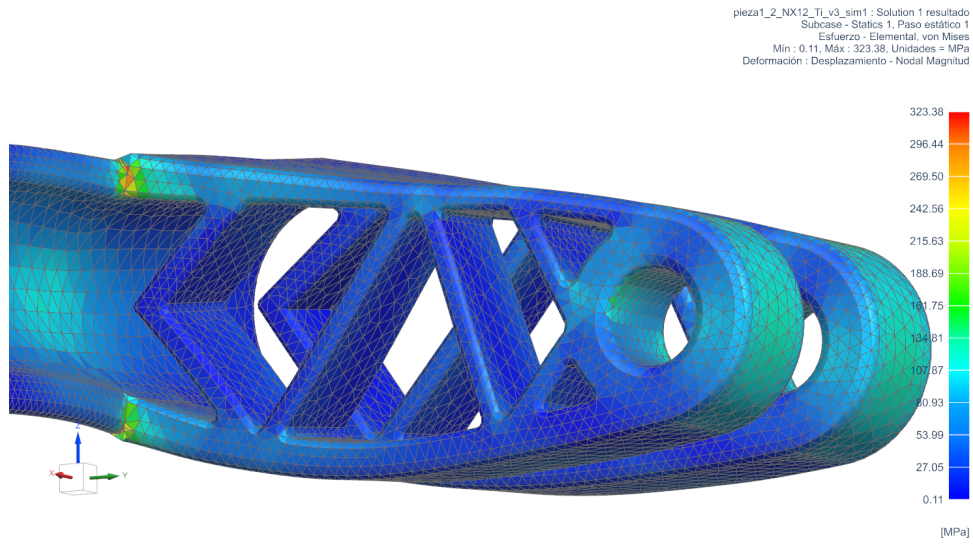


Figura B.10: Distribución de la tensión de Von Mises

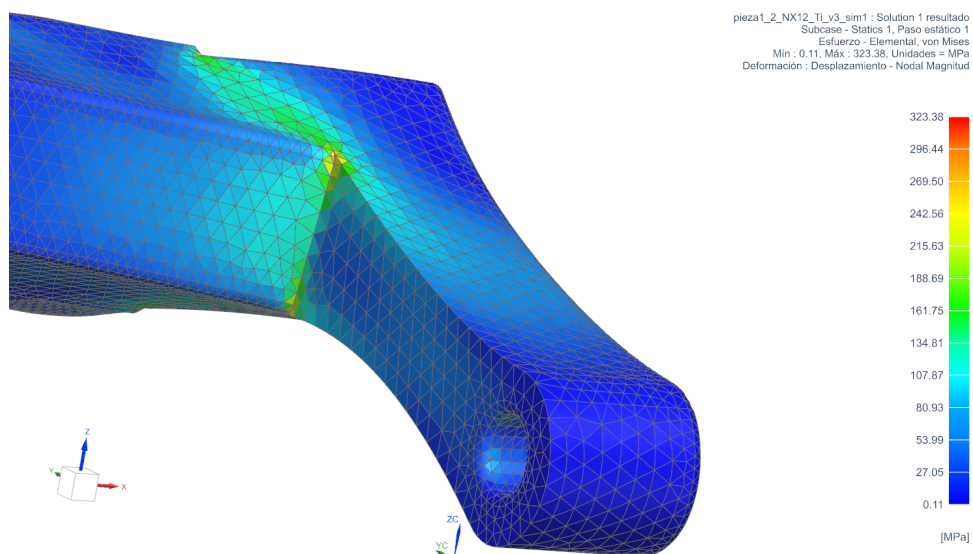


Figura B.11: Distribución de la tensión de Von Mises

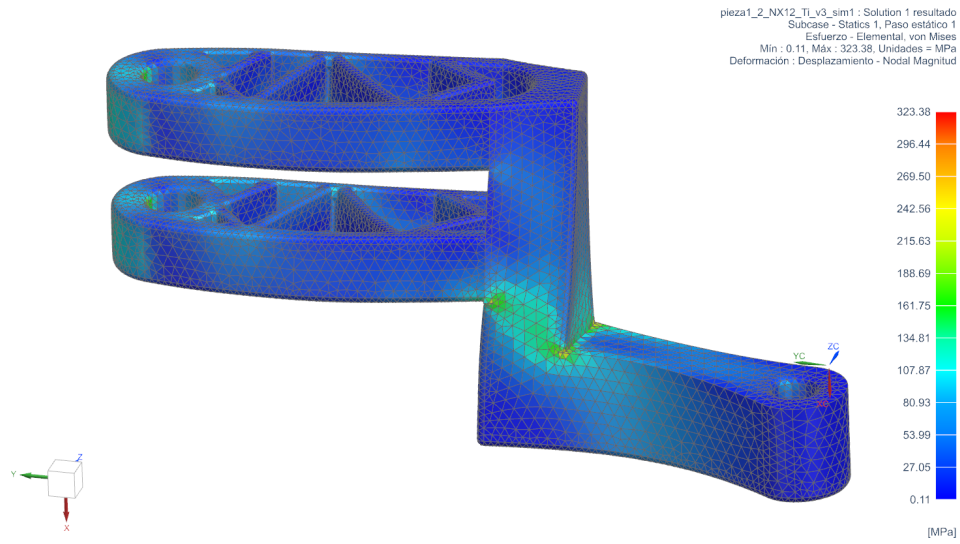


Figura B.12: Distribución de la tensión de Von Mises

B.2.3. Fuerza de reacción

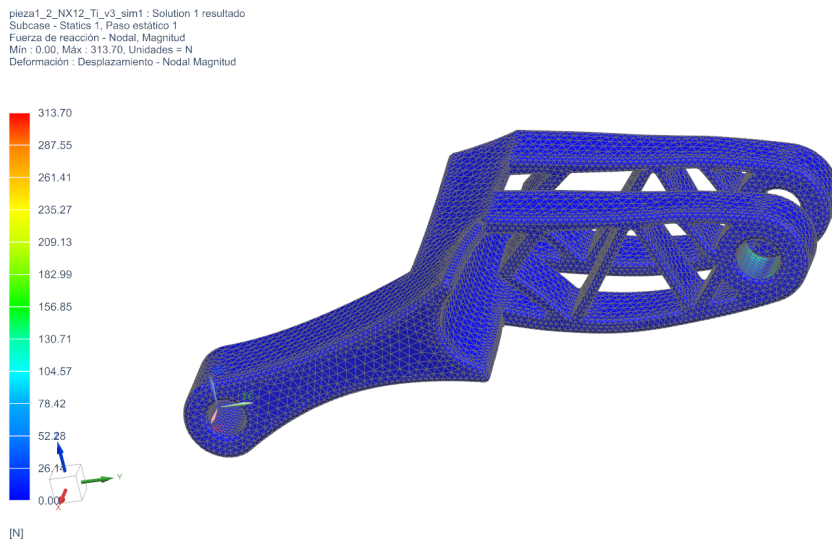


Figura B.13: Fuerza de reacción

