



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE LOS BRAZOS DE SUJECIÓN PARA UNA PRENSA DE SUJECIÓN PARALELA

Autor: Paula Salafranca Cocero

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Jorge García Llopis

Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE LOS BRAZOS
DE SUJECIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA UNA PRENSA DE
SUJECIÓN PARALELA

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024-25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Paula Salafranca Cocero Fecha: 04/ 07/2025

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 06/07/2025



Fdo.: Jorge García Llopis

Fecha: 06/07/2025



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN
MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE LOS BRAZOS DE
SUJECIÓN PARA UNA PRENSA DE SUJECIÓN
PARALELA

Autor: Paula Salafranca Cocero

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Jorge García Llopis

Madrid

Julio de 2025

Agradecimientos

A mis padres por apoyarme.

A mis tutores de TFG, Mariano y Jorge, por guiarme y ayudarme.

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D DE LOS BRAZOS DE SUJECCIÓN PARA UNA PRENSA DE SUJECCIÓN PARALELA

Autor: Salafranca Cocero, Paula.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

A partir de una propuesta inicial de un conjunto mecánico, concretamente una prensa de sujeción paralela, se ha analizado en detalle la funcionalidad de la pieza y se ha llevado a cabo el rediseño de los brazos con el objetivo de optimizar su geometría. En este proceso se han aplicado criterios de diseño generativo combinados con técnicas de optimización topológica. Finalmente, se ha fabricado un prototipo de la solución obtenida empleando diferentes tecnologías, entre ellas la impresión 3D y el corte por chorro de agua.

Palabras clave: Optimización Topológica, Diseño Generativo, Fabricación Aditiva

1. Introducción

El objetivo principal de este proyecto es plantear una propuesta de optimización topológica del diseño de una pieza para mejorar su eficiencia y rendimiento. Mediante el análisis de elementos finitos (FEM) se analizan los puntos críticos de la pieza y con simulaciones de diseño generativo se encuentra la configuración del material óptimo. El resultado obtenido logra reducir el peso total del conjunto mecánico, así como los costes de su fabricación, sin perjudicar las propiedades mecánicas y manteniendo la función principal de la pieza.

2. Flujo del proyecto

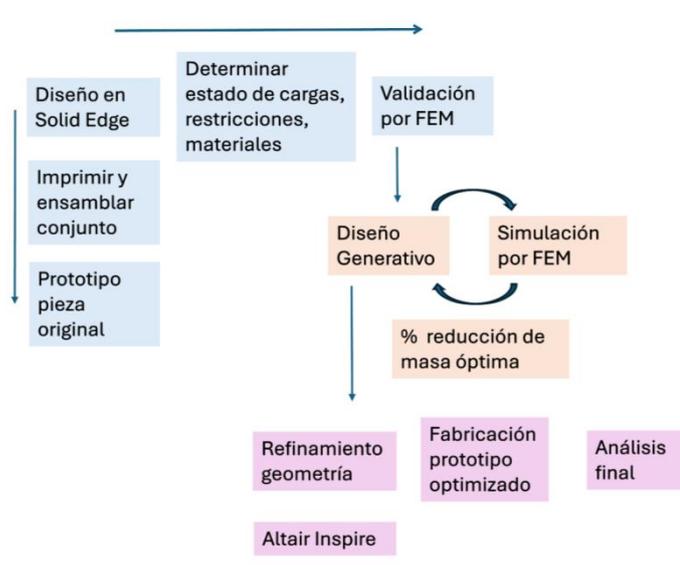


Ilustración 1: Esquema flujo de trabajo. Fuente: Elaboración propia

3. Descripción del proyecto

El proyecto se ha desarrollado en tres fases. En primer lugar, se diseñaron en Solid Edge los componentes de la prensa de sujeción paralela utilizando los planos de la Ilustración 2. Posteriormente se analizó su estado de cargas mediante simulaciones por elementos finitos, verificando que cumplieran los criterios de resistencia.

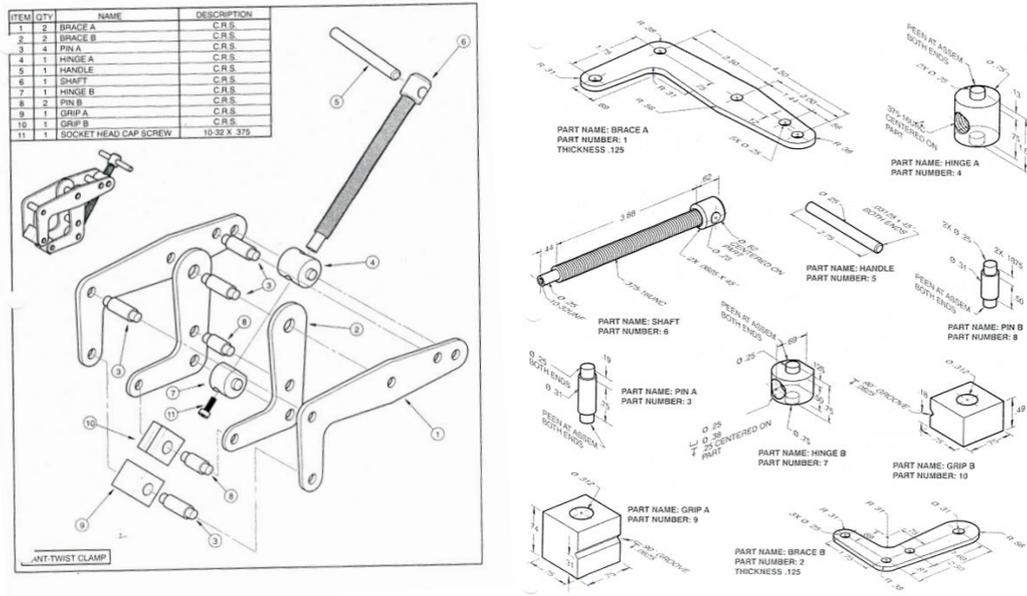


Ilustración 2: Planos Twist Kant Clamp

Fuente: (“Kant twist clamp assembly”)[1]

En la segunda fase, se aplicaron técnicas de optimización topológica y diseño generativo para reducir la masa de los brazos, realizando iteraciones y validaciones FEM hasta obtener una geometría optimizada mediante el programa de Solid Edge.

Por último, se fabricó el prototipo mediante impresión 3D y corte por chorro de agua, realizando previamente un refinado geométrico de la pieza para facilitar su fabricación. Las técnicas de fabricación aditiva utilizadas incluyeron impresión MJP en polvo, PLA y CFR. Finalmente, se llevó a cabo un análisis comparativo de costes de las distintas tecnologías empleadas.

4. Resultados

Como resultado del proceso de optimización topológica aplicado a los dos brazos que conforman la prensa de sujeción paralela, se logró una reducción de volumen y masa aproximada del **25,63 %** respecto al diseño original. Durante esta fase, se aplicó simetría respecto a los ejes principales de cada pieza con el objetivo de simplificar la geometría, mejorar su equilibrio estructural y facilitar la fabricación

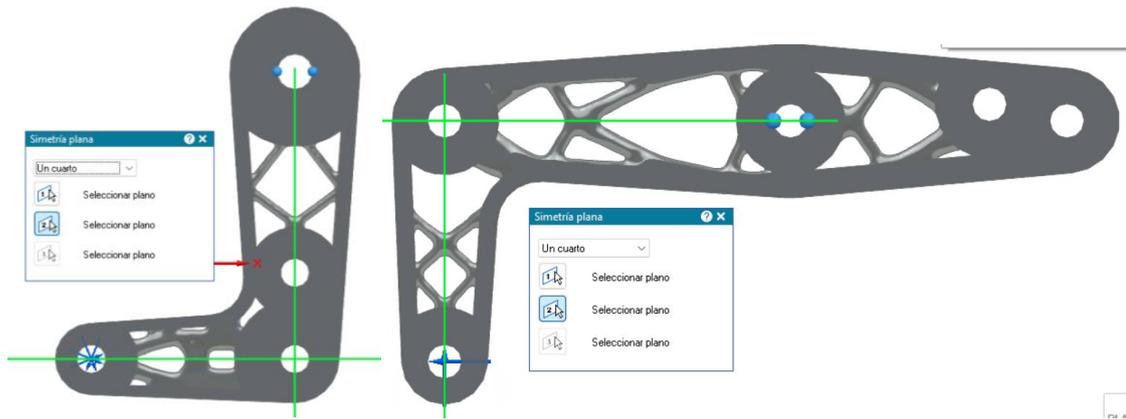


Ilustración 3: Diseño final optimizado

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realizó un proceso de suavizado y refinamiento geométrico utilizando el software Altair Inspire, con el fin de eliminar irregularidades propias del diseño generativo y preparar la pieza para su fabricación.

Se evaluaron distintas tecnologías de fabricación, concluyendo que, de las cuatro opciones analizadas, las más interesantes para obtener un prototipo funcional son la impresión con material compuesto CFR y el corte por chorro de agua. Estas alternativas ofrecen un equilibrio adecuado entre coste, precisión y propiedades mecánicas, por lo que resultan especialmente adecuadas para su aplicación en piezas de uso final.

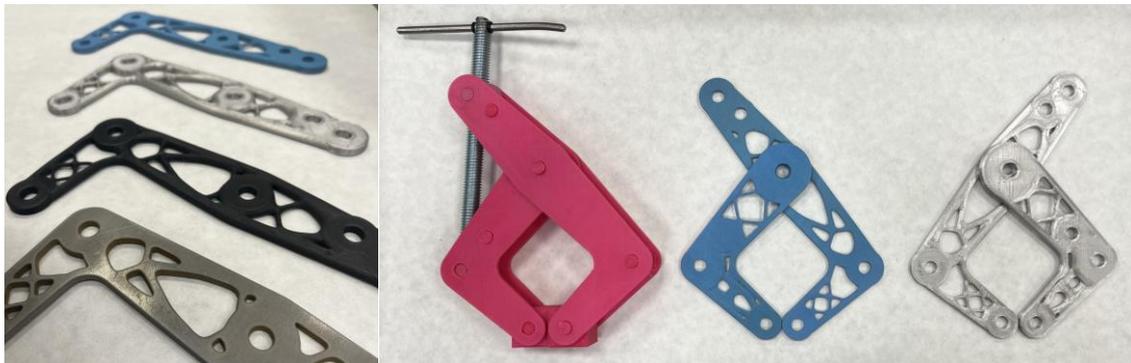


Ilustración 4: Prototipos resultados finales

Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto ha permitido demostrar que la aplicación de técnicas de diseño generativo y optimización topológica resulta eficaz para reducir la masa de componentes mecánicos sin comprometer su funcionalidad ni su resistencia estructural. En concreto, se ha alcanzado una disminución de volumen cercana al **25,63 %** respecto al diseño original de los brazos de la prensa de sujeción.

En relación con las tecnologías de fabricación, el análisis comparativo de costes y prestaciones ha permitido identificar que la impresión con material CFR y el corte por chorro de agua son las opciones más adecuadas para producir prototipos funcionales con un buen equilibrio entre coste y calidad, destacando su potencial para aplicaciones finales.

Este trabajo pone de manifiesto cómo las nuevas herramientas de diseño asistido y fabricación avanzada ofrecen amplias posibilidades para optimizar piezas convencionales, abriendo la puerta a futuros proyectos en los que se puedan aplicar estos mismos métodos a otros componentes y sectores industriales.

6. Referencias

- [1] «Kant Clamp and Engineering Drawings in Fusion 360 – Woody’s Workshop». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://altrish.co.uk/2021/05/03/kant-clamp-and-engineering-drawings-in-fusion-360/>
- [2] «Kant Twist Clamp Assembly», pdfcoffee.com. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pdfcoffee.com/kant-twist-clamp-assembly-3-pdf-free.html>

ANALYSIS, GENERATIVE DESIGN AND MANUFACTURING OF CLAMPING JAWS USING 3D PRINTING FOR A KANT TWIST CLAMP

Author: Salafranca Cocero, Paula.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Starting from an initial proposal of a mechanical assembly, specifically a parallel clamping press, the functionality of the component was thoroughly analyzed and the redesign of the jaws was carried out with the aim of optimizing their geometry. In this process, generative design criteria were applied in combination with topological optimization techniques. Finally, a prototype of the resulting solution was manufactured using different technologies, including 3D printing and waterjet cutting.

Keywords: Topological Optimization, Generative Design, Additive Manufacturing

1. Introduction

The main objective of this project is to propose a topological optimization approach to improve the design of a component in order to enhance its efficiency and performance. By means of finite element analysis (FEM), the critical points of the part are identified, and generative design simulations are used to determine the optimal material configuration. The resulting design achieves a reduction in the total weight of the mechanical assembly, as well as in manufacturing costs, without compromising the mechanical properties and while maintaining the primary function of the component.

2. Project Workflow

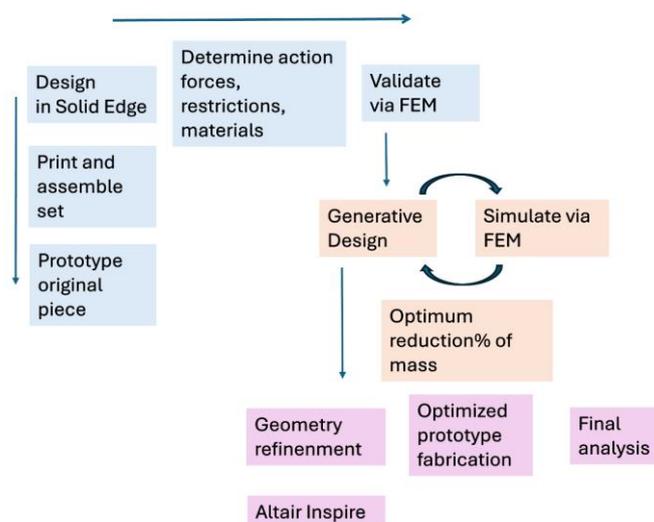


Illustration 5: Project Workflow diagram. Source: Own work

3. Project description

The project was carried out in three phases. First, the components of the parallel clamping press were designed in Solid Edge using the drawings shown in Figure 2. Subsequently, their load conditions were analyzed through finite element simulations, verifying that they met the strength criteria.

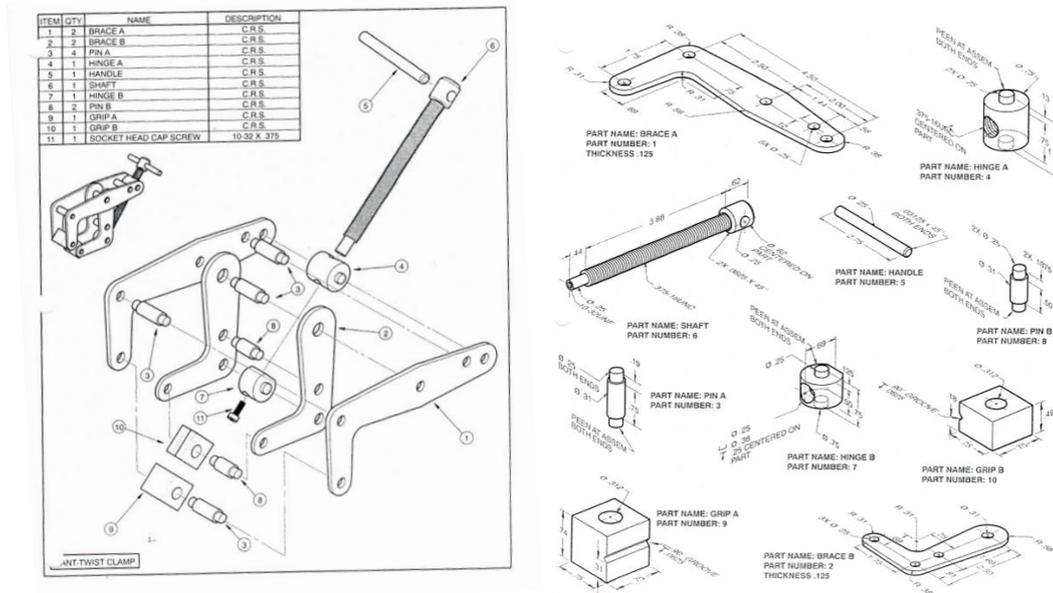


Figure 2: Kant Twist Clamp Drawings

Source: (“Kant twist clamp assembly”)[2]

In the second phase, topology optimization and generative design techniques were applied to reduce the mass of the arms, performing iterations and FEM validations until obtaining an optimized geometry using Solid Edge software.

Finally, the prototype was manufactured by means of 3D printing and water jet cutting, after carrying out a geometric refinement of the part to facilitate its production. The additive manufacturing techniques used included powder MJP printing, PLA, and CFR. Lastly, a comparative cost analysis of the different technologies employed was conducted.

4. Results

As a result of the topology optimization process applied to the two arms that make up the parallel clamping press, an approximate reduction of 25.63% in volume and mass was achieved compared to the original design. During this phase, symmetry was applied with respect to the main axes of each part to simplify the geometry, improve structural balance, and facilitate manufacturing.