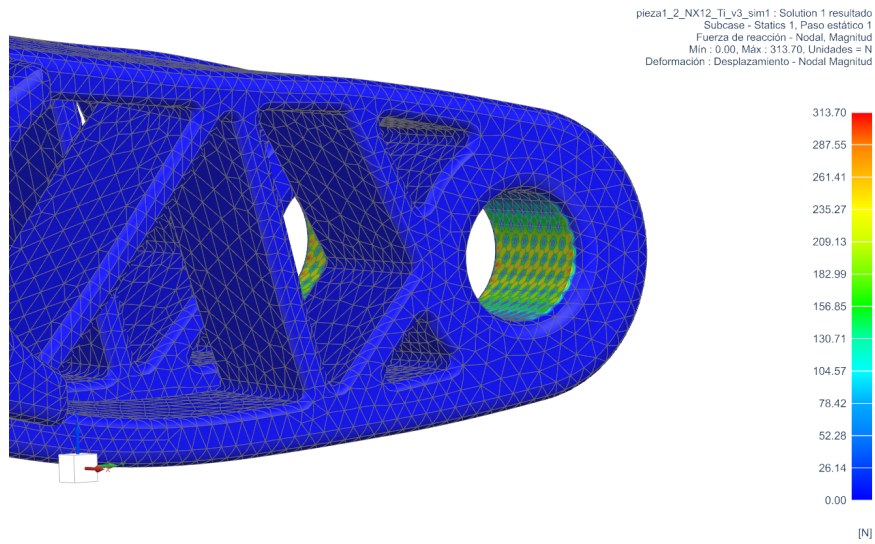


Figura B.14: Fuerza de reacción

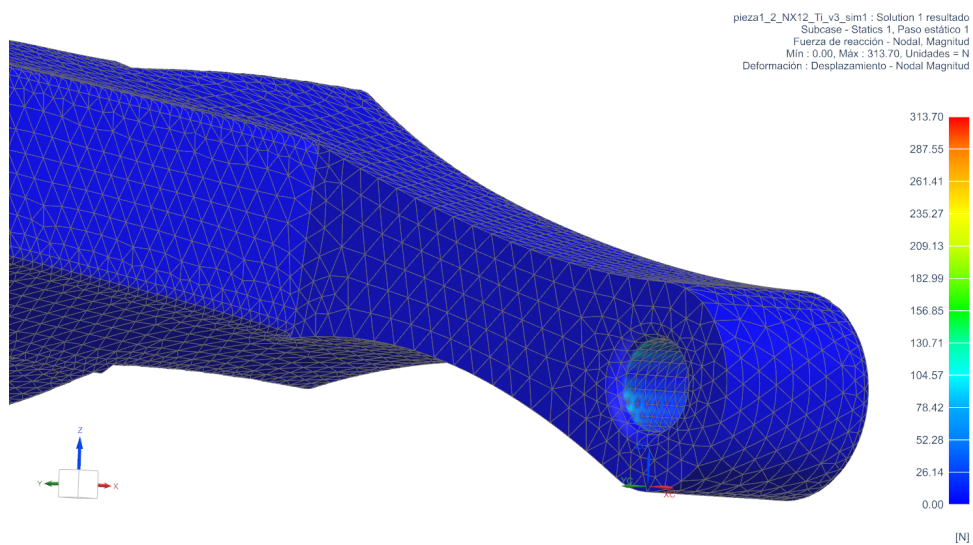


Figura B.15: Fuerza de reacción

B.3. Modelo final

B.3.1. Desplazamiento

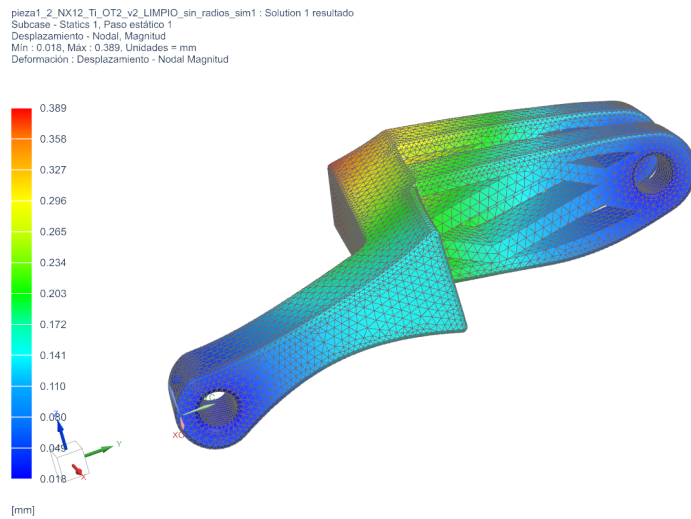


Figura B.16: Desplazamiento

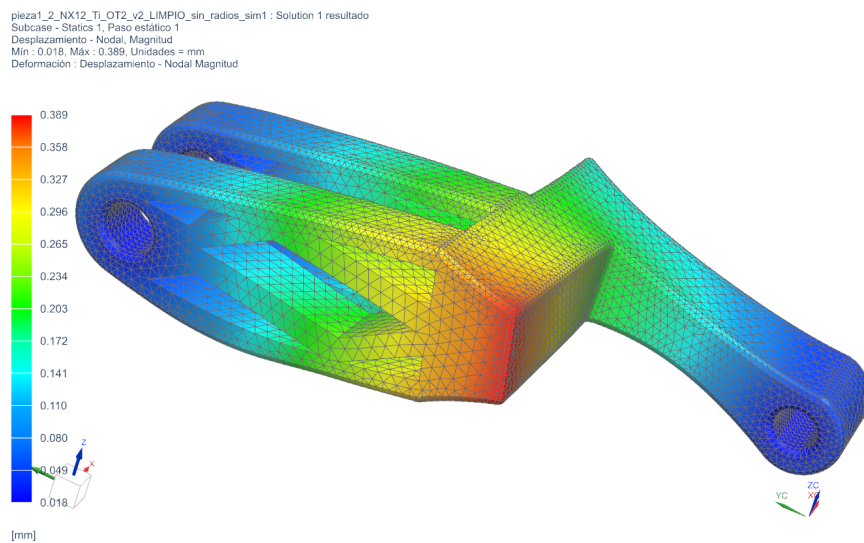


Figura B.17: Desplazamiento

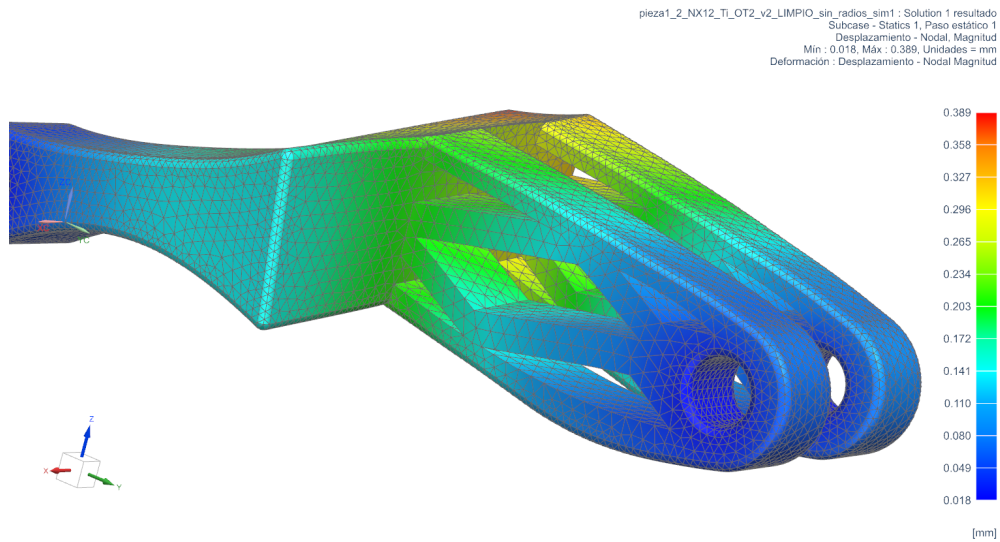


Figura B.18: Desplazamiento

B.3.2. Tensión de Von Mises

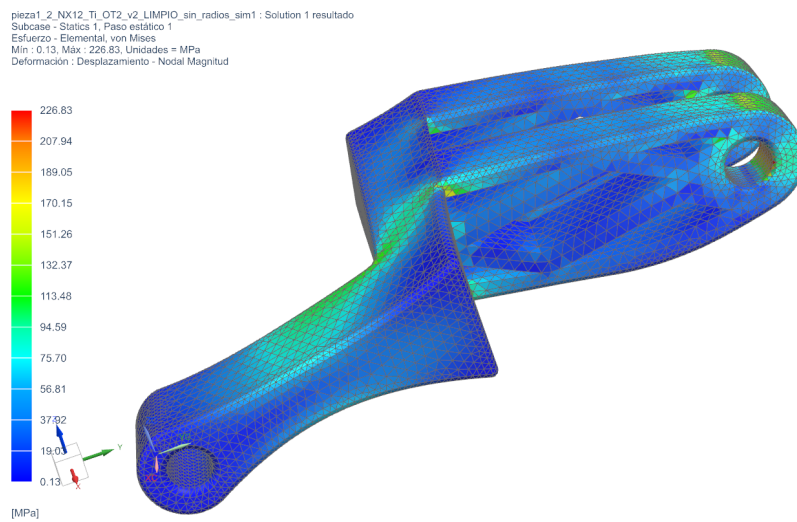


Figura B.19: Distribución de la tensión de Von Mises

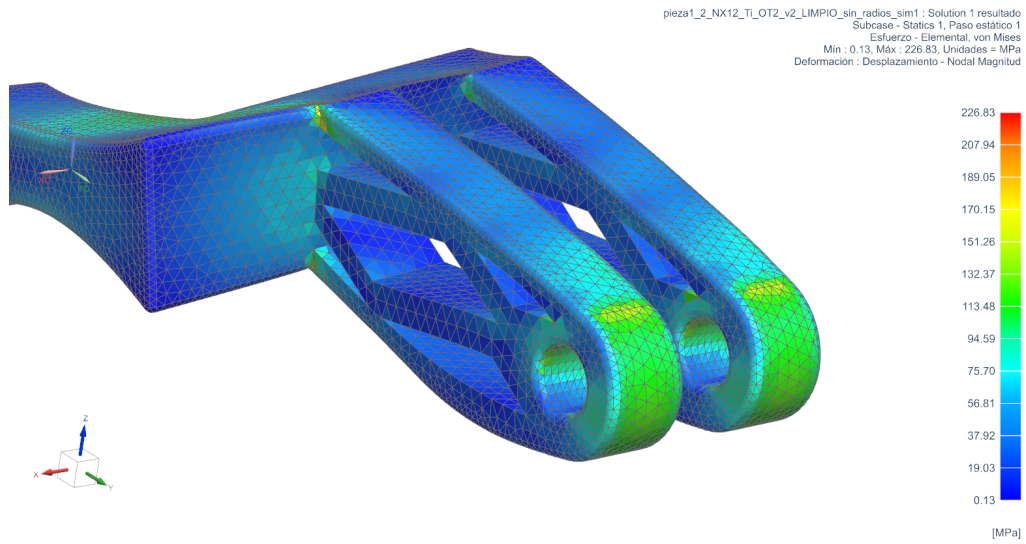


Figura B.20: Distribución de la tensión de Von Mises

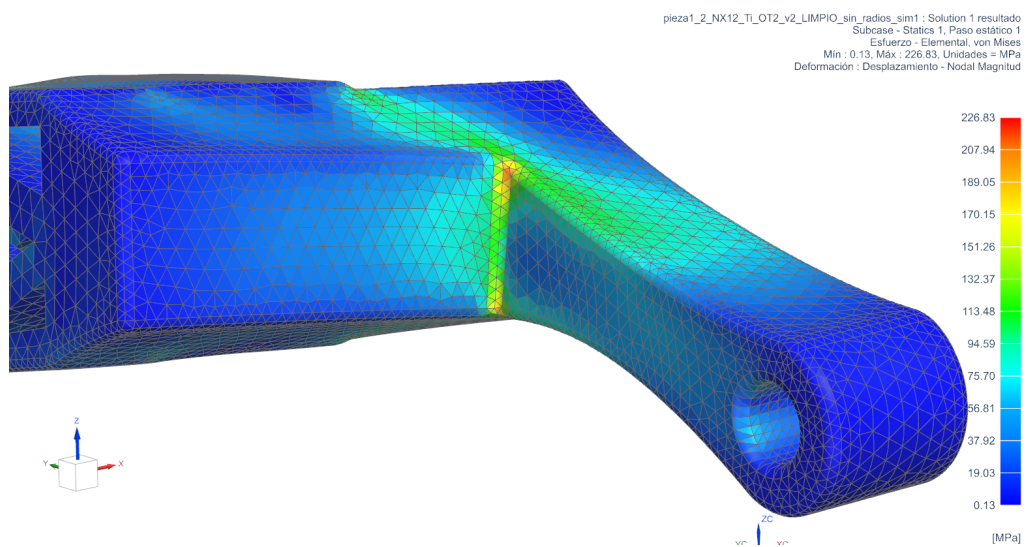


Figura B.21: Distribución de la tensión de Von Mises

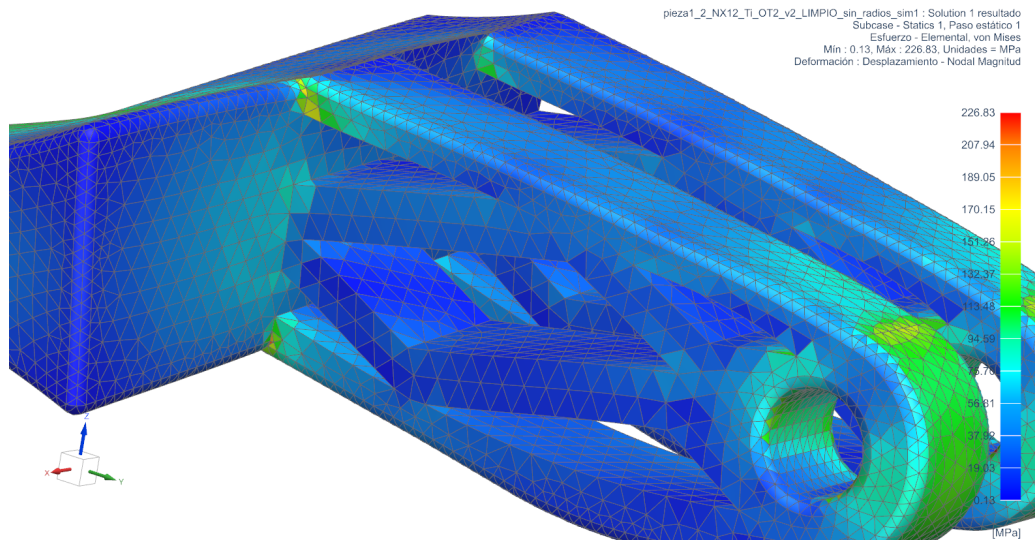