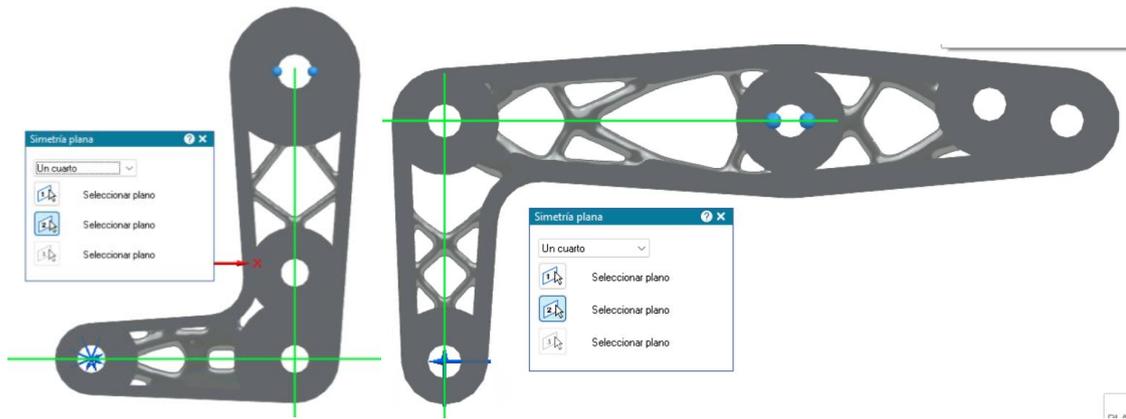


Figure 3: Final Optimized Design

Source: Own elaboration

Subsequently, a smoothing and geometric refinement process was carried out using Altair Inspire software to eliminate irregularities inherent to generative design and prepare the part for production.

Various manufacturing technologies were evaluated, concluding that, among the four options analyzed, the most suitable for obtaining a functional prototype are composite CFR printing and water jet cutting. These alternatives offer an appropriate balance between cost, precision, and mechanical properties, making them especially suitable for applications in end-use parts.

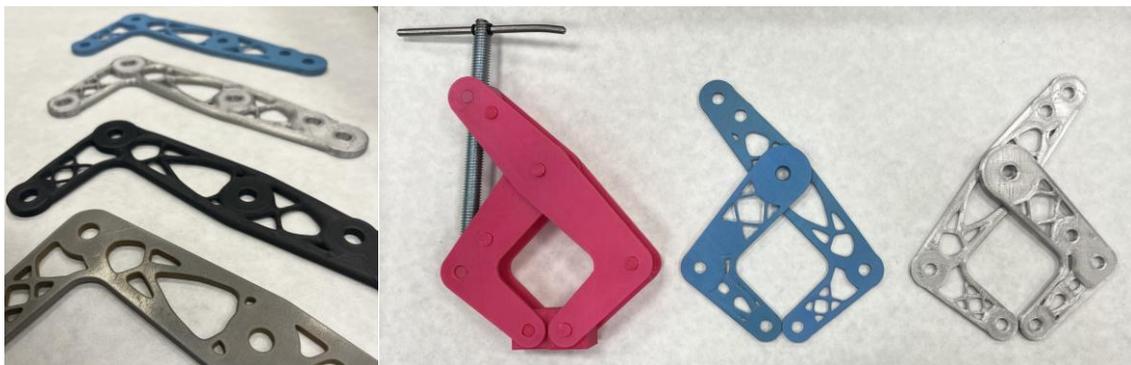


Figure 4: Final Prototype Results

Source: Own elaboration

5. Conclusions

The development of this project has demonstrated that the application of generative design and topology optimization techniques is effective for reducing the mass of mechanical components without compromising their functionality or structural strength. Specifically, a volume reduction of approximately 25.63% was achieved compared to the original design of the clamping press arms.

Regarding manufacturing technologies, the comparative analysis of costs and performance has made it possible to identify that CFR composite printing and water jet cutting are the most suitable options for producing functional prototypes with a good balance between cost and quality, highlighting their potential for end-use applications.

This work demonstrates how new computer-aided design tools and advanced manufacturing technologies offer extensive possibilities for optimizing conventional parts, paving the way for future projects in which these same methods can be applied to other components and industrial sectors.

6. References

- [1] «Kant Clamp and Engineering Drawings in Fusion 360 – Woody's Workshop». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://altrish.co.uk/2021/05/03/kant-clamp-and-engineering-drawings-in-fusion-360/>
- [2] «Kant Twist Clamp Assembly», pdfcoffee.com. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pdfcoffee.com/kant-twist-clamp-assembly-3-pdf-free.html>

Índice de la memoria

<i>Índice de tablas</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
<i>Índice de acrónimos</i>	IX
Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Introducción al diseño generativo	10
1.2 Motivación y justificación del proyecto	12
1.3 Objetivos del proyecto	13
1.3.1 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	14
1.4 Metodología del proyecto	15
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	18
2.1 Fundamentos del diseño generativo.....	18
2.2 Diseño generativo aplicado al mundo real	19
2.3 Fundamentos optimización topológica	21
2.4 Método elementos finitos (fem)	23
2.4.1 Estructuras discretas o reticulares y continuas.....	26
2.4.2 Importancia del modelo de malla utilizado en fem.....	27
2.4.3 Tipo de simulaciones FEM en Solid edge	29
2.5 Fundamentos de la fabricación aditiva	30
2.5.1 Clasificación de Tecnologías de Fabricación Aditiva	31
2.5.2 Perspectivas de futuro y tendencias	33
2.6 Kant Twisted Clamp	34
2.6.1 Tipos de prensas Kant-Twist	36
Capítulo 3. Propuesta de estudio	38

3.1 Geometría propuesta.....	38
3.2 Propuesta de materiales	39
3.3 Cálculo de cargas.....	40
3.4 Propuesta de restricciones de las piezas.....	43
3.5 Propuesta de iteración de ot	43
Capítulo 4. Procedimiento e implantación	44
4.1 diseño y estado de cargas de las piezas.....	44
4.1.1 Diseño y ensamblaje en Solid Edge	44
4.1.2 Asignar materiales, restricciones y cargas	49
4.1.3 Simulación fem inicial.....	51
4.2 Optimización de las piezas con cdg.....	54
4.2.1 Preservación de regiones:.....	54
4.2.2 Determinación de % de reducción de masa óptimo.....	59
4.2.3 Iteraciones brazo A.....	62
4.2.4 Iteraciones brazo B.....	65
4.2.5 Determinación de estado de cargas más restrictivo	67
4.3 Refinamiento y fabricación de los prototipos.....	70
4.3.1 Refinar geometría con Altair Inspire	70
Capítulo 5. Fabricación por FA.....	75
5.1 Metodología de trabajo FA	75
5.1.1 Parámetros importantes para considerar en el proceso	76
5.2 Tecnologías y softwares de impresión.....	79
5.3 Impresión de prototipos	81
5.4 Fabricación por corte de chorro de agua.....	84
Capítulo 6. Análisis de Resultados	88

6.1	Presupuestos económicos.....	88
6.1.1	<i>Costes prototipado funcional de montaje.....</i>	<i>90</i>
6.1.2	<i>Costes prototipado de uso final.....</i>	<i>91</i>
6.2	Análisis y comparativa	92
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....		95
Capítulo 8. Bibliografía.....		97
ANEXO I		99

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Esquema flujo de trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	8
Ilustración 2: Planos Twist Kant Clamp	9
<i>Ilustración 3: Diseño final optimizado</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 4: Prototipos resultados finales</i>	<i>10</i>
Illustration 5: Project Workflow diagram. Source: Own work	12
Ilustración 6: Esquema de trabajo con DG.....	11
Ilustración 7: Kant Twisted Clamp modelo	12
Ilustración 8: Esquema flujo de trabajo	15
Ilustración 9: Planos Twist Kant Clamp	16
Ilustración 10: Proceso creativo del modelado de componentes mediante diseño generativo	19
Ilustración 11: La prótesis más reciente de Social Hardware	20
Ilustración 12: Suela reticulada en zapatillas de Under Armour Fuente: (Under Armour Autodesk LATAM, 2021).....	20
Ilustración 13: Partición biónica de Airbus.....	21
Ilustración 14: Optimización paramétrica(a), de forma (b), topológica(c)	22
Ilustración 15: Tipo de concentración de malla Fuente: [8].....	23
Ilustración 16: Nodo y elemento Fuente: (Mirlessana, 2016) [10]	24
Ilustración 17: Estructuras discretas y continuas.....	26
Ilustración 18: Tipos de mallados.....	28
Ilustración 19: Fabricación mediante SLA.....	31
Ilustración 20: Fabricación mediante FDM.....	32
Ilustración 21: Fabricación en polvo mediante MJF	32
Ilustración 22: Kant Twist Clamp.....	34
Ilustración 23: Partes que componente Kant Twisted Clamp	35
Ilustración 24: Tipo con mango redondo Fuente: (Kant Twist Catalog)[25]	36
Ilustración 25: Tipo "Deep Throat" Fuente: (Kant Twist Catalog)[25]	36

Ilustración 26: Tipo con almohadillas redondas	Fuente: (Kant Twist Catalog)[25]	.....37
Ilustración 27: Kant twist "3-Jaws"	Ilustración 28: "Hold down"	.....37
Ilustración 29: Planos de conjunto prensa de sujeción.		.....38
Ilustración 30: Medidas Kant Twist Clamp.		.....40
Ilustración 31: Propuesta de estado de cargas.		.....42
Ilustración 32: Diseño brazo A		.....45
Ilustración 33: Diseño brazo B		.....45
Ilustración 34: Bisagra A diseño		.....46
Ilustración 35: Diseño bisagra B		.....47
Ilustración 36: Diseño agarres de la pinza		.....47
Ilustración 37: Conjunto pieza en Solid Edge		.....48
Ilustración 38: Ángulo con brazos cerrados	Fuente: Elaboración propia	.....49
Ilustración 39: Ángulo con brazos abiertos		.....50
Ilustración 40: Características de análisis FEM		.....51
Ilustración 41: División superficie orificio		.....52
Ilustración 42: Fuerza y restricciones en brazo B		.....52
Ilustración 43: Características mallado	Fuente: Elaboración propia	.....53
Ilustración 44: Resultados FEM inicial brazo B		.....53
Ilustración 45: Resultados FEM inicial brazo A		.....54
Ilustración 46: Modelo I preservaciones	Ilustración 47: Modelo II preservaciones	.....55
Ilustración 48: Modelo III preservaciones.	Fuente: Elaboración propia	.....56
Ilustración 49: Modelo IV preservaciones.	Fuente: Elaboración propia	.....56
Ilustración 50: Modelo V preservaciones.	Fuente: Elaboración propia	.....57
Ilustración 51: Zonas de preservación brazo A.	Fuente: Elaboración propia	.....58
Ilustración 52: Zonas de preservación brazo B.	Fuente: Elaboración propia	.....58
Ilustración 53: Iteración I brazo A.		.....59
Ilustración 54: Iteración I brazo B		.....60
Ilustración 55: Simetría en diseño final brazo A.	Fuente: Elaboración propia	.....61
Ilustración 56: Simetría en diseño final en brazo B.	Fuente: Elaboración propia	.....61
Ilustración 57: Iteración II – reducción del 10%.	Fuente: Elaboración propia	.....62
Ilustración 58: Iteración III – reducción del 20%	Fuente: Elaboración propia	.....62

Ilustración 59: Iteración IV – reducción del 30%	Fuente: Elaboración propia	63
Ilustración 60: Iteración V – reducción del 40%	Fuente: Elaboración propia	64
Ilustración 61: Iteración II (B) – reducción del 7%	Fuente: Elaboración propia	65
Ilustración 62: Iteración III (B) – reducción del 15%	Fuente: Elaboración propia	66
Ilustración 63: Iteración IV (B) – reducción del 20%	Fuente: Elaboración propia	66
Ilustración 64: Iteración V (B) – reducción del 30%	Fuente: Elaboración propia	67
Ilustración 65: FEM cargas cerrado en abierto. Fuente: Elaboración propia.....		68
Ilustración 66: FEM cargas abierto en abierto. Fuente: Elaboración propia.....		68
Ilustración 67: FEM cargas abierto en cerrado. Fuente: Elaboración propia.....		69
Ilustración 68: FEM cargas cerrado en abierto. Fuente: Elaboración propia.....		69
Ilustración 69: Parámetros de ajuste PolyNURBS.		72
Ilustración 70: Suavizado incorrecto en agujeros.....		73
Ilustración 71: Suavizado correcto en Altair Inspire.		74
Ilustración 72: Metodología de I3D.....		75
Ilustración 73: Tolerancias archivos “.stl”		76
Ilustración 74: Detalle de cómo afecta el tamaño de capa		77
Ilustración 75: Tipos de estructuras de relleno.....		77
Ilustración 76: Ensamblaje y tolerancias.....		78
Ilustración 77: Anisotropía en I3D		79
Ilustración 78: Tecnologías de impresión.		79
Ilustración 79: Detalles piezas en Cura.....		81
Ilustración 80: Parámetros impresión Markforged brazo B Fuente: Elaboración propia ..		82
Ilustración 81: Parámetros impresión Markforged brazo A.....		83
Ilustración 82: Configuración corte por chorro de agua		84
Ilustración 83: Fabricación en MJF		85
Ilustración 84: Fabricación en FDM.....		85
Ilustración 85: Fabricación por corte de chorro de agua.....		86
Ilustración 86: Prototipos sin optimizar, impreso en polvo, impreso en PLA		86
Ilustración 87: Brazo A en polvo, PLA, Onyx con fibra de vidrio Fuente: Elaboración propia		87
Ilustración 88: Corte por chorro de agua (2D) vs. CFR (3D) Fuente: Elaboración propia.		87

Ilustración 89: Curvas de costes I3D vs. Tradicional88

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades del acero inoxidable.	Fuente: Solid Edge .....39
Tabla 2: Medidas características.....	41
Tabla 3: Valores estándar fuerza.	41

Índice de acrónimos

OT: Optimización topológica

DG: Diseño Generativo

CDG: Criterios de Diseño Generativo

I3D: Impresión 3D

FA: Fabricación Aditiva

FEM: “Finite Element Method”: Método de los Elementos Finitos.

PLA: Ácido poliláctico

DMLS: Sinterización Directa por Láser de Metal

MJP: Impresión de Múltiples Inyectores

CFR: Refuerzo Continuo con Fibras

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO GENERATIVO

En un contexto global caracterizado por un crecimiento constante de la innovación tecnológica y su progresiva integración en todos los sectores industriales, resulta lógico que también comience a desempeñar un papel relevante en los procesos de rediseño y mejora de productos.

Dentro de este panorama tecnológico emergente, el diseño generativo se consolida como una metodología innovadora que gana popularidad entre las empresas. Compañías líderes como *General Motors, Jacobs Engineering o Cummins* ya han apostado por implementar el diseño generativo en determinados desarrollos, con el objetivo de mejorar el rendimiento y la eficiencia de sus productos.

El diseño generativo emplea algoritmos e inteligencia artificial para generar múltiples alternativas a partir de un conjunto de parámetros definidos, con el propósito de maximizar una función objetivo establecida. Entre estos parámetros se incluyen aspectos como el peso de la pieza, las tensiones que soporta, el material de fabricación o la geometría inicial del componente.

El diseño generativo representa una tendencia de futuro en el sector de la fabricación, ya que, como se analizará en detalle en el estado de la cuestión, proporciona numerosos beneficios. Entre ellos destaca su capacidad para optimizar topológicamente las piezas, generando soluciones estructurales que resultan poco intuitivas para el diseñador humano. En este enfoque, los algoritmos eliminan material de un volumen inicial respetando las condiciones de carga, de manera que se obtiene una geometría que emplea la menor cantidad de material posible sin comprometer su funcionalidad, eficiencia e integridad estructural.

A continuación, se presenta un esquema general del uso de criterios de diseño generativo en el proceso de diseño.

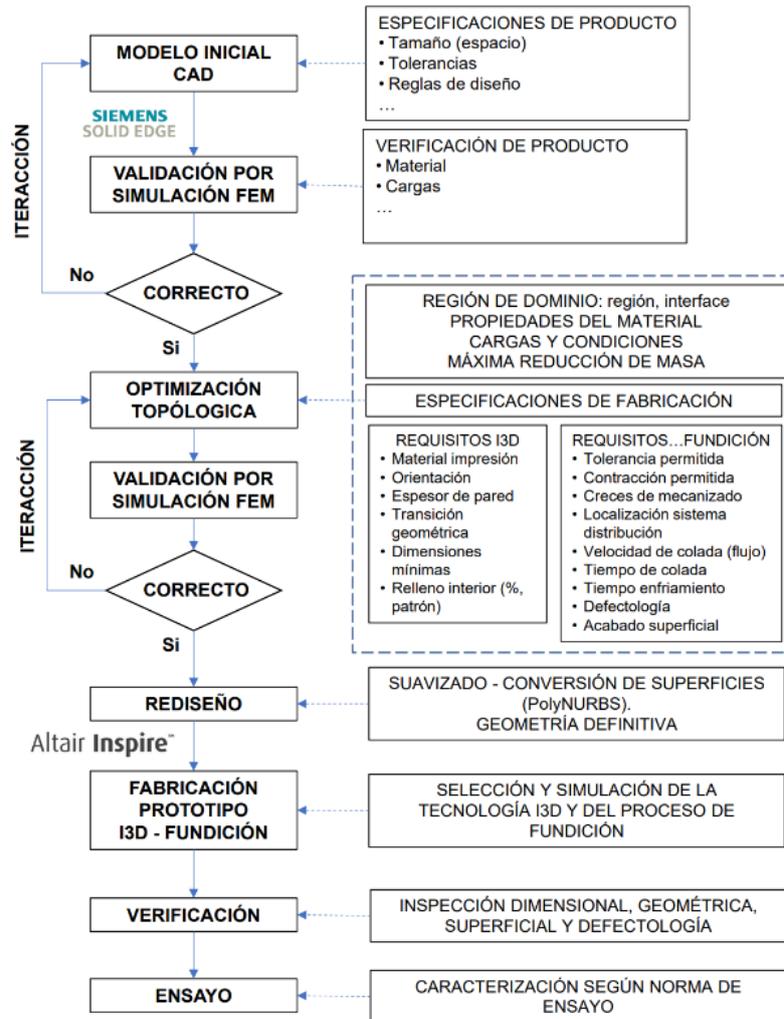


Ilustración 6: Esquema de trabajo con DG

La propuesta de este Trabajo de Final de Grado consiste en analizar el estado de cargas y, posteriormente, aplicar el diseño generativo a los brazos que componen una prensa de sujeción paralela, señalizados en rojo y verde en la Ilustración 7, con el objetivo de garantizar una mejora en el rendimiento topológico, y económico de la pieza.

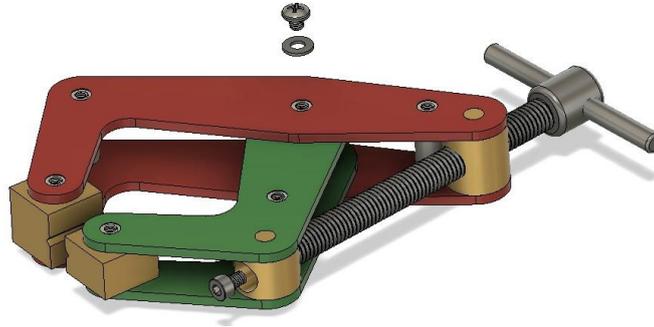


Ilustración 7: Kant Twisted Clamp modelo

Fuente: (Kant Twist Clamp and Engineering drawing) [2]

1.2 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La motivación principal de este trabajo nace del interés por aplicar tecnologías emergentes, como el diseño generativo y la fabricación aditiva, en la mejora de componentes industriales convencionales. Este proyecto integra diseño, ingeniería e innovación tecnológica con el objetivo de demostrar cómo es posible optimizar piezas mecánicas de manera eficiente, rentable y sostenible.

La elección de una prensa de sujeción paralela como objeto de estudio se justifica por tratarse de una pieza útil, aunque poco estandarizada, lo que permite explorar su rediseño como modelo aplicable a otros casos similares. Se trata de una herramienta útil en entornos de trabajo donde se requiere precisión y fijación estable de piezas, pero cuya disponibilidad comercial es limitada en comparación con otras herramientas similares. Sirve como ejemplo de cómo las metodologías de diseño generativo pueden aplicarse a una amplia gama de productos, permitiendo innovar en sectores donde aún persisten soluciones técnicas ineficientes.

Este trabajo tiene un gran potencial debido al abanico de beneficios que ofrece el aplicar el diseño generativo junto a la fabricación aditiva en el rediseño de piezas industriales. La posibilidad de optimizar una pieza no solo a nivel estructural, sino también en términos de

eficiencia, sostenibilidad y costes de producción, hace del proyecto un reto muy atractivo. Asimismo, este trabajo parte de una observación crítica: muchos diseños industriales actuales siguen utilizando estructuras sobredimensionadas o mal adaptadas a las cargas reales que soportan.

Este proyecto permite adquirir experiencia práctica en el uso de software de análisis estructural y diseño generativo, así como en la fabricación mediante impresión 3D, competencias altamente demandadas en la ingeniería actual. Con ello, se pretende no solo optimizar el rendimiento de la pieza seleccionada, sino también contribuir al avance hacia metodologías de diseño más eficientes, sostenibles e innovadoras. La verdadera ventaja de dominar estas herramientas es que, una vez comprendidas sus bases, el límite lo pone la propia creatividad. Con el conocimiento adecuado, es posible optimizar casi cualquier objeto de nuestro entorno.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal es plantear una propuesta de rediseño optimizado de una prensa de sujeción paralela, centrándose en la optimización topológica de las mordazas (los brazos del conjunto). El propósito es aplicar técnicas de diseño generativo para reducir la masa de las piezas sin comprometer las propiedades mecánicas ni la funcionalidad principal de la pieza.

Para alcanzar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Modelar la prensa de sujeción en Solid Edge y realizar un análisis del estado de cargas durante su funcionamiento, verificando que se cumplen los criterios de rigidez exigidos.
- Adquirir un manejo competente de las herramientas de análisis por elementos finitos (FEM) y diseño generativo (DG) disponibles en Solid Edge, con el fin de simular, evaluar e iterar el diseño hasta obtener una solución optimizada.

- Investigar los distintos tipos de fabricación aditiva y sus características, con el objetivo de seleccionar la tecnología más adecuada para materializar un prototipo físico funcional del rediseño propuesto.

1.3.1 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Este TFG se alinea con los siguientes ODS establecidos por la ONU:

Objetivo nº9: Industrial, Innovación e Infraestructura

Este proyecto fomenta la innovación en el rediseño de la prensa de sujeción paralela apoyándose en el diseño generativo y la impresión 3D. El diseño generativo fomenta nuevas soluciones al eliminar las limitaciones asociadas a formas tradicionales, permitiendo la creación de estructuras optimizadas para su función específica. Por su parte, la impresión 3D permite afrontar con eficacia geometrías complejas, lo que puede acelerar tanto la comercialización de nuevos productos como la producción ágil de piezas de repuesto.

Objetivo nº12: Producción y Consumo responsable

El uso de diseño generativo contribuye a una fabricación más eficiente y sostenible, al reducir la cantidad de material necesario sin comprometer el rendimiento funcional de las piezas. Además, gracias a la simulación virtual, es posible evaluar y validar los diseños antes de su fabricación física, lo que mejora los tiempos de desarrollo, reduce el desperdicio de recursos y optimiza globalmente el proceso de producción.

1.4 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para la realización de este proyecto, se llevarán a cabo tres fases consecutivas, como se muestra en la Ilustración 8. En azul la primera fase: diseño y estado de cargas de las piezas, en naranja la siguiente: optimización topológica con criterios de diseño generativo, y en morado: fabricación y análisis final.

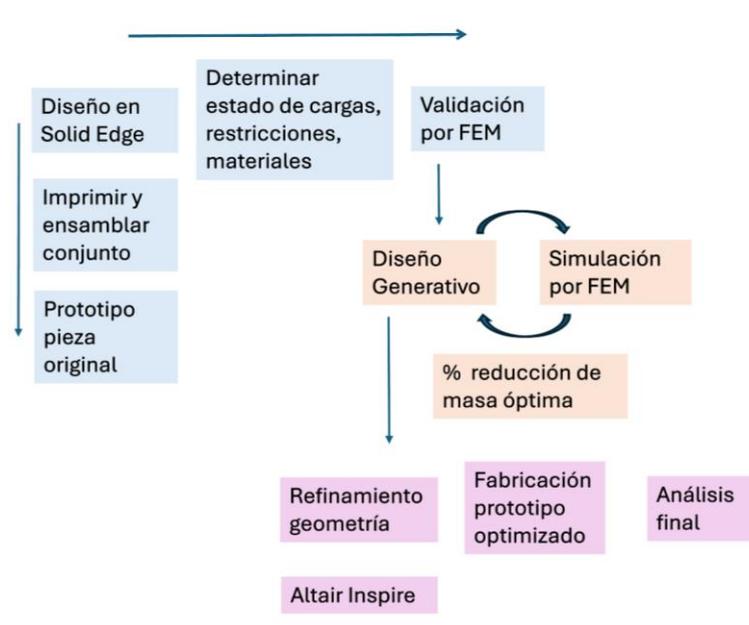


Ilustración 8: Esquema flujo de trabajo

Fuente: Elaboración propia

En la primera etapa se diseñan en Solid Edge todos los elementos que componen la prensa de sujeción paralela, a excepción del eje normalizado, el cual será fabricado por separado. Para ello se utilizan las medidas mostradas en la Ilustración 9 aplicando un factor de escala de 1:1.25 para obtener un prototipo cómodo con el que trabajar.

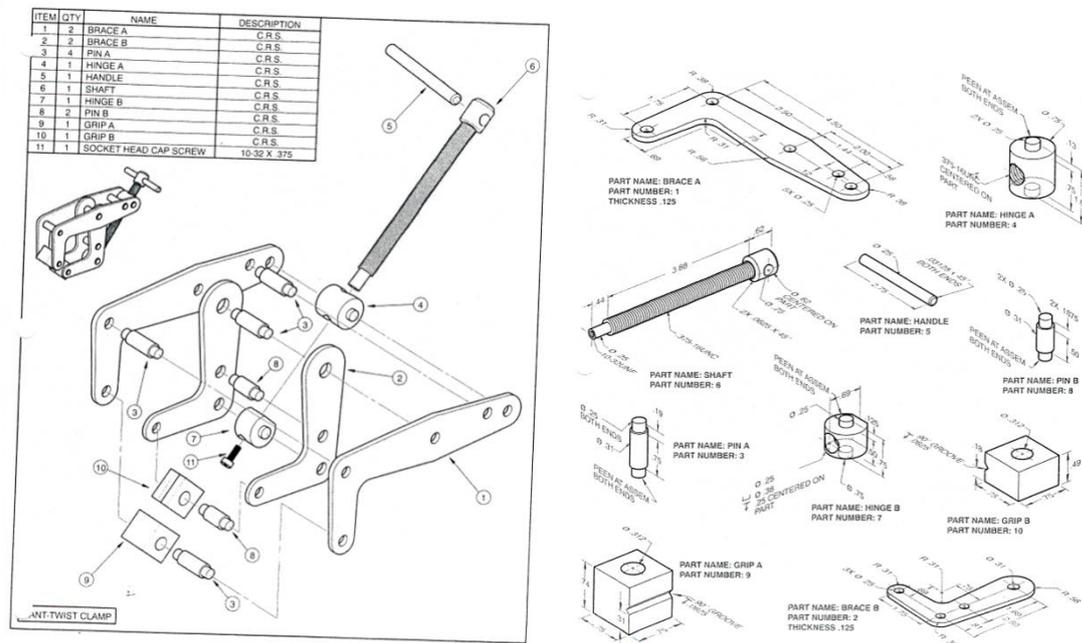


Ilustración 9: Planos Twist Kant Clamp

Fuente: (“Kant twist clamp assembly”)[1]

Posteriormente, se realiza el ensamblaje digital de la pieza para verificar el correcto ajuste de las piezas con los *pins*. Se fabrica un primer prototipo mediante impresión en fundición y se ensambla físicamente el conjunto.

En esta primera etapa también se busca determinar el estado de cargas al que están sometidos los brazos de la prensa de sujeción, ya que constituyen los elementos principales del conjunto y son el objetivo principal del proceso de optimización. A partir de las dimensiones del prototipo impreso es posible calcular el valor numérico de la fuerza que actúa sobre los brazos en los puntos de sujeción de los *grips*, como resultado de la acción-reacción generada durante el funcionamiento de la herramienta.

Asimismo, se analizan las condiciones de contorno, prestando especial atención a las restricciones impuestas por los agujeros presentes en los brazos, que pueden funcionar como apoyos articulados o fijos, según el montaje y la transmisión de cargas. En cuanto al material,

típicamente esta pieza se fabrica en acero, cuyas propiedades mecánicas se tendrán en cuenta durante el análisis.

Con todos los parámetros definidos, se lleva a cabo un primer análisis por el método de los elementos finitos (FEM), para verificar que la pieza no presenta fallos estructurales. Se comparan las tensiones máximas obtenidas con el límite elástico del material, asegurando que el diseño inicial cumple los criterios de resistencia.

La segunda fase del proyecto consiste en la optimización topológica de los brazos de sujeción. Es un proceso iterativo donde al software, a partir de unas especificaciones iniciales definidas, proponen un rediseño buscando cumplir la reducción de masa establecida. Una vez obtenida una primera geometría optimizada se valida mediante simulación por el método de los elementos finitos (FEM). En caso de que el diseño no cumpla con los criterios de resistencia, se procede a una nueva iteración del diseño generativo, ajustando las condiciones de preservación de región o los parámetros hasta alcanzar una solución que garantice la rigidez y el comportamiento mecánico adecuado.

Con la geometría optimizada y validada, se da paso a la tercera y última fase del proyecto: la fabricación del prototipo y el análisis final. A la pieza generada mediante diseño generativo se le debe realizar un proceso de refinamiento geométrico, el cual se lleva a cabo utilizando el software Altair Inspire. Esta etapa permite suavizar las superficies y eliminar irregularidades propias del diseño automatizado, facilitando así su impresión en 3D. Se realiza una nueva simulación FEM para asegurar que las propiedades estructurales se mantienen. Confirmada su validez, se selecciona la tecnología de impresión 3D más adecuada en función de la geometría final de las piezas, precisión y coste. Tras la fabricación, se ensamblan los brazos optimizados en la estructura de la prensa y se verifica que se ha logrado la reducción de masa sin comprometer su funcionalidad.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La solución tecnológica que se implementará se divide en dos grandes áreas; el rediseño de la pieza mediante diseño generativo y la fabricación del prototipo mediante fabricación aditiva.

2.1 FUNDAMENTOS DEL DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo se ha consolidado como una de las metodologías más innovadoras dentro del desarrollo de productos y la ingeniería avanzada. Su aplicación permite superar las limitaciones de los enfoques tradicionales, aportando un marco en el que la creatividad se combina con el rigor computacional. Para comprender su potencial, resulta esencial conocer los principios que sustentan su funcionamiento y los factores clave que determinan su eficacia en el proceso de diseño. Gracias al diseño generativo, es posible eliminar material innecesario, centrándose únicamente en las zonas que realmente absorben esfuerzos mecánicos, lo que se traduce en una masa optimizada y una resistencia mejorada [1].

El diseño generativo es un método de diseño que utiliza algoritmos y la inteligencia artificial para generar propuestas de diseño a partir de unos parámetros especificados, buscando maximizar la función objetivo proporcionada al algoritmo. El diseño generativo constituye una herramienta avanzada para los fabricantes en el desarrollo de productos y componentes, al permitir la exploración automatizada de soluciones de diseño optimizadas. Su integración con tecnologías como la fabricación aditiva maximiza el aprovechamiento geométrico y funcional, ampliando significativamente las capacidades de diseño y manufactura [2].

La aplicación del diseño generativo se inicia con un diseño previo sobre el que se define qué geometría debe conservarse. A continuación, se establecen los parámetros, límites y reglas que condicionarán la generación automática de propuestas. Una vez configurados estos elementos, se realiza el estudio generativo que produce distintos resultados de diseño. Estos resultados se evalúan frente a los requisitos establecidos: si no los cumplen, se modifican los parámetros y se repite el proceso iterativo hasta obtener una solución satisfactoria. Finalmente, el diseño seleccionado se valida para su posterior implementación[3].

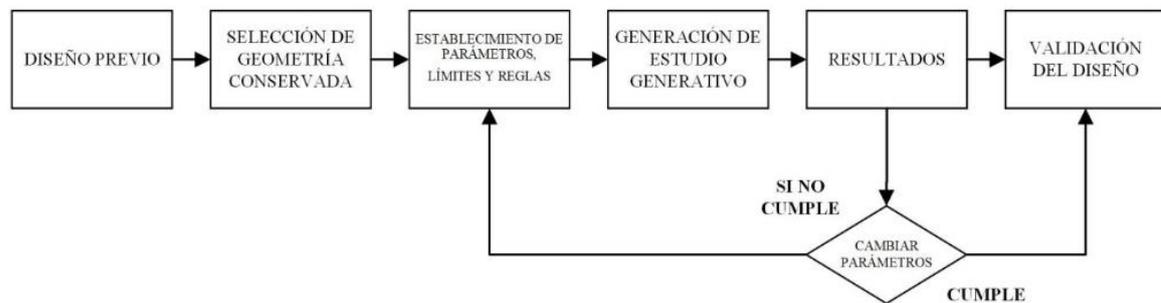


Ilustración 10: Proceso creativo del modelado de componentes mediante diseño generativo

Fuente: (Alcantar, 2023)[3]

2.2 DISEÑO GENERATIVO APLICADO AL MUNDO REAL

Una de las grandes ventajas del diseño generativo es la versatilidad que ofrece y la gran variedad de áreas en las que se puede integrar para crear soluciones innovadoras. El diseño generativo ofrece soluciones únicas y eficientes en campos como: la ingeniería, la arquitectura, la moda y diseño de producto, la medicina o la industria del automóvil y aeroespacial.