Figura B.22: Distribución de la tensión de Von Mises

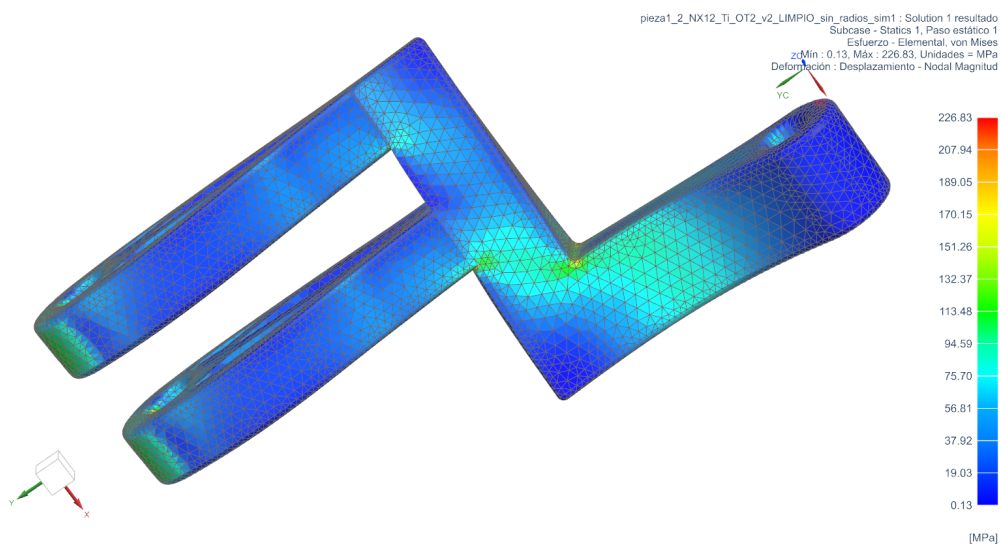


Figura B.23: Distribución de la tensión de Von Mises

B.3.3. Fuerza de reacción

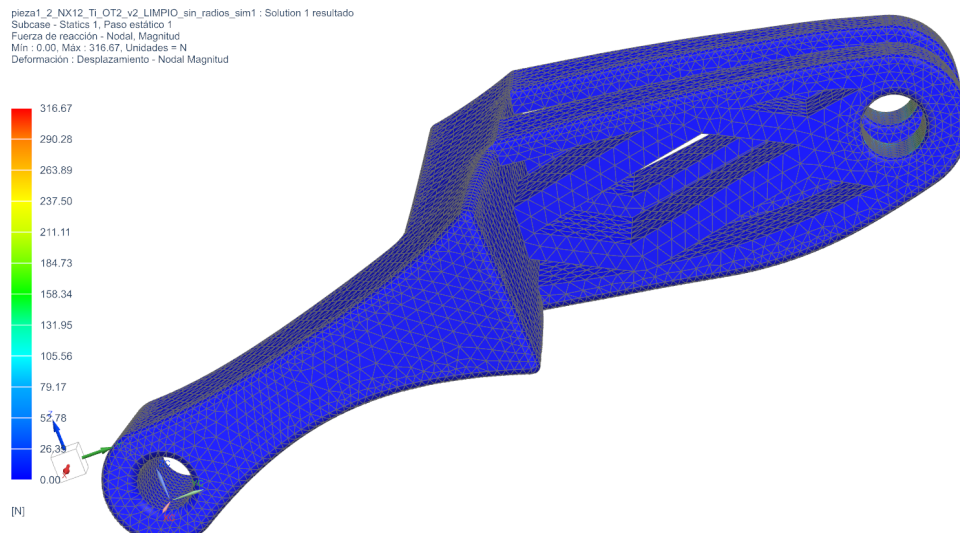


Figura B.24: Fuerza de reacción

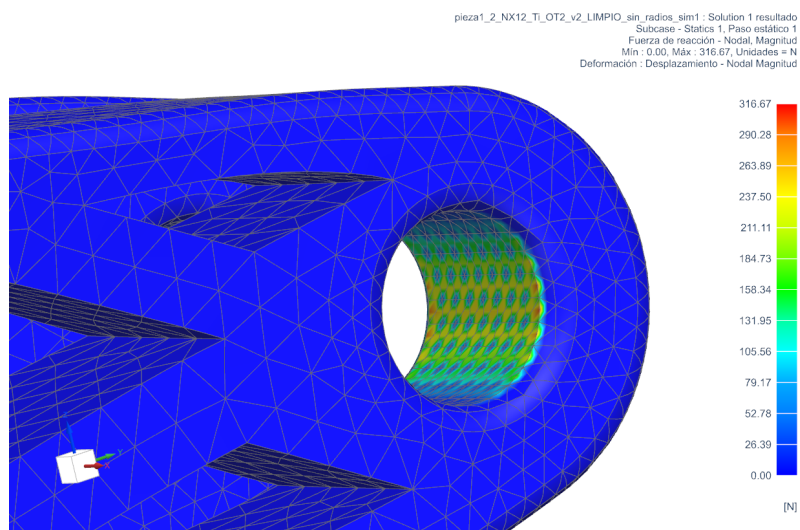


Figura B.25: Fuerza de reacción

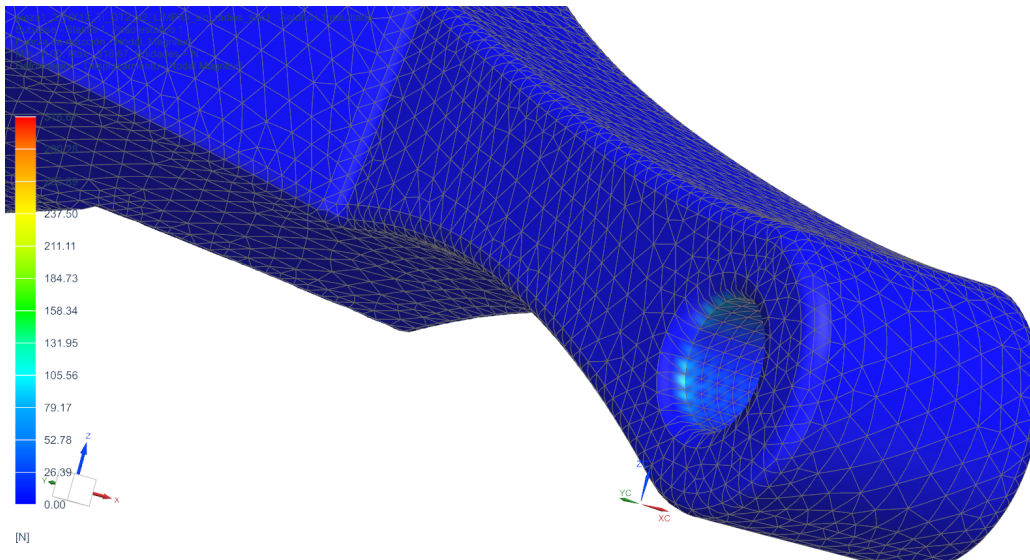


Figura B.26: Fuerza de reacción