En el ámbito médico, el diseño generativo ha permitido avanzar significativamente en la personalización de implantes y prótesis. Un ejemplo significativo es el del equipo de Social Hardware, que rediseñó un conector de muñeca protésico logrando reducir su peso de 300 a 96 gramos sin comprometer su resistencia. Además, utilizaron esta tecnología para crear un

diseño más transpirable, capaz de reducir problemas como el calor y la sudoración en climas húmedos o durante trabajos intensos. Esta solución, pensada para personas de bajos ingresos, demuestra cómo el diseño generativo puede contribuir a crear productos funcionales, accesibles y con una estética cuidada. [4]



Ilustración 11: La prótesis más reciente de Social Hardware

Fuente: (Social Hardware Autodesk)[4]

En el área de la moda, la marca de zapatillas mundialmente reconocida *Under Armour* fue capaz de diseñar unas zapatillas utilizando diseño generativo y apoyándose en la impresión 3D, creando suelas reticuladas con mayor flexibilidad y comodidad para el usuario [4]. Este enfoque permitió optimizar la distribución del material y generar estructuras complejas que habrían sido imposibles de fabricar con métodos tradicionales. Gracias al diseño generativo, se lograron geometrías ligeras y altamente personalizadas que mejoran la absorción de impactos y la adaptabilidad al movimiento natural del pie. Además, la fabricación aditiva facilitó la producción rápida de prototipos y la personalización a gran escala, demostrando el potencial de estas tecnologías en la creación de productos innovadores y de alto rendimiento.



Ilustración 12: Suela reticulada en zapatillas de Under Armour

Fuente: (Under Armour Autodesk LATAM, 2021)

Otro ejemplo destacado en el ámbito de la ingeniería aeroespacial lo encontramos en *Airbus*, que ha aplicado esta tecnología para optimizar componentes estructurales en aeronaves comerciales. Concretamente *Airbus* ha implementado el diseño generativo en el desarrollo de la "*Partición Biónica*", una mampara divisoria para la cabina del avión *A320*. Utilizando el diseño generativo se logró una reducción de peso del 45% en comparación con diseños tradicionales, manteniendo la resistencia estructural necesaria. Esta innovación no solo mejora la eficiencia del combustible al reducir el peso del avión, sino que también podría contribuir a una disminución significativa de las emisiones de CO₂ si se aplica en toda la flota del A320. [5]

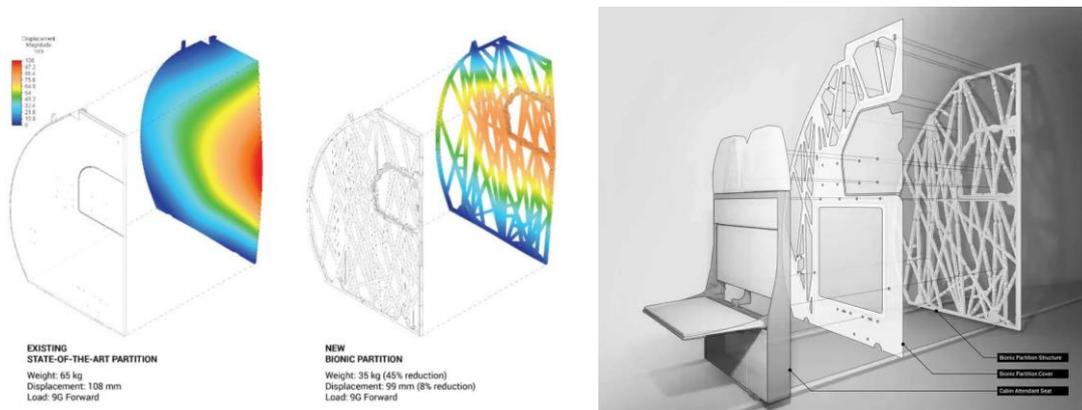


Ilustración 13: Partición biónica de Airbus

Fuente: (Bionic Partition for Airbus, 2016) [5]

2.3 FUNDAMENTOS OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La optimización topológica es una técnica matemática que permite determinar cómo debe distribuirse el material dentro de un dominio de diseño para mejorar el rendimiento estructural bajo unas condiciones de carga y restricciones concretas. A diferencia de otros métodos como la optimización de forma o de tamaño, este enfoque permite que cambie la conectividad del material, lo que hace posible crear o eliminar cavidades y zonas sólidas dentro de la pieza.

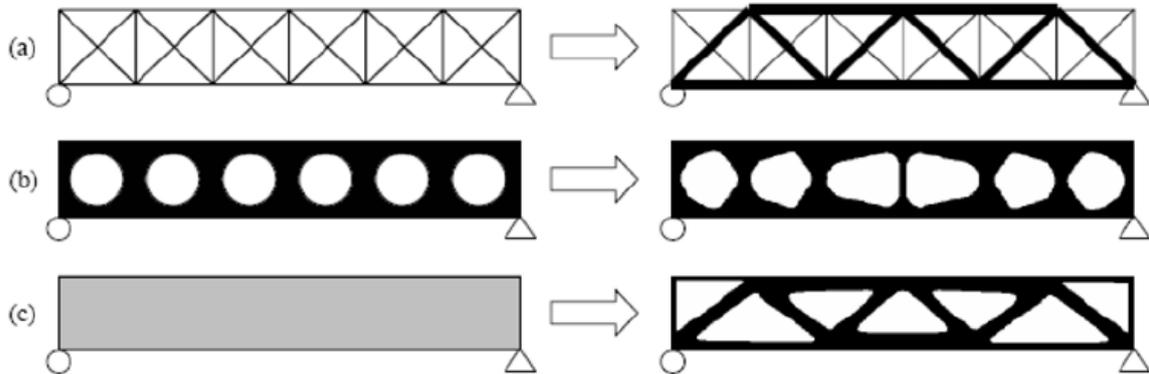


Ilustración 14: Optimización paramétrica(a), de forma (b), topológica(c)

Fuente: (Efecto de fracción volumétrica) [6]

El problema de maximizar la rigidez con una restricción de volumen es especialmente relevante en Ingeniería Mecánica y de Estructuras, ya que permite reducir el peso final de un componente sin perder rigidez ni funcionalidad. Lograr partes mecánicas más ligeras implica menos consumo de material y, en aplicaciones de transporte, una reducción significativa del consumo de combustible. Además, disminuir la inercia en piezas en movimiento, ya sea en maquinaria o en vehículos, contribuye a reducir la energía necesaria para su funcionamiento [7].

Aunque la optimización topológica ofrece muchas ventajas, presenta algunas limitaciones importantes que conviene considerar:

- Dependencia de los parámetros de entrada

La calidad de la solución depende en gran medida de definir de forma precisa las condiciones de carga, las restricciones de contorno y las propiedades del material. Variaciones o incertidumbres en estos datos pueden dar lugar a diseños poco robustos o que pierdan eficacia si cambian ligeramente las condiciones reales.

- Problemas numéricos y dependencia de la malla

Uno de los problemas más habituales es el efecto tablero de ajedrez, que genera alternancia de elementos llenos y vacíos sin sentido práctico. Para reducirlo se aplican filtros de sensibilidad que suavizan la distribución de material. Además, la resolución de la malla es determinante: un mallado muy fino puede producir microestructuras complejas y difíciles de fabricar, mientras que un mallado demasiado grueso puede simplificar en exceso la geometría y perder detalles importantes. Por este motivo, se busca un equilibrio entre precisión del diseño, robustez numérica y viabilidad de fabricación.

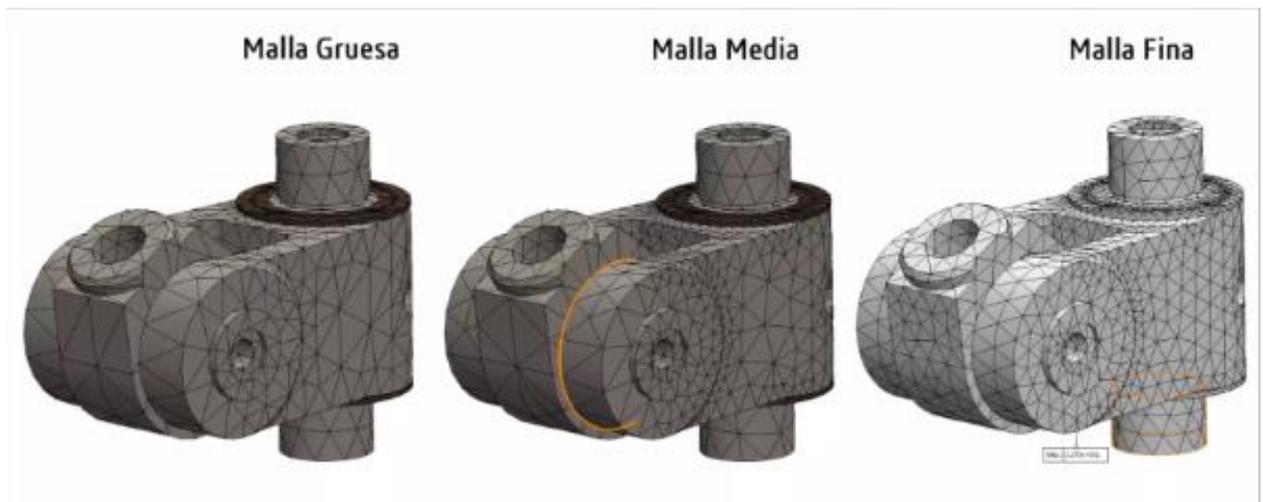


Ilustración 15: Tipo de concentración de malla Fuente: [8]

2.4 MÉTODO ELEMENTOS FINITOS (FEM)

El Análisis de Elementos Finitos es una técnica numérica utilizada para resolver problemas complejos en ingeniería, como la deformación estructural, la transferencia de calor y la dinámica de fluidos. Consiste en descomponer un dominio continuo en una malla de elementos finitos interconectados por nodos, permitiendo aproximar soluciones a ecuaciones diferenciales mediante sistemas de ecuaciones algebraicas [9].

El análisis de elementos finitos, a partir de ahora referido como FEM por sus siglas en inglés, hace posible optimizar y refinar diseños completos antes del proceso de fabricación.

Mediante una simulación ayuda a visualizar dónde se doblan o retuercen las estructuras, e indica la distribución de tensiones y desplazamientos.

En este contexto, se define el nodo como el punto de la malla donde se concentran los desplazamientos y se aplican cargas o restricciones, mientras que el elemento corresponde a una porción finita de la geometría que conecta nodos y en la que se calculan los esfuerzos y las deformaciones.

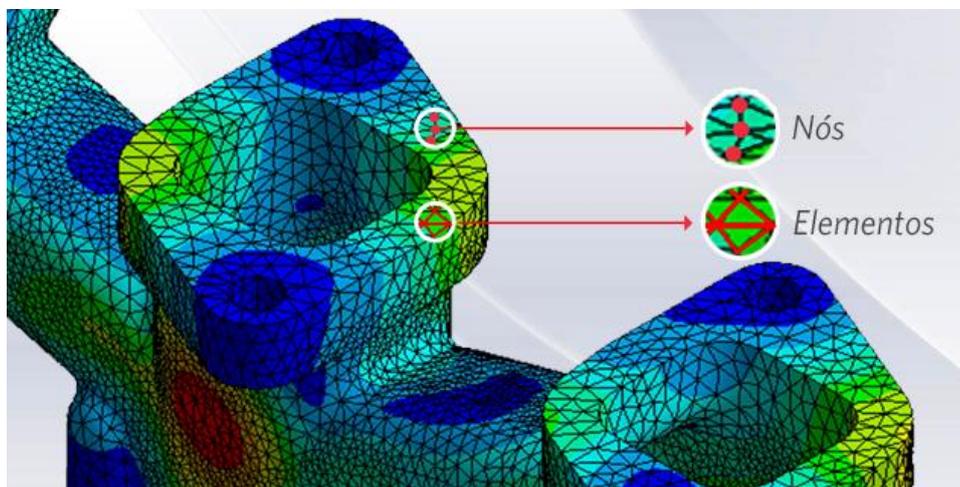


Ilustración 16: Nodo y elemento

Fuente: (Mirlessana, 2016) [10]

Incógnitas y grados de libertad:

En el análisis por elementos finitos, los grados de libertad (GDL) de un nodo determinan su capacidad para experimentar traslaciones o rotaciones en el espacio. La cantidad de GDL que posee un nodo depende directamente del tipo de elemento al que está asociado, así como del tipo de análisis realizado[11].

Cada grado de libertad representa una incógnita dentro del sistema de ecuaciones que el modelo FEM debe resolver. En el contexto del análisis estructural, estas incógnitas suelen interpretarse como los desplazamientos de cada nodo. Estos desplazamientos constituyen las variables primarias del problema y son, por tanto, el primer objetivo de cálculo en cualquier simulación FEM. Una vez obtenidos, es posible derivar a partir de ellos magnitudes secundarias como tensiones o deformaciones.

Criterios de convergencia:

Un análisis por FEM se considera convergente si al disminuir el tamaño de los elementos, y por lo tanto aumentar el número de nudos y de elementos, la solución obtenida tiende hacia la solución exacta.[12]

Limitaciones de la simulación

Cuando se trabaja con cualquier programa de Elementos Finitos (FEM), es importante tener claras sus ventajas y, al mismo tiempo, ser consciente de sus limitaciones. El análisis por elementos finitos se basa en varios supuestos principales [11]:

- El material se comporta de manera lineal.
- Las deformaciones estructurales son pequeñas.
- Las cargas aplicadas son estáticas.

Estas hipótesis son habituales en el software de FEM que se emplea en entornos de diseño, y la mayoría de los proyectos similares funcionan correctamente dentro de estas restricciones. Además, es importante tener en cuenta que la calidad de la simulación depende en gran medida de la definición adecuada de las condiciones de contorno, de la correcta elección del mallado y de las propiedades asignadas a los materiales. Una simplificación excesiva en cualquiera de estos aspectos puede conducir a resultados poco representativos de la realidad.

También hay que considerar que el modelo no contempla posibles fenómenos dinámicos, efectos térmicos, ni tampoco el comportamiento no lineal del material o de la geometría, salvo que se activen módulos específicos que incrementan la complejidad y el tiempo de cálculo.

2.4.1 ESTRUCTURAS DISCRETAS O RETICULARES Y CONTINUAS

El tipo de estructura es un aspecto clave a la hora de plantear y ensamblar las ecuaciones que gobiernan el modelo de cálculo explicado anteriormente. En análisis estructural, normalmente se distinguen dos grandes categorías de estructuras: discretas y continuas.



Ilustración 17: Estructuras discretas y continuas

Fuente: (Celigüeta, 2021)

Las estructuras discretas están formadas por un conjunto de elementos bien definidos que se conectan en puntos concretos, generando una retícula o malla. En este tipo de sistemas, la deformación puede describirse de forma precisa mediante un número finito de parámetros, como los desplazamientos en los nodos de unión. Gracias a esto, es posible plantear las ecuaciones de equilibrio en función de estos desplazamientos y resolver el problema de forma relativamente directa.

En cambio, en las estructuras continuas no se puede descomponer el sistema en un número limitado de elementos discretos, ya que cualquier parte de la estructura está en contacto con infinitos puntos del material circundante. Por este motivo, los métodos empleados en modelos discretos no se pueden aplicar tal cual, y es necesario recurrir a un enfoque basado en ecuaciones diferenciales que describan el comportamiento del medio continuo en cada punto del dominio [12].

2.4.2 IMPORTANCIA DEL MODELO DE MALLA UTILIZADO EN FEM

El proceso de discretización, mejor conocido como mallado, divide la geometría en entidades relativamente pequeñas y en forma simple, llamados elementos finitos. Los elementos se llaman así para enfatizar el hecho de que no son infinitamente pequeños, sino que son razonablemente pequeños en comparación con el tamaño total del modelo.

Un modelo de malla adecuado y preciso es uno de los componentes esenciales para obtener resultados de simulación confiables y exactos al realizar un análisis de elementos finitos (FEM). Tanto el número de elementos en el modelo como la configuración de la malla influyen significativamente en el proceso de simulación. Mientras que una malla con elementos muy grandes puede generar resultados inexactos, una malla demasiado densa prolonga excesivamente el tiempo de simulación y consume una gran cantidad de recursos.

Aunque es tentador utilizar una densidad de malla constante para todo el modelo, esta práctica resulta ineficiente y derrocha recursos cuando se analiza el problema en sí. En lugar de ello, la malla debe ser capaz de representar adecuadamente los cambios previstos en las variables del problema.

En muchos estudios de simulación mediante FEM, no se considera el impacto de una malla insuficiente o inadecuada en el tiempo de procesamiento del CPU y en el tamaño del archivo generado. Por ello, es fundamental encontrar un equilibrio entre la precisión del modelo y la eficiencia en el tiempo de procesamiento, teniendo en cuenta además el tamaño del archivo.

Existen cuatro tipos de modelos de malla utilizados comúnmente en análisis de elementos finitos: a) Tetraedro, b) Hexaedro polar, c) Hexaedro dipolar, d) Hexaedro mariposa.[13]

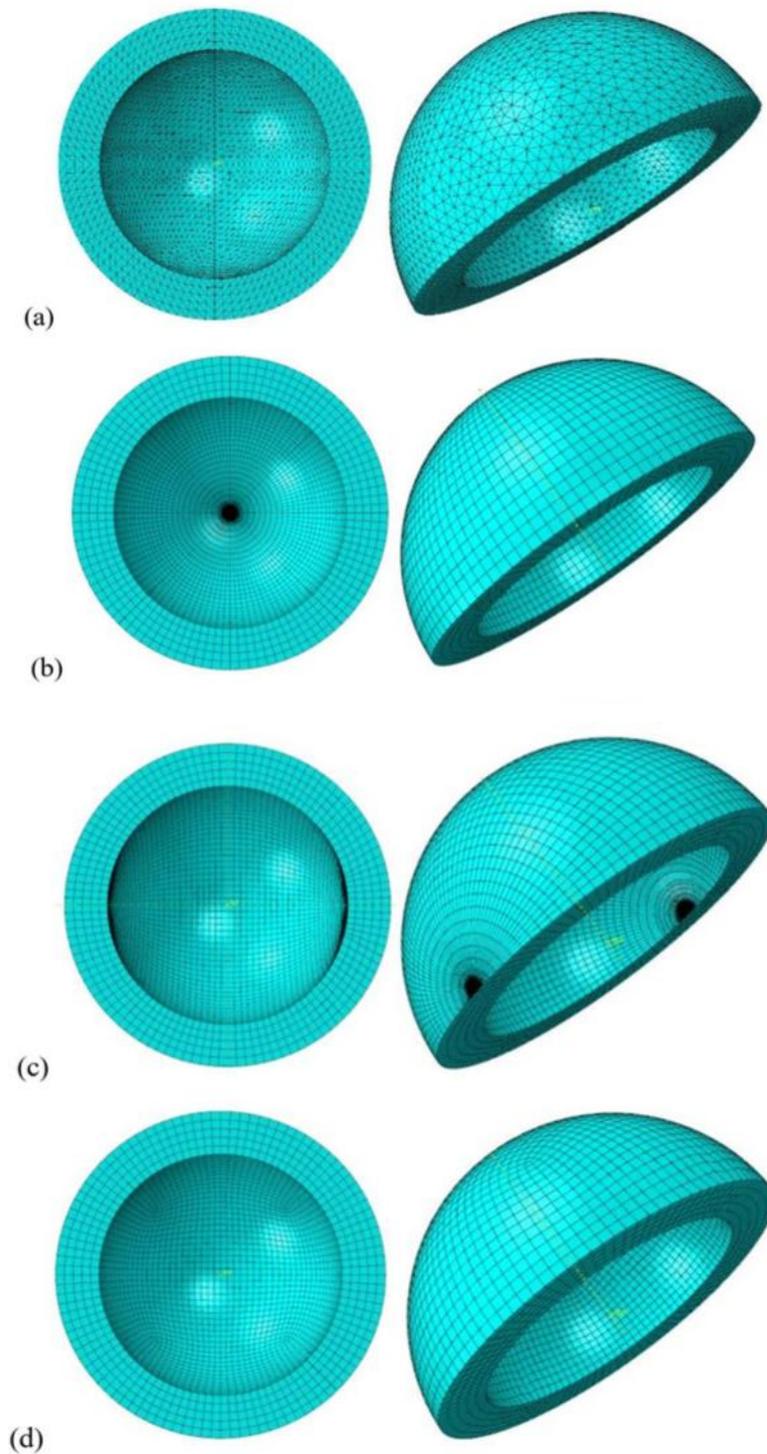


Ilustración 18: Tipos de mallados

Fuente: (Hidayat et al., 2023)[13]

2.4.3 TIPO DE SIMULACIONES FEM EN SOLID EDGE

Antes de comenzar un estudio de elementos finitos en Solid Edge, es fundamental elegir correctamente el tipo de análisis que se va a utilizar, ya que de ello depende que los resultados sean representativos y útiles. A continuación se resumen las opciones principales y sus aplicaciones [14]:

- Análisis estático lineal

Se emplea para calcular desplazamientos, deformaciones, tensiones y reacciones bajo cargas que se aplican de manera gradual hasta alcanzar su valor final, permaneciendo constantes en el tiempo. Es el más habitual cuando las condiciones de carga son estáticas y no varían durante el estudio.

- Análisis de frecuencia modal

Sirve para determinar las frecuencias naturales a las que una pieza o un conjunto vibran de forma libre, así como las formas de deformación asociadas a cada modo. Es especialmente útil para identificar posibles problemas de resonancia.

- Análisis de pandeo lineal

Permite calcular la carga crítica a partir de la cual la estructura pierde estabilidad y patea. Es necesario en piezas o ensamblajes con geometría esbelta sometidos a compresión axial, donde el pandeo puede convertirse en la condición de fallo determinante.

- Análisis dinámico

Es un enfoque más avanzado que contempla efectos dependientes del tiempo o de la frecuencia, incluyendo fenómenos como la amortiguación y la variación de rigidez. Resulta adecuado cuando las cargas varían de forma dinámica y es necesario estudiar la respuesta transitoria o en régimen vibratorio.

2.5 FUNDAMENTOS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva, denominada FA, consiste en la creación de un objeto físico mediante la deposición sucesiva de capas finas de material, siguiendo con precisión la geometría definida en un archivo digital. Ha experimentado un rápido desarrollo tecnológico y una expansión significativa en sectores tan diversos como la aeronáutica, la automoción, la medicina o la producción de bienes de consumo, consolidándose como una herramienta clave para la innovación industrial.

El proceso se inicia con el diseño tridimensional de la pieza en un software *CAD*, cuya información se convierte a un formato estándar, habitualmente .stl, que describe la superficie de la geometría mediante mallas triangulares. Posteriormente, el modelo se segmenta en capas a través de un programa de “*slicing*”, generando las instrucciones necesarias para la máquina, que incluyen parámetros como la trayectoria del cabezal, la velocidad de deposición, la temperatura de trabajo y el espesor de cada capa. Esta metodología permite reproducir con gran fidelidad formas complejas que serían imposibles de fabricar por métodos tradicionales [15].

Respecto a los procesos convencionales de mecanizado y modelado, la fabricación aditiva ofrece numerosas ventajas. Una de las más relevantes es la posibilidad de materializar geometrías complejas sin incrementar el coste de producción, lo que facilita la creación de estructuras ligeras, canales internos o superficies personalizadas. Además, permite fabricar piezas únicas o series cortas sin necesidad de utillajes específicos, favoreciendo la personalización masiva y la adaptación a la demanda del mercado [16]. Entre sus beneficios destacan también la reducción del consumo de material, al utilizar únicamente la cantidad estrictamente necesaria, y la disminución de tiempos de desarrollo, lo que acorta el ciclo de diseño y lanzamiento de productos.

2.5.1 CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA

En la fabricación aditiva existen diversas tecnologías que se diferencian según el estado inicial del material y el método de consolidación capa a capa. A continuación, se presentan diferentes clasificaciones posibles:

Según el **estado del material empleado** [16]:

- Material en estado líquido
 - Estereolitografía (SLA): Fotopolimerización de resina líquida mediante láser UV.
 - PolyJet: Inyección de gotas de fotopolímero y curado por luz UV.
 - Impresión con tintas metálicas (NPJ): Deposición de nanopartículas en suspensión líquida.

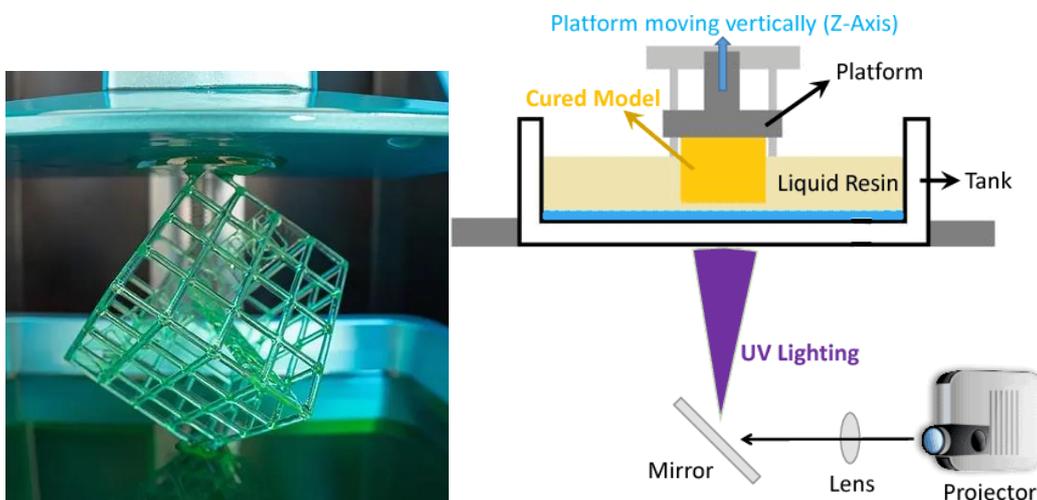


Ilustración 19: Fabricación mediante SLA

Fuente: (Impresión 3D por SLA, 2020)[17]

- Material en estado sólido
 - FDM/FFF (Modelado por Deposición de Filamento Fundido): Extrusión de filamento termoplástico.
 - LOM (Laminated Object Manufacturing): Corte y unión de láminas sucesivas.

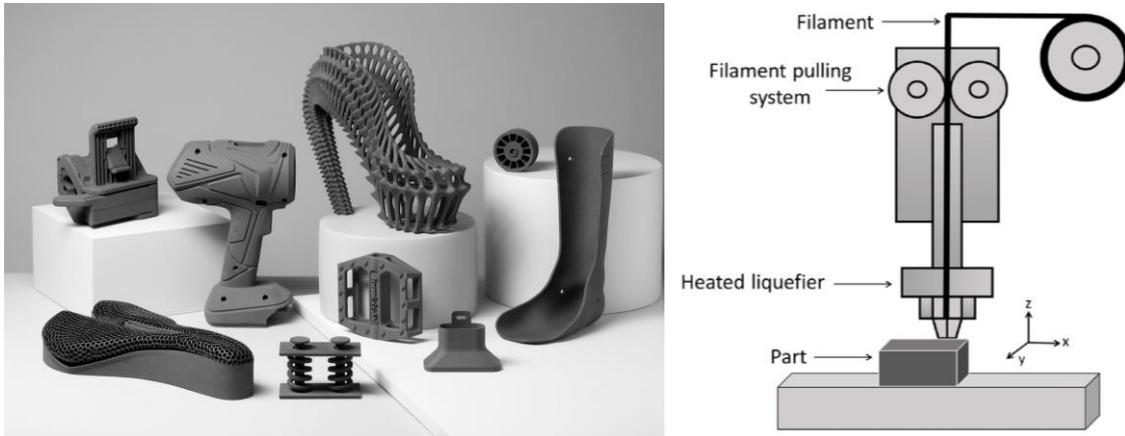


Ilustración 20: Fabricación mediante FDM

Fuente: (Alice, 2024)[18]

- Material en forma de polvo
 - SLS (Sinterizado Selectivo por Láser): Sinterización parcial de polvo polimérico o metálico.
 - SLM (Fusión Selectiva por Láser): Fusión completa de polvo metálico.
 - EBM (Fusión por Haz de Electrones): Fusión completa en vacío mediante electrones.
 - Prometal: Unión mediante aglutinantes.



Ilustración 21: Fabricación en polvo mediante MJF

Fuente: (Zahera, 2012)[15]

Según **la aplicación** [15]:

- Prototipado rápido: Modelos de validación y verificación geométrica
 - SLA, FDM, PolyJet
- Fabricación directa o producción final: Piezas funcionales con propiedades mecánicas completas
 - SLM, EBM, WAAM
- Fabricación de moldes o utillajes:
 - Moldes rápidos mediante LOM o SLS

2.5.2 PERSPECTIVAS DE FUTURO Y TENDENCIAS

Entre las tendencias más destacadas se encuentra el avance constante en la impresión 3D de metales, que permite fabricar componentes complejos con propiedades mecánicas comparables a las de los procesos convencionales. La consolidación de tecnologías está facilitando la producción de piezas finales en sectores como la aeronáutica, la automoción o la medicina, donde la reducción de peso y la libertad geométrica aportan ventajas competitivas significativas. Además, se espera que en los próximos años se desarrollen nuevos materiales metálicos optimizados para procesos aditivos, así como sistemas de monitorización en tiempo real que permitan mejorar la calidad y la repetibilidad de las piezas fabricadas [19]. Otro aspecto relevante será la integración de procesos híbridos que combinen fabricación aditiva con mecanizado de alta precisión para alcanzar tolerancias más exigentes y acabados superficiales de mayor calidad. Finalmente, la digitalización completa de la cadena de valor y el concepto de “fábrica distribuida” permitirán producir piezas personalizadas bajo demanda en ubicaciones cercanas al consumidor final, impulsando un cambio profundo en los modelos de negocio industriales [20].

2.6 KANT TWISTED CLAMP

La pieza a la que se propone hacer un rediseño a través de criterios de diseño generativo es la herramienta *Kant Twisted Clamp*, en español conocida como sargento de sujeción o prensa de fijación paralela. La prensa de sujeción paralela se podría considerar un tipo, de abrazaderas *C* con un diseño más elaborado. Esta herramienta tiene como propósito principal sujetar de forma segura piezas metálicas, especialmente durante procesos de taladrado, atornillado, soldadura, o mecanizado. Su diseño permite aplicar una fuerza uniforme y firme, garantizando que las piezas permanezcan en la posición deseada sin deslizamientos ni movimientos involuntarios.[21]

El principio fundamental que hace funcionar esta herramienta es el diseño voladizo del mismo, como se puede ver en la Ilustración 22. El diseño único de esta herramienta permite que al cerrar las mordazas el material que se ve sujetado no se mueva, algo que sucede con las *C-clamps* tradicionales. Asimismo, el diseño permite multiplicar la fuerza de sujeción con una fuerza mínima de esfuerzo, en el caso de la prensa de sujeción el ratio suele ser 4:1.[22]



Ilustración 22: Kant Twist Clamp

Fuente: (Penntool co) [23]

Ventajas de las prensas de sujeción paralela tipo Kant Twist [24] :

- **Acceso optimizado:** Permiten sujetar piezas en zonas de difícil acceso o con geometrías irregulares, al no requerir soporte en ambos extremos.
- **Diseño simplificado:** Eliminar un punto de apoyo reduce la complejidad y el volumen de material necesario.
- **Ligereza:** A igual capacidad, son significativamente más ligeras que las abrazaderas en C tradicionales.
- **Estabilidad de los agarres:** Los agarres flotantes permanecen planos sobre la superficie, incluso si no es completamente paralela, evitando torsiones.

Las partes que componen la herramienta, y de las que se hará reiterada mención a lo largo de la memoria, se muestran en la Ilustración 23.

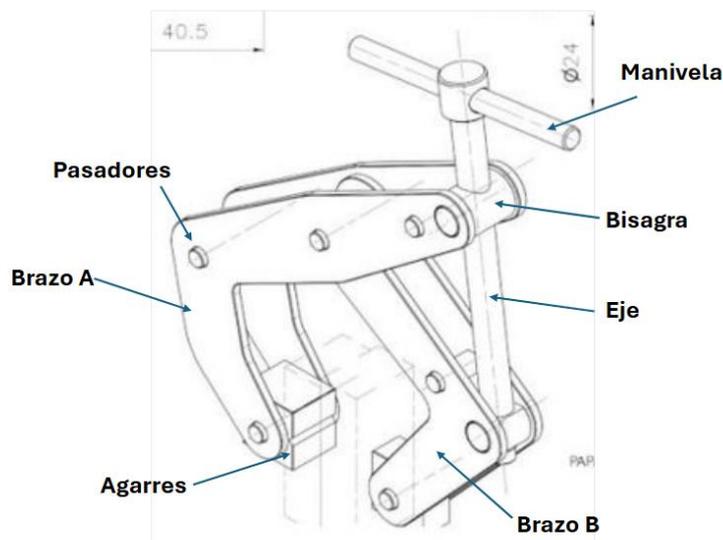


Ilustración 23: Partes que componen Kant Twisted Clamp

Fuente: (Elaboración Propia)

2.6.1 TIPOS DE PRENSAS KANT-TWIST

Existen diferentes tipos de la prensa de sujeción paralela Kant-Twist, adaptadas a diferentes necesidades de sujeción [25]. El modelo estándar incorpora un mango en forma de “T”, ofreciendo un manejo robusto y polivalente. También existen modelos de acero inoxidable, diseñados para entornos corrosivos o con requerimientos magnéticos especiales. En aplicaciones donde se requiere mayor precisión o comodidad, se emplean versiones con mango redondo, que permiten un ajuste más fino del par de apriete.