Capítulo C Planos de la pieza final para fabricación

En este anexo se van a exponer los planos relacionados con el modelo final de fabricación para dar una idea de las características dimensionales de esta pieza así como para tratar de entender mejor algunos de sus detalles geométricos

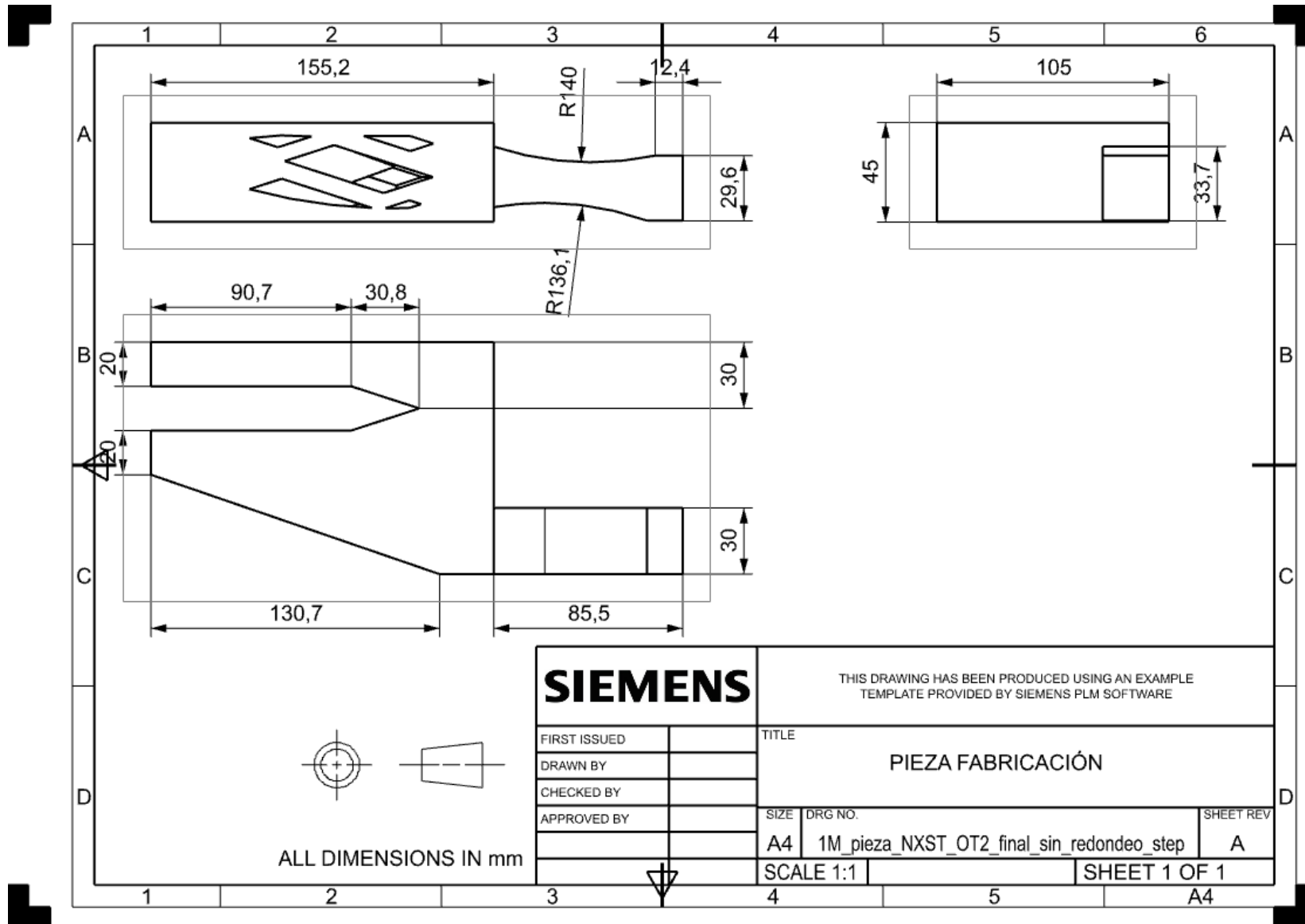


Figura C.1: Plano de la pieza final de fabricación.

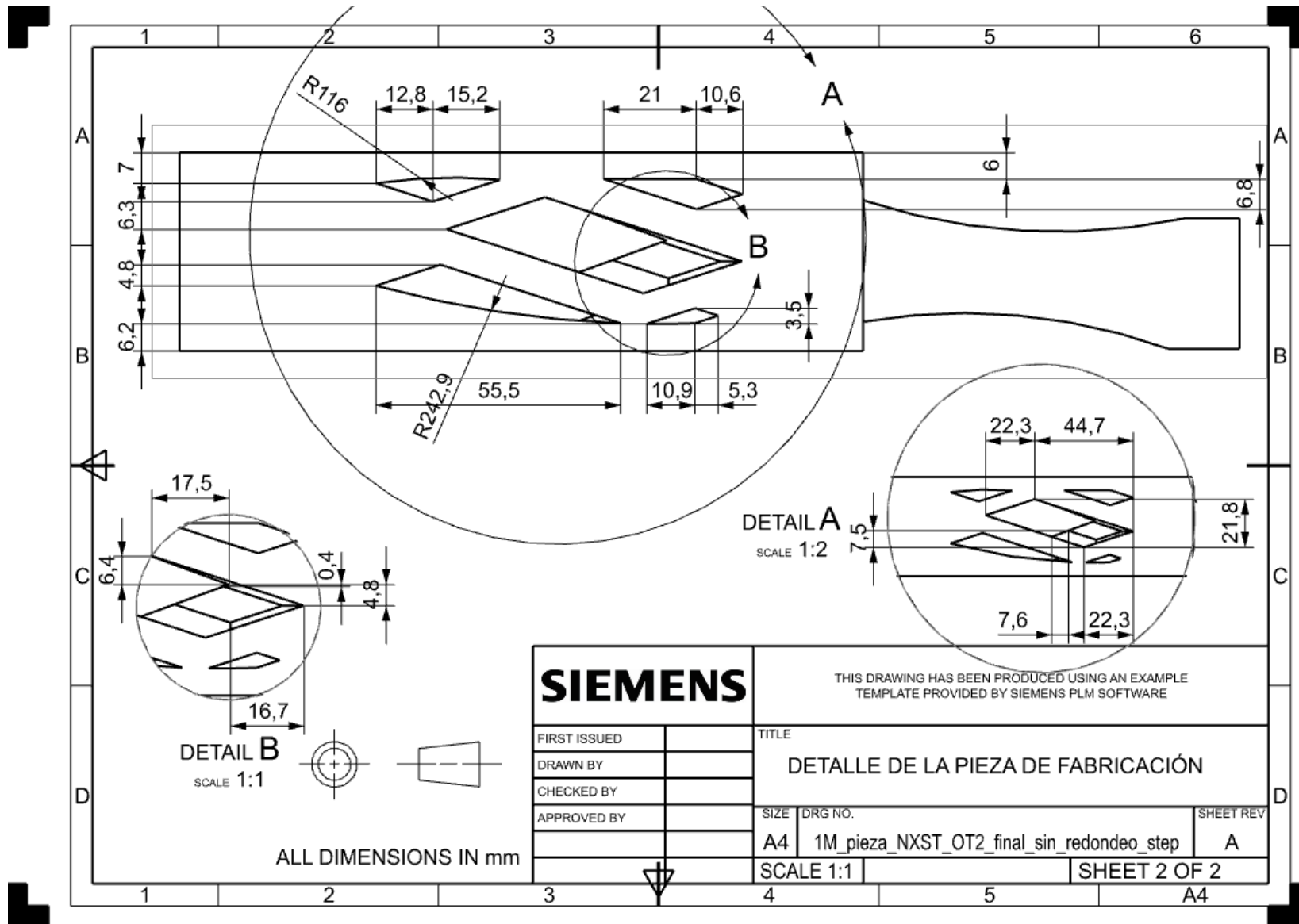


Figura C.2: Detalle la pieza final de fabricación.

Capítulo D Imágenes de la fabricación

En este Anexo se podrán encontrar imágenes adicionales tanto del prototipo ATiLA como del proceso de fabricación.

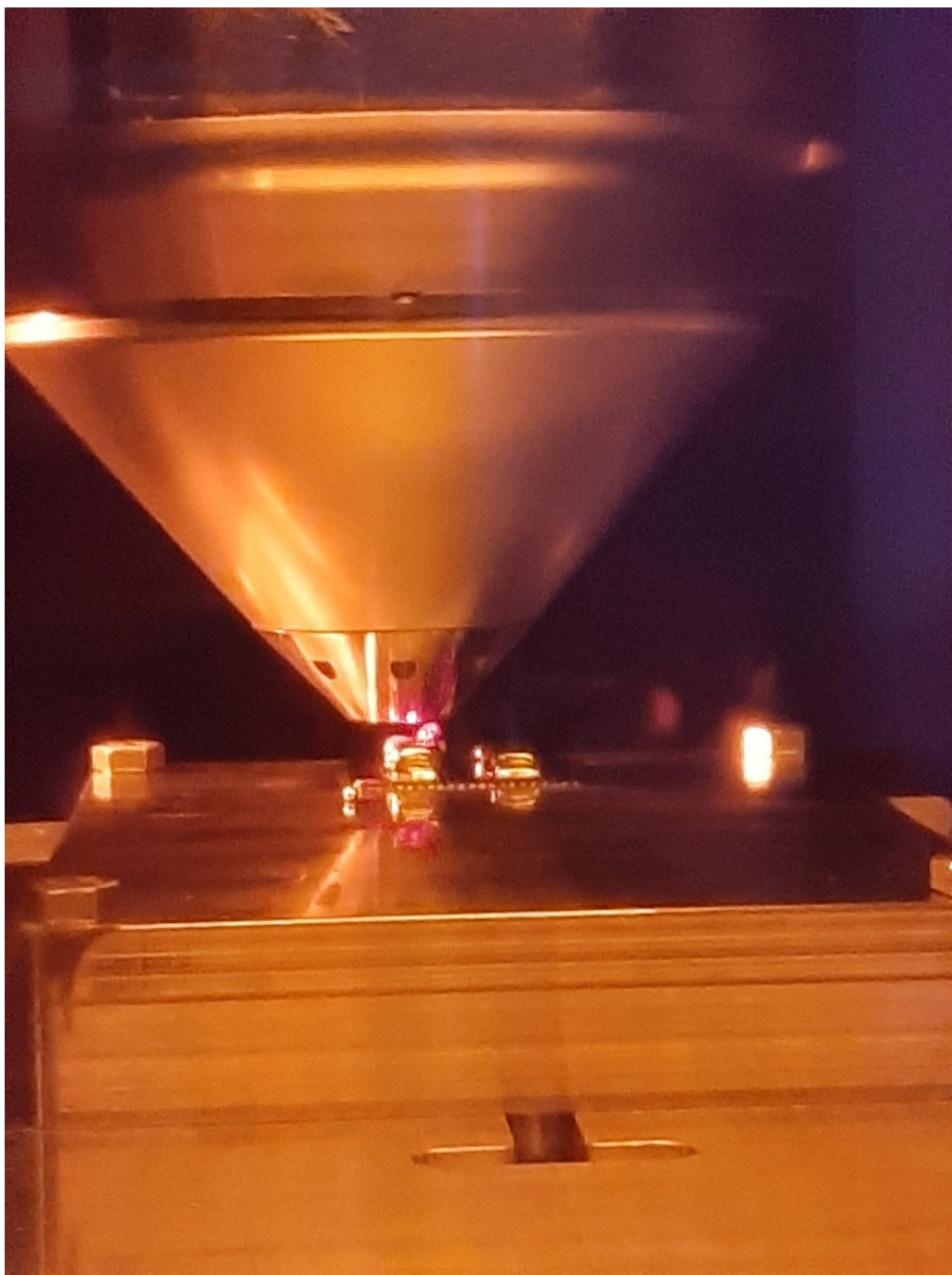


Figura D.1: Máquina en funcionamiento. Fuente: elaboración propia.