Ilustración 24: Tipo con mango redondo Fuente: (Kant Twist Catalog)[25]

Las variantes “Deep Throat” amplían la capacidad de alcance, permitiendo sujetar elementos más alejados del borde.



Ilustración 25: Tipo "Deep Throat" Fuente: (Kant Twist Catalog)[25]

Para superficies delicadas, las versiones “No-Mar” incorporan almohadillas redondas que evitan marcas o deformaciones.

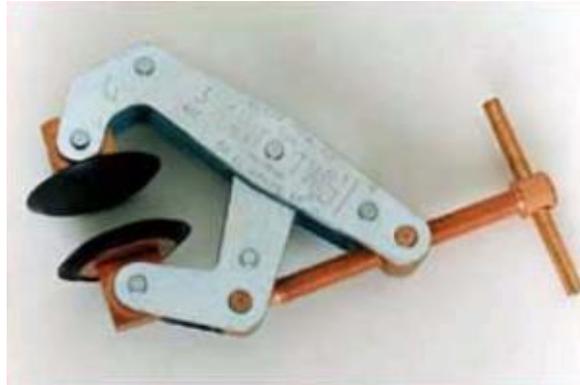


Ilustración 26: Tipo con almohadillas redondas Fuente: (Kant Twist Catalog)[25]

Las prensas “3-Jaw” incorporan una tercer brazo, proporcionando presión en múltiples direcciones y facilitando tareas como soldadura o encolado.

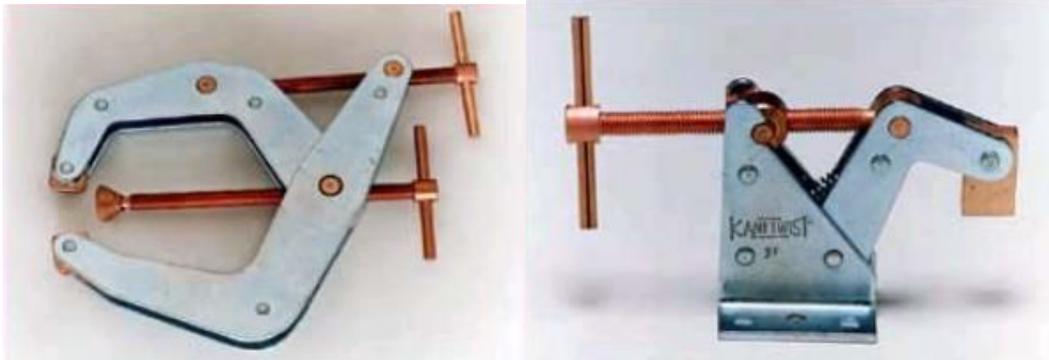


Ilustración 27: Kant twist "3-Jaws"

Ilustración 28: "Hold down"

Fuente: (Kant Twist Catalog)[25]

Por último, los modelos “Hold-Down” y “Poly Jaw” se especializan en fijaciones rápidas y en el trabajo con materiales blandos, respectivamente, gracias a sus mordazas de poliuretano de baja dureza.

Capítulo 3. PROPUESTA DE ESTUDIO

3.1 GEOMETRÍA PROPUESTA

La fase inicial de proyecto parte del diseño de todos los elementos que forman el conjunto de la prensa de sujeción paralela. Para poder llevar a cabo el modelo se hará uso de los planos de conjunto “Kant Twist Clamp” mostrados en la Ilustración 29. Estos planos proporcionan información sobre el diseño y el montaje de la herramienta, incluyendo dimensiones precisas en pulgadas y cantidades necesarias de cada pieza.

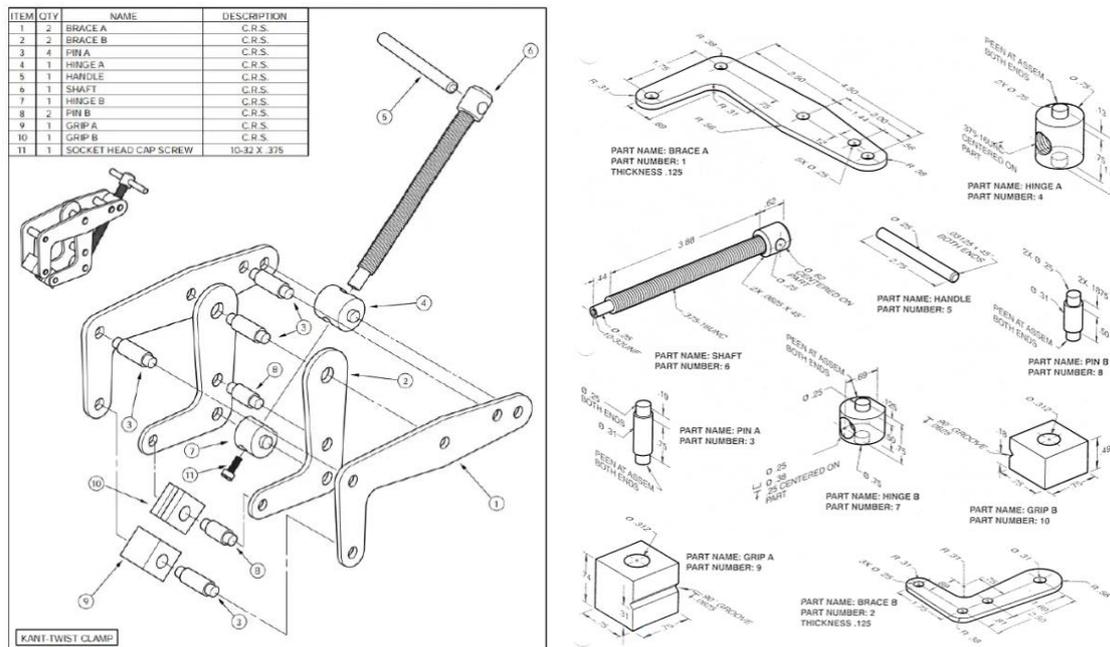


Ilustración 29: Planos de conjunto prensa de sujeción.

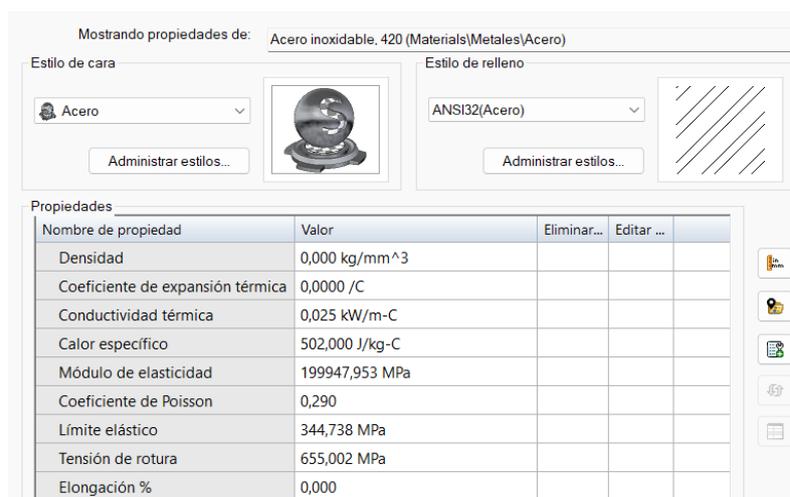
Fuente: (“Kant Twist Clamp Assembly”) [1]

3.2 PROPUESTA DE MATERIALES

La elección del material que se utilizará para los brazos de sujeción en el análisis por elementos finitos (FEM) y el diseño generativo (DG) se ha basado en los materiales comúnmente empleados en este tipo de componentes. En el mercado, estas piezas se pueden encontrar principalmente fabricadas en acero inoxidable, como se puede comprobar en catálogos industriales especializados, por ejemplo, McMaster-Carr. [26]

Concretamente, se ha optado por el uso de acero inoxidable AISI 420, un material ampliamente utilizado en aplicaciones donde las piezas están sometidas a esfuerzos mecánicos y posibles impactos, como es el caso de los brazos de sujeción. Este tipo de acero pertenece a la familia de los aceros martensíticos. Se caracteriza por su alta dureza, buena resistencia al desgaste y una resistencia a la corrosión moderada.

Es importante tener en cuenta las propiedades mecánicas de este material, en particular su límite elástico, dureza y tenacidad, ya que, al optimizar la geometría de la pieza, se busca garantizar que esta no sufra roturas ni deformaciones permanentes bajo las condiciones de trabajo previstas. La Tabla 1 recopila todas las propiedades del acero inoxidable AISI 420 utilizadas en este trabajo, extraídas del software Solid Edge.



Mostrando propiedades de: Acero inoxidable, 420 (Materials\Metales\Acero)			
Estilo de cara	Estilo de relleno		
Acero	ANSI32(Acero)		
Administrar estilos...	Administrar estilos...		
Propiedades			
Nombre de propiedad	Valor	Eliminar...	Editar ...
Densidad	0,000 kg/mm ³		
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C		
Conductividad térmica	0,025 kW/m-C		
Calor específico	502,000 J/kg-C		
Módulo de elasticidad	199947,953 MPa		
Coefficiente de Poisson	0,290		
Límite elástico	344,738 MPa		
Tensión de rotura	655,002 MPa		
Elongación %	0,000		

Tabla 1: Propiedades del acero inoxidable.

Fuente: Solid Edge

3.3 CÁLCULO DE CARGAS

La carga que se asignará a cada una de las piezas corresponde a la fuerza de acción-reacción generada por el propio agarre de la mordaza durante la sujeción de las placas de acero en el proceso de soldadura. Según *Clamp Manufacturing Co*, la capacidad máxima de sujeción de este tipo de prensas está determinada por sus dimensiones características. La Ilustración 30 muestra dichas medidas, necesarias para denominar la fuerza de sujeción máxima. La Tabla 3 muestra los valores estándar asociados a estas medidas, así como la fuerza correspondiente a cada uno.

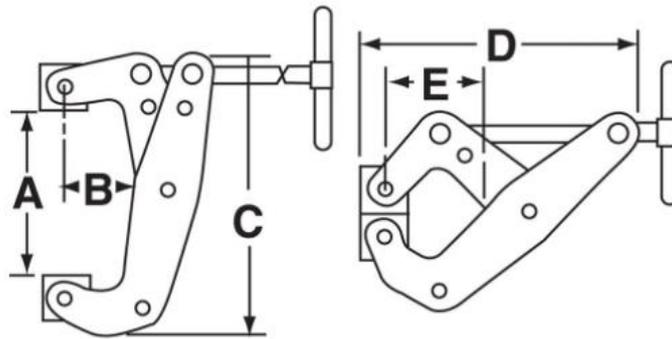


Ilustración 30: Medidas Kant Twist Clamp.

Fuente:(Clamp Manufacturing Co) [27]

Una vez realizado el modelado e impresión 3D del prototipo inicial, se han podido obtener las dimensiones A, B, C, D y E, las cuales se recogen en la Tabla 2. Dado que el diseño incorpora una manivela de tipo “T-Handle” y, conocidas las dimensiones características, se ha determinado que la fuerza máxima de sujeción alcanzable es de 450 lb, lo que equivale aproximadamente a 2006 N. Por tanto, en el estudio se aplicará una **magnitud de fuerza** de sujeción de carga de 2 kN.

Dimensión	A	B	C	D	E
cm	4	5.5	16	16.5	7

Tabla 2: Medidas características.

Fuente: Elaboración propia

**KANT TWIST CLAMPS
SPECIFICATIONS SHEET**

P/N	Size & Description		A	B	C	D	E	LOAD
396	3/4"	Round Handle	3/4"	3/8"	1 3/8"	1 1/2"	3/8"	200
401-1	1"	Round Handle	1"	1/2"	1 3/4"	2 1/8"	1/2"	350
403-1	1 1/2"	Round Handle	1 1/2"	1 1/8"	3"	3 1/16"	1"	600
405-1	2"	Round Handle	2"	1 1/8"	3 1/4"	3 1/2"	1 1/4"	800
401	1"	"T" Handle	1"	1/2"	1 3/4"	2 1/8"	1/2"	350
405	2"	"T" Handle	2"	1 1/8"	3 1/4"	3 1/2"	1 1/4"	800
407	2 1/2" D	Deep Throat	2 7/16"	2"	4 1/16"	4 1/8"	1 13/16"	700
410	3"	"T" Handle	3"	1 1/4"	5"	5 1/4"	1 3/4"	1500
415	4 1/2" D	Deep Throat	4 1/2"	2 1/4"	6 3/4"	7"	3 13/16"	1700
420	6"	"T" Handle	6"	2 1/8"	8 1/4"	8 1/4"	3 3/8"	2000
421	6" D	Deep Throat	6"	4 1/2"	10"	11"	5 1/2"	2000
430	9"	"T" Handle	9"	3 3/8"	13"	12"	5 1/4"	2500
435	10" D	Deep Throat	10"	6"	15"	16"	7"	3500
440	12"	"T" Handle	12"	5"	16 1/2"	16 1/2"	7"	6000

Tabla 3: Valores estándar fuerza.

Fuente: ("Kant Twist Clamp" [1])

Respecto a la **dirección y sentido de la fuerza**, para simplificar el análisis se considera que la carga ejercida sobre las mordazas se transmite a los pasadores que los conectan con los brazos, y de estos, directamente a los orificios correspondientes. Esta transmisión de carga se asume únicamente en la mitad inferior del agujero, definida por un plano paralelo a la superficie de sujeción de la mordaza, como muestra la Ilustración 31.

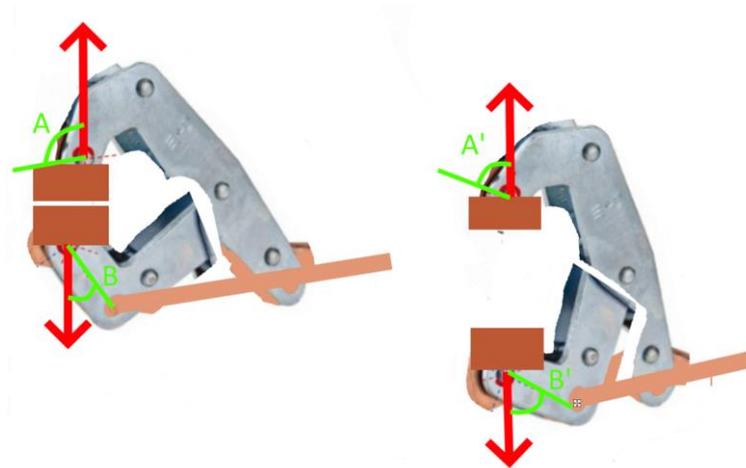


Ilustración 31: Propuesta de estado de cargas.

Fuente: Elaboración propia

El estado de cargas en los brazos presenta una variable crítica que modifica sustancialmente el estudio: la apertura de los brazos. Dependiendo de la posición angular de los brazos con respecto al eje roscado, la dirección de la fuerza incidirá sobre distintas zonas de la cara interna del orificio, lo que afecta directamente a la distribución de tensiones en el conjunto.

Por tanto, se estudiará la apertura máxima de los brazos y se analizarán los casos críticos del posicionamiento de los brazos, completamente abiertos y cerrados. Después se valorará las propuestas de diseño y se escogerá la geometría más crítica entre las dos. La fuerza de sujeción se aplicará de forma perpendicular a la cara interior de los orificios.

3.4 PROPUESTA DE RESTRICCIONES DE LAS PIEZAS

El último factor por determinar es el tipo de restricción y donde se restringen las piezas para poder simular correctamente el funcionamiento de estas.

En el brazo A, señalado como “*parte 1*” en despiece del conjunto, se modelan dos restricciones articuladas: el agujero del pasador que lo conecta con el brazo B y el orificio que aloja el soporte del eje roscado, “*parte 4*”.

El brazo B, “*parte 2*” en el despiece del conjunto, tiene restricciones en el agujero del pasador que lo conecta con el brazo A y en el agujero correspondiente a la bisagra roscada por la que pasa el eje. Ambos son restricción articuladas, donde se restringen los movimientos de translación en los tres ejes y la rotación en 2 de ellos.

3.5 PROPUESTA DE ITERACIÓN DE OT

Una vez definidos todos los factores relevantes para el estudio de optimización topológica (OT) de las piezas, se procede con el proceso iterativo con criterios de diseño generativo (DG). El objetivo principal de esta etapa es reducir al máximo el porcentaje de masa del componente sin comprometer su integridad estructural ni su funcionalidad.

El proceso de iteración se centrará inicialmente en la obtención de una geometría optimizada, mientras que en una fase posterior se buscará mejorar la calidad del análisis mediante el ajuste de parámetros como el tamaño del mallado o del vóxel. En este sentido, se debe tener en cuenta que cuantos menores sean estas dimensiones, mayor será la resolución y precisión del estudio, aunque también aumentará el coste computacional.

Capítulo 4. PROCEDIMIENTO E IMPLANTACIÓN

En este apartado se explicará en detalle los pasos de cada una de las fases propuestas en el flujo de trabajo para llevar a cabo la optimización de las piezas.

4.1 DISEÑO Y ESTADO DE CARGAS DE LAS PIEZAS

4.1.1 DISEÑO Y ENSAMBLAJE EN SOLID EDGE

Basándose en los planos de *Kant Twisted Clamp*, se procedió al diseño de todas las piezas que componen su ensamblaje. Posteriormente, se aplicó un proceso de optimización topológica a los brazos de la estructura, que constituyen los elementos principales del estudio.

Los planos de despiece y las cotas originales mostraban una prensa de sujeción paralela de dimensiones reducidas, poco adecuada para una manipulación cómoda. Por ello, se decidió escalar el modelo un 25 %, diseñándolo a una escala de 1,25 respecto a la original. Tras convertir todas las cotas de pulgadas a milímetros, se adoptó el sistema internacional de unidades para la totalidad del proyecto. Una vez comprendida la geometría global del sistema, se inició el modelado de las piezas.

El primer componente que se diseñó fue el brazo A. Tal y como se muestra en la Ilustración 32, esta pieza presenta cinco orificios no normalizados, cuya correcta alineación en los diferentes ejes resulta crítica para el funcionamiento del conjunto.

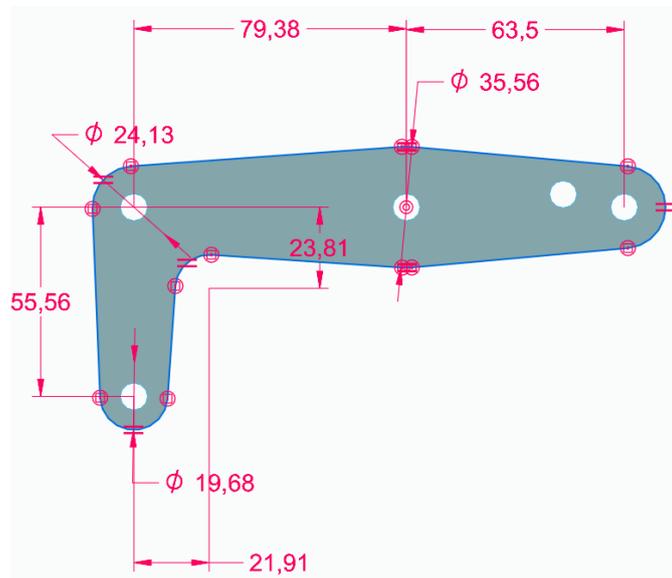


Ilustración 32: Diseño brazo A

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se diseñó el brazo B. Tanto este como el brazo A constituyen los elementos clave del conjunto, ya que sobre ellos se aplicó el procedimiento completo de optimización topológica.

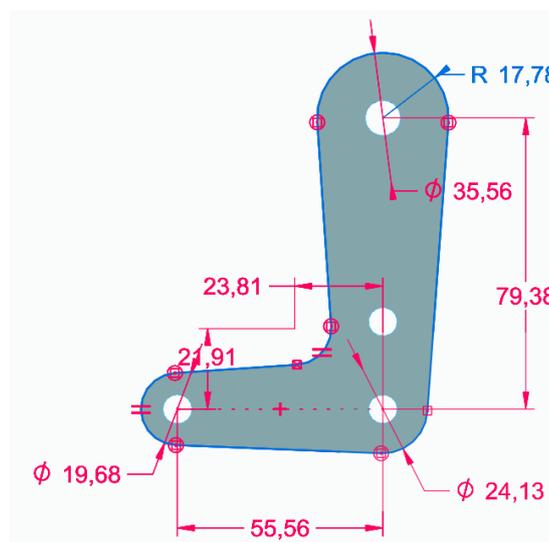


Ilustración 33: Diseño brazo B

Fuente: Elaboración propia

En ambos brazos los agujeros están destinados a facilitar el ensamblaje de la estructura articulada. Según el despiece, cada brazo está conformado por dos placas idénticas unidas con pasadores. En este sentido, se tuvo en cuenta el juego y el apriete, de forma que las tolerancias obtenidas mediante impresión 3D permitieran un montaje preciso. Más adelante se comentarán las diferentes técnicas de impresión 3D y los ajustes necesarios realizados para garantizar un encaje óptimo de los pasadores. Cabe destacar que algunos orificios debían permitir movimiento rotacional, por lo que no todos presentaron el mismo tipo de ajuste.

A continuación, se modelan los pasadores, cuya función es mantener unidas las distintas partes del conjunto. Es importante recalcar que hay dos tipos, los pasadores tipo A con mayor longitud, empleados para unir los dos brazos formados por las cuatro placas; y los tipos B, utilizados para unir las dos placas que conforman cada brazo.

Posteriormente, se diseñaron las bisagras (denominadas *hinges* en inglés), que se utilizaron en el montaje del eje normalizado. La bisagra A, según el despiece, presenta un orificio normalizado M12x1.5 (diámetro de 12 mm y paso de 1.5 mm). Sin embargo, dada la complejidad de reproducir una rosca de estas características mediante impresión 3D, se optó por diseñar un alojamiento para una tuerca estándar con roscado M12x1.5. De este modo, se consiguió que la bisagra pudiera desplazarse a lo largo del eje roscado.

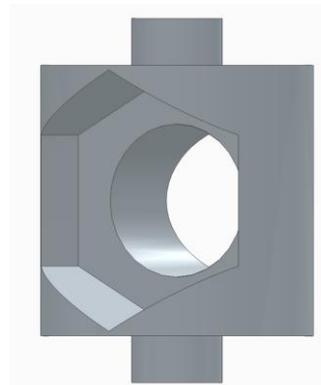


Ilustración 34: Bisagra A diseño

Fuente: Elaboración propia

La bisagra B, por su parte, tiene un orificio abocardado de dimensiones $\text{Ø}8 \times \text{Ø}15 \times 6 \text{ mm}$, así como un corte plano en uno de sus laterales. Este diseño actúa como punto de apoyo para el eje roscado, que se encuentra fijado mediante un tornillo M8.

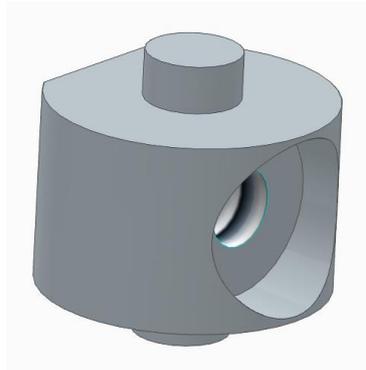


Ilustración 35: Diseño bisagra B

Fuente: Elaboración propia

Por último, se diseñan los agarres de la pinza, los cuales tienen una pequeña ranura longitudinal para facilitar la sujeción de objetos cilíndricos o con una superficie compleja.

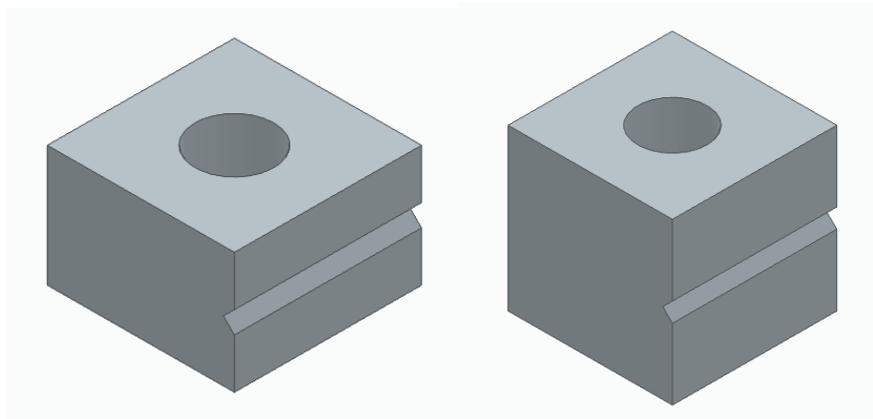


Ilustración 36: Diseño agarres de la pinza

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al eje normalizado, como se comentó en la introducción, no se modela en Solid Edge, ya que no se fabrica mediante impresión 3D, sino que se elaboró a partir de una varilla utilizando herramientas convencionales del laboratorio de fabricación de ICAI.

Una vez que todas las piezas están diseñadas se procedió al ensamblaje completo en Solid Edge. Este paso nos permite verificar que todas las medidas están en orden y que el conjunto funcionaba adecuadamente. Para el eje normalizado se utilizó un componente estándar descargado de la biblioteca de McMaster-Carr [26]. Durante el ensamblaje se emplearon relaciones de coincidencia, alineación axial, paralelismo e inserción, tal y como se muestra en la Ilustración 37.

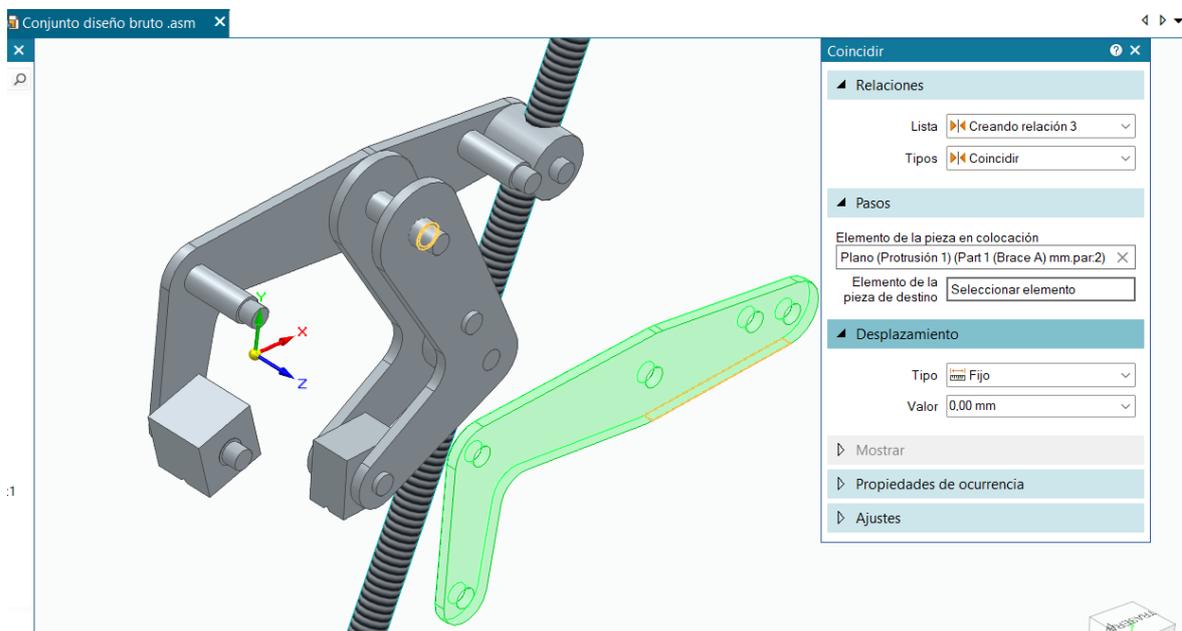


Ilustración 37: Conjunto pieza en Solid Edge

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 ASIGNAR MATERIALES, RESTRICCIONES Y CARGAS

A la hora de asignar el material a los brazos A y B, como se comentó en la propuesta de estudio, se usará acero inoxidable AISI 420 por sus múltiples beneficios y por su gran disponibilidad en el mercado, lo cual es un punto para tener en cuenta en cuanto al estudio económico de esta propuesta. Las restricciones son de tipo articuladas para los agujeros que encajan con el brazo contrario.

4.1.2.1 Estado de cargas restrictivo

En cuanto al estado de cargas, se ha tenido en cuenta que la dirección de las fuerzas aplicadas sobre los brazos varía en función del grado de apertura de estos. Por este motivo, se han analizado los casos extremos de posicionamiento, con el fin de representar adecuadamente las condiciones más desfavorables.

El primer paso consistió en determinar los ángulos formados entre la dirección vertical de la fuerza aplicada y el plano definido por los ejes de los pasadores. Para ello, se utilizó el ensamblaje completo del mecanismo en Solid Edge, lo que permitió calcular con precisión dichos ángulos. Un aspecto clave en el diseño de la herramienta es que estos ángulos presentan simetría respecto a la parte superior e inferior del sistema, como se puede apreciar en las Ilustración 38 e Ilustración 39.

Cuando los brazos están completamente cerrados el ángulo es de 45° aproximadamente.

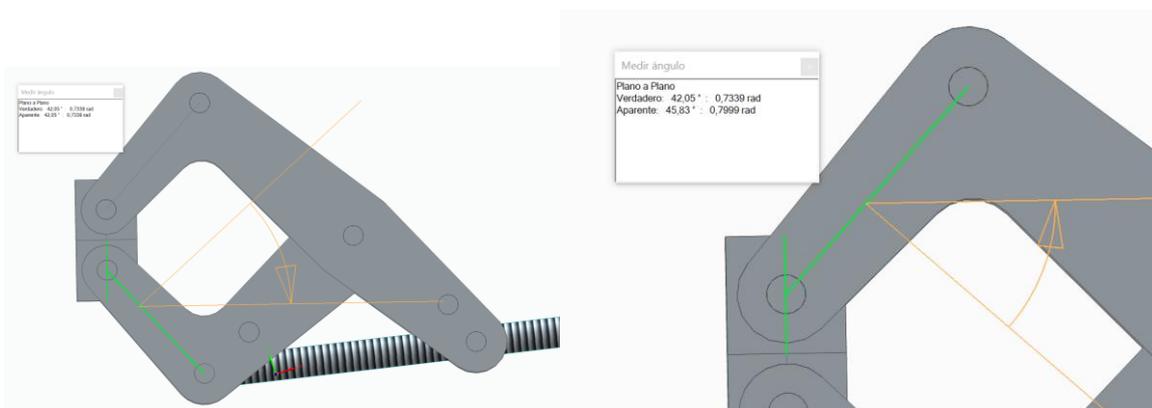


Ilustración 38: Ángulo con brazos cerrados Fuente: *Elaboración propia*

Cuando los brazos están completamente abiertos el ángulo es de 79° aproximadamente.

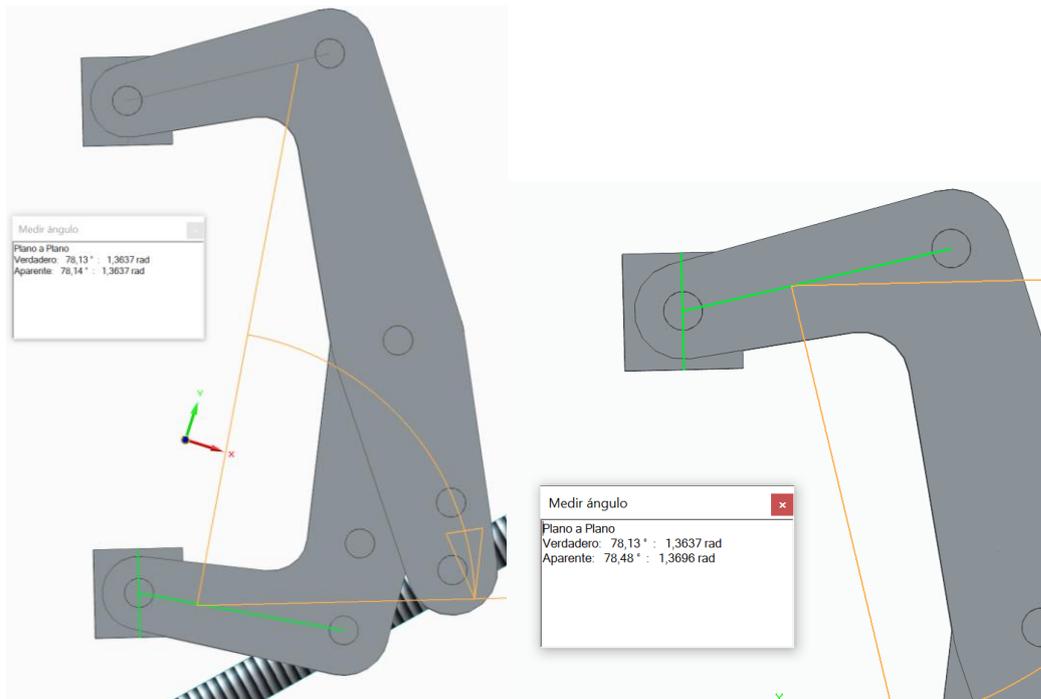


Ilustración 39: Ángulo con brazos abiertos

Fuente: Elaboración propia

Además, dado que cada brazo está formado por dos placas simétricas, se considera que la fuerza se distribuye de forma equitativa entre ambas. Por tanto, tal y como se calculó en la propuesta del estado de cargas, la fuerza total de acción-reacción que actúa sobre cada brazo es del orden de 2 kN, lo que implica que cada placa soportará aproximadamente 1 kN. Esta simplificación permite una asignación más realista de las cargas en el modelo de simulación, respetando la simetría estructural del diseño.