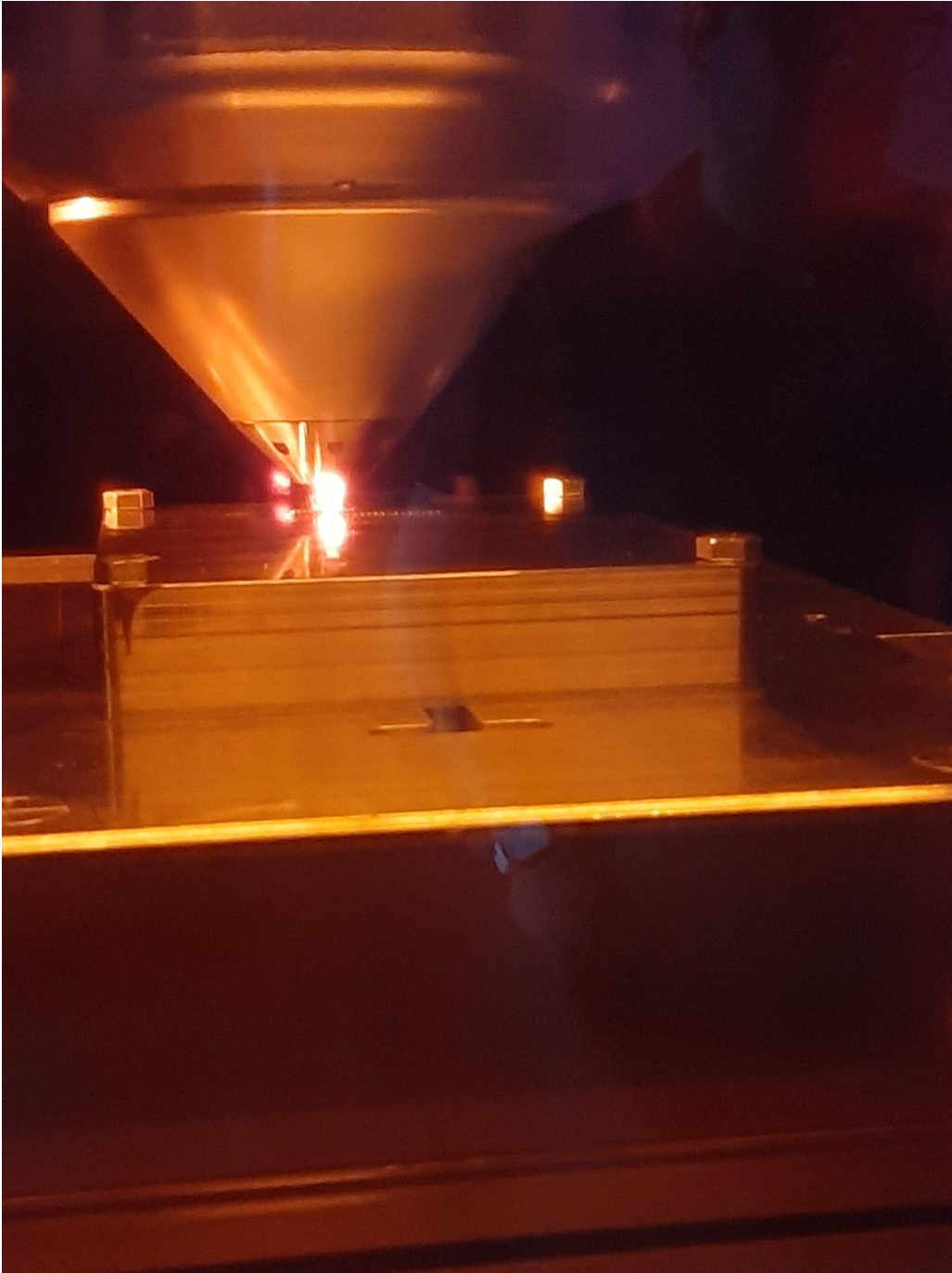


Figura D.2: Máquina en funcionamiento. Fuente: elaboración propia.

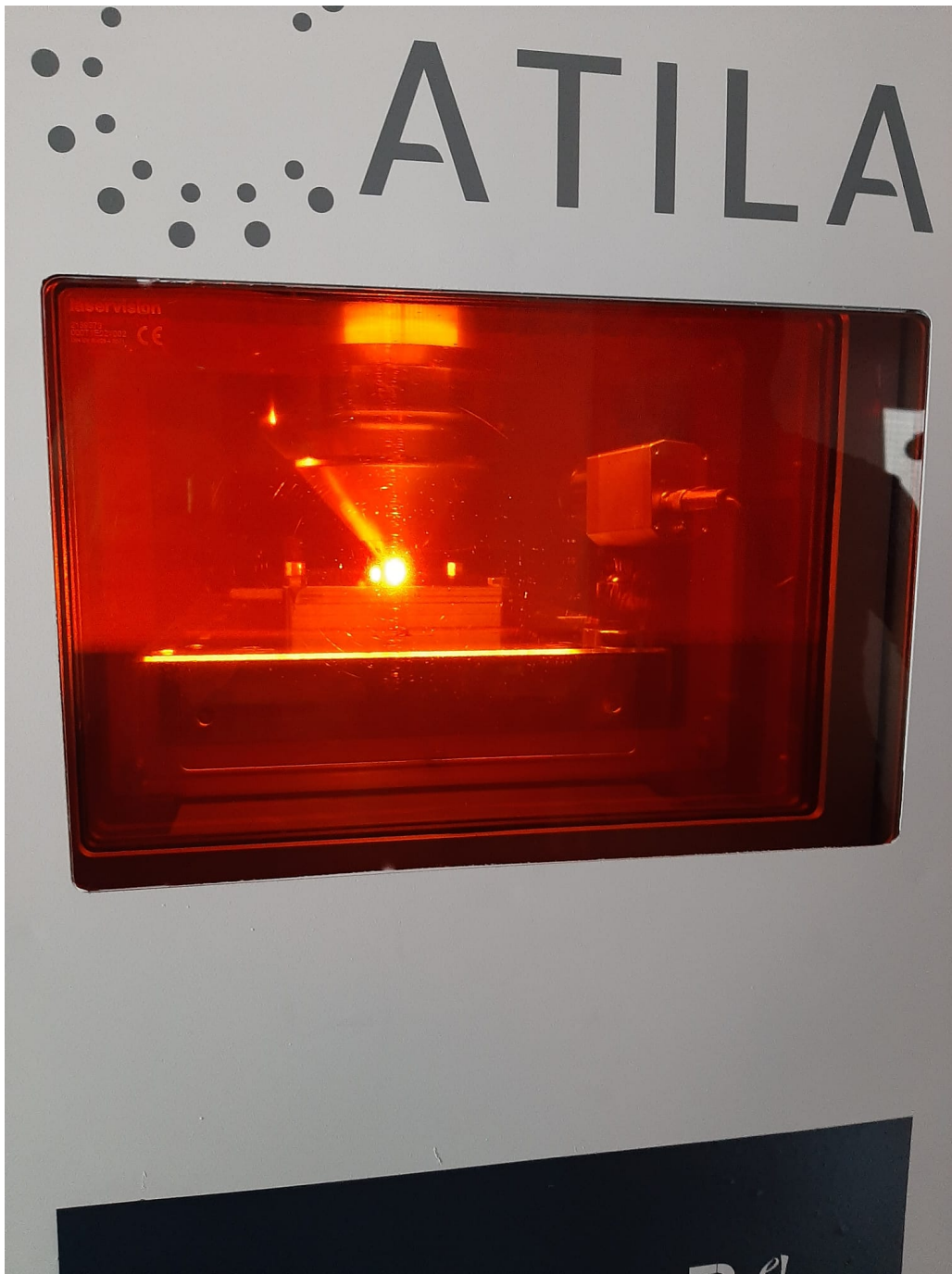


Figura D.3: Máquina en funcionamiento. Fuente: elaboración propia.

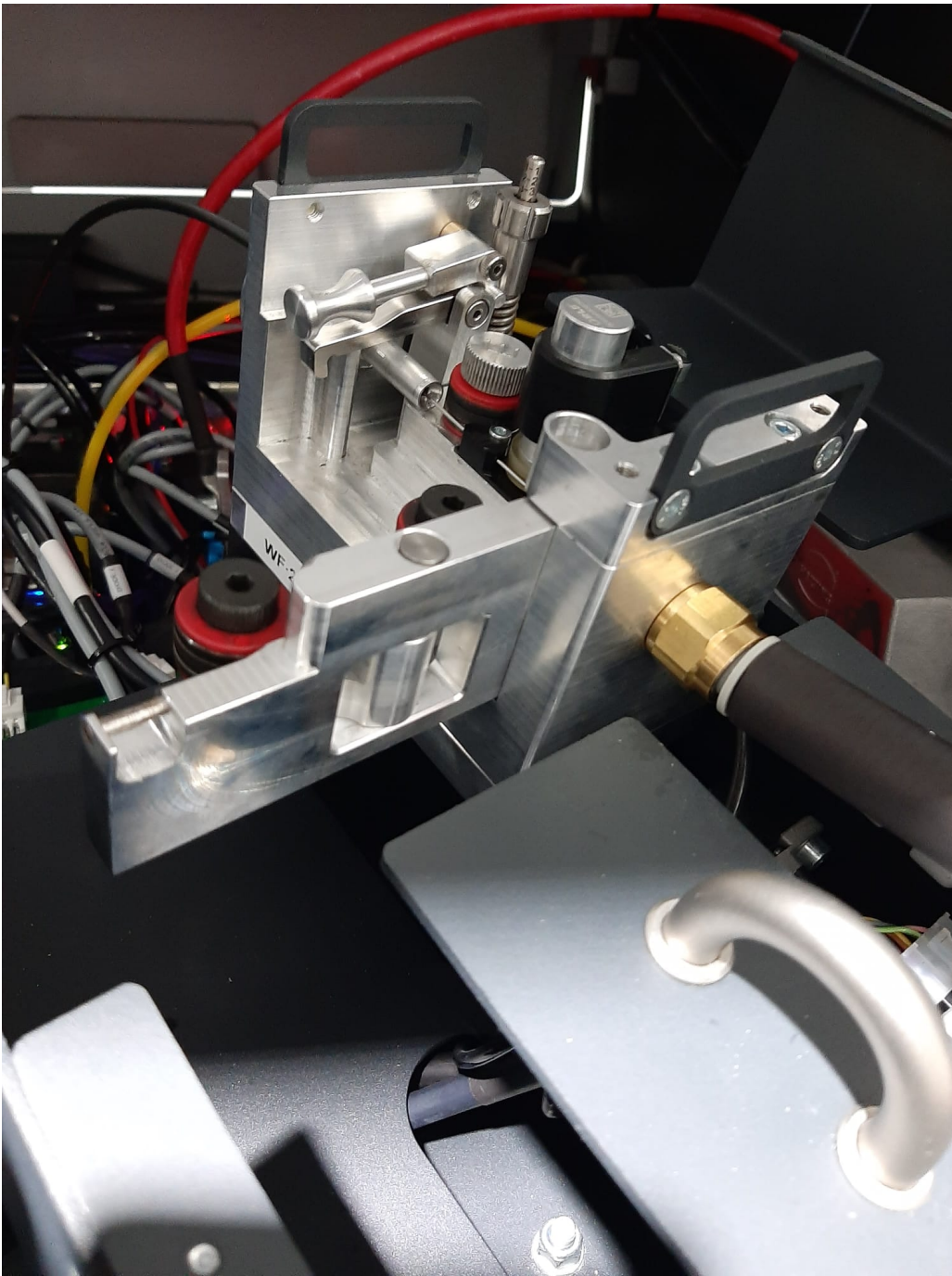


Figura D.4: Compartimento superior. Fuente: elaboración propia.

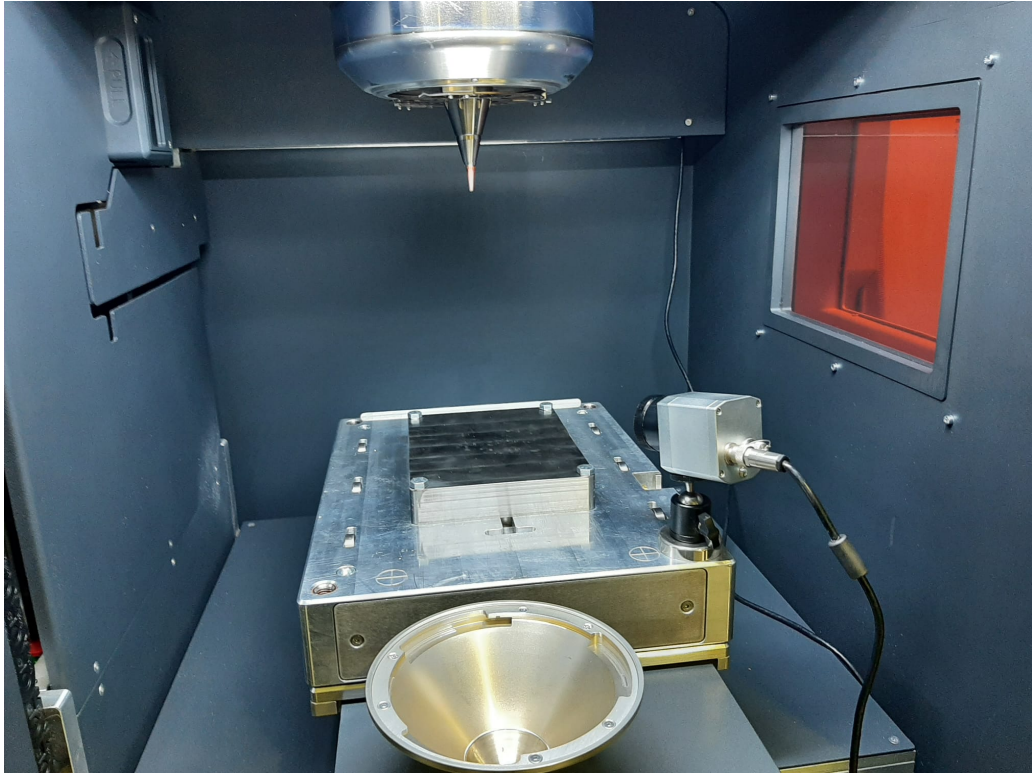


Figura D.5: Cabezal desmontado. Fuente: elaboración propia.