4.1.3 SIMULACIÓN FEM INICIAL

El análisis por elementos finitos permite predecir cómo se comportan los brazos A y B frente a las cargas aplicadas, proporcionando datos clave sobre la distribución de tensiones y deformaciones. Esta simulación inicial sirve para validar que las piezas resisten mecánicamente y detectar posibles zonas críticas antes de aplicar la optimización topológica.

El primer paso fue generar un estudio estático lineal con malla tetraédrica, adecuado para la geometría de los brazos y los esfuerzos a los que se ven sometidos.

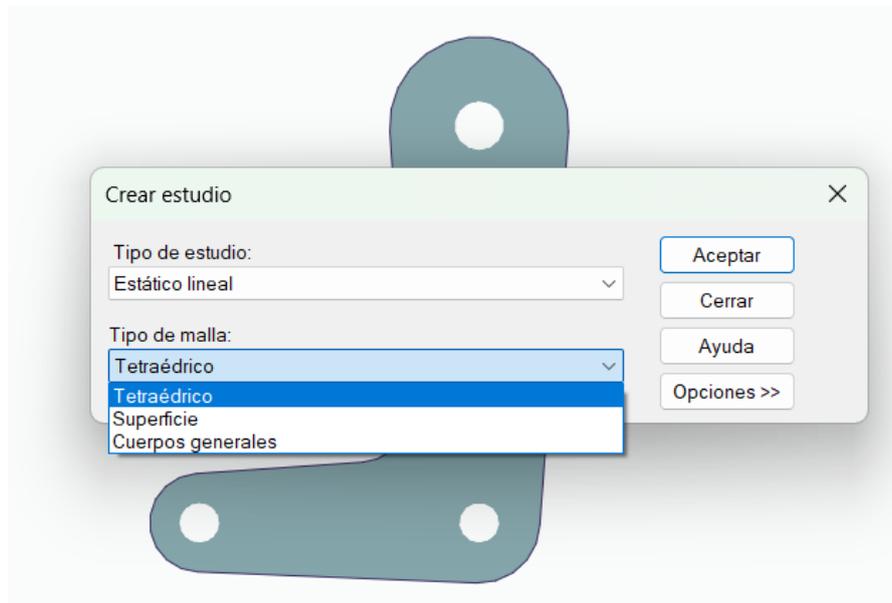


Ilustración 40: Características de análisis FEM

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de aplicar las cargas de manera localizada y realista, se procedió a dividir la superficie de los orificios, lo que permitió definir una zona específica de aplicación de fuerza.

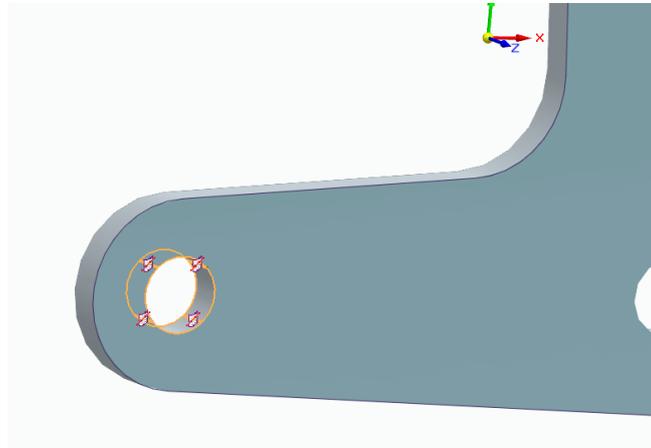


Ilustración 41: División superficie orificio

Fuente: Elaboración propia

Se aplicó una fuerza sobre dicha región, correspondiente al reparto de carga previamente calculado para cada placa (1 kN), y se establecieron condiciones de contorno de tipo articulado en los orificios de conexión con el resto del mecanismo, permitiendo la rotación e impidiendo desplazamientos en ciertas direcciones según el funcionamiento esperado del conjunto.

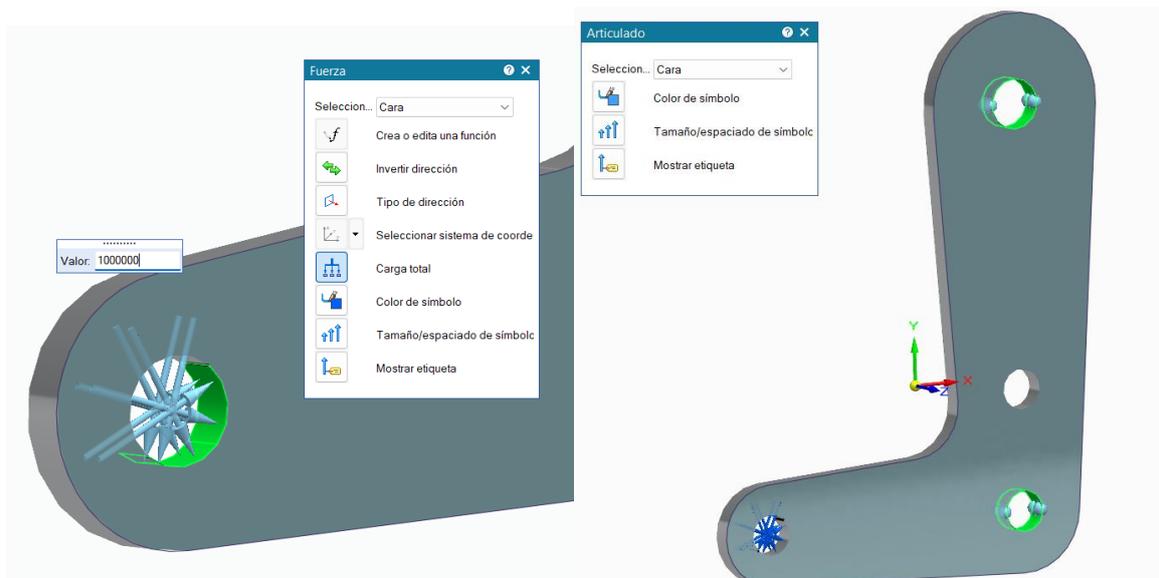


Ilustración 42: Fuerza y restricciones en brazo B

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas las condiciones de carga y restricciones, se procedió a mallar la pieza. Se utilizó una malla de baja densidad para reducir el tiempo de cálculo, ya que en esta fase solo interesa conocer los rangos generales de tensión.

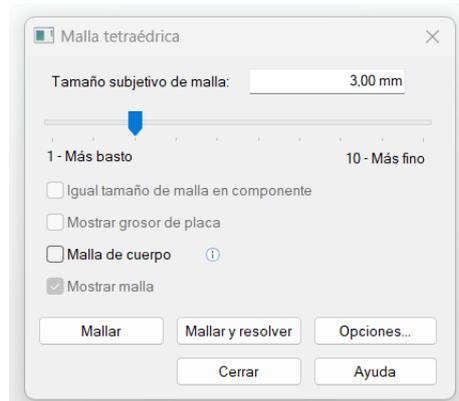


Ilustración 43: Características mallado Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 44 muestra los resultados obtenidos para el brazo B, una tensión máxima de 68.5 MPa, un valor mucho menor a su límite elástico que es de 345 MPa. Por tanto, la pieza no se rompería ante este estado de carga y existe suficiente margen para optimizar la pieza.

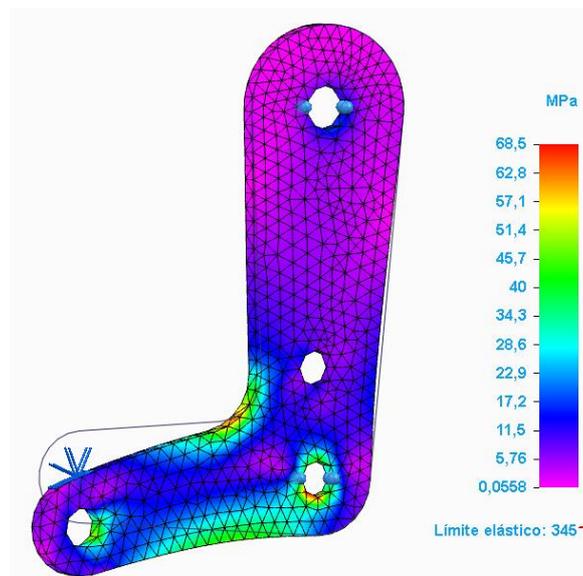


Ilustración 44: Resultados FEM inicial brazo B

Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento se aplicó al brazo A. La simulación muestra una tensión máxima de 148 MPa, también inferior al límite del material, lo que garantiza que la pieza no fallaría bajo las condiciones analizadas.

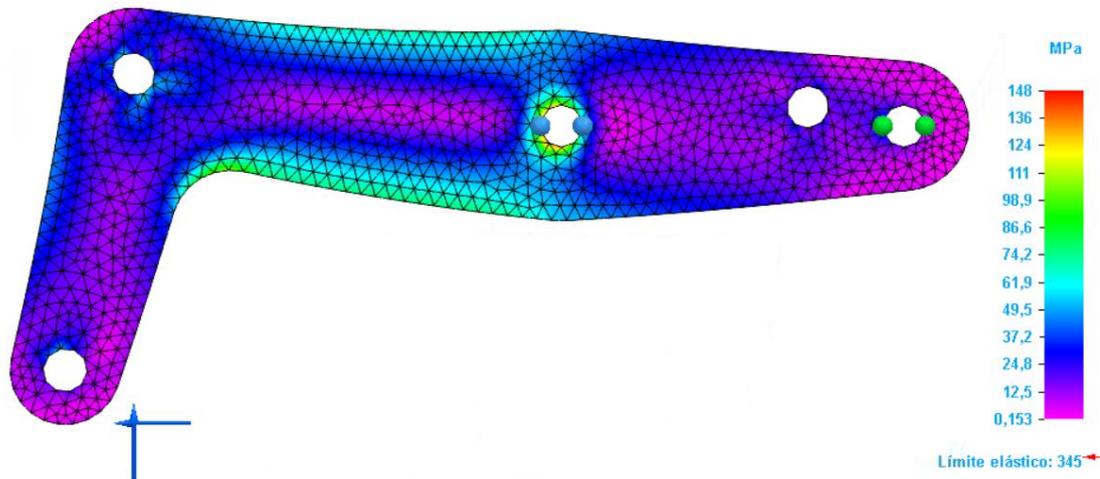


Ilustración 45: Resultados FEM inicial brazo A

Fuente: Elaboración propia

4.2 OPTIMIZACIÓN DE LAS PIEZAS CON CDG

4.2.1 PRESERVACIÓN DE REGIONES:

En el proceso de optimización mediante Diseño Generativo, resulta fundamental realizar una adecuada reflexión previa sobre las regiones que deben preservarse. Estas áreas condicionan significativamente el resultado final, tanto a nivel estructural como funcional. En este caso, se decide preservar los laterales de la pieza, dado que su reducido espesor los hace especialmente sensibles a modificaciones no deseadas durante el proceso de optimización.

Asimismo, se conservan los orificios de los brazos y el redondeo de los extremos y esquinas de las piezas, ya que estas zonas concentran las mayores tensiones según el análisis inicial mediante el método de los elementos finitos (FEM). Esta estrategia de preservación garantiza que se mantenga la integridad de las zonas críticas durante el rediseño generativo.

Para determinar con precisión las regiones a preservar, así como su geometría y el porcentaje de volumen a conservar, se realizaron varias iteraciones preliminares tomando como ejemplo el brazo B. Estas pruebas permitieron familiarizarse con el comportamiento de la herramienta y analizar el impacto de diferentes configuraciones de preservación bajo una misma reducción de masa del 30 %. Comparando los resultados obtenidos, se identificó qué configuración ofrecía una geometría más coherente y funcional para su posterior validación mediante análisis FEM.

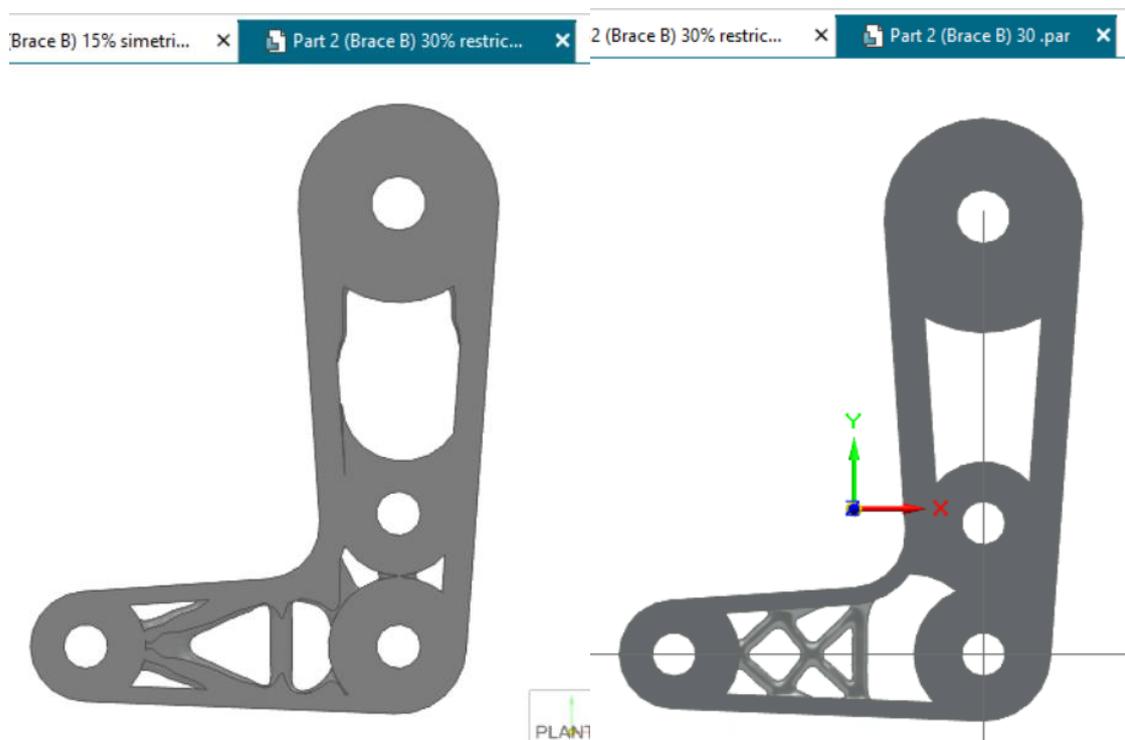


Ilustración 46: Modelo I preservaciones

Ilustración 47: Modelo II preservaciones

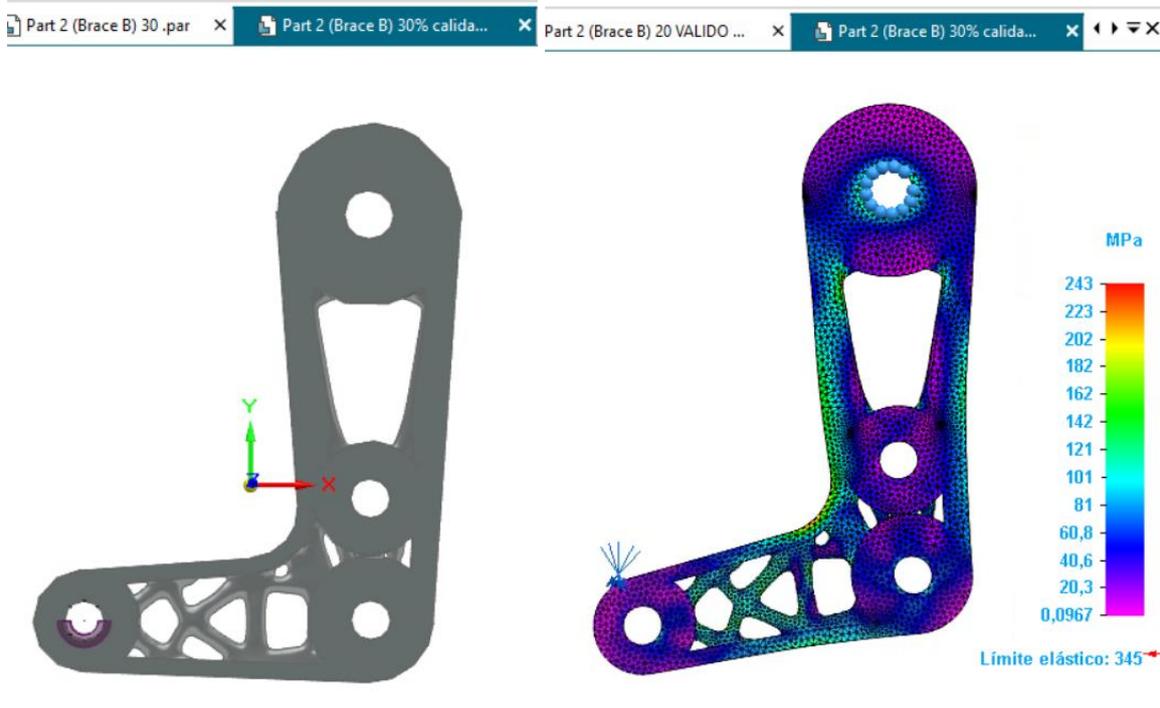


Ilustración 48: Modelo III preservaciones. Fuente: Elaboración propia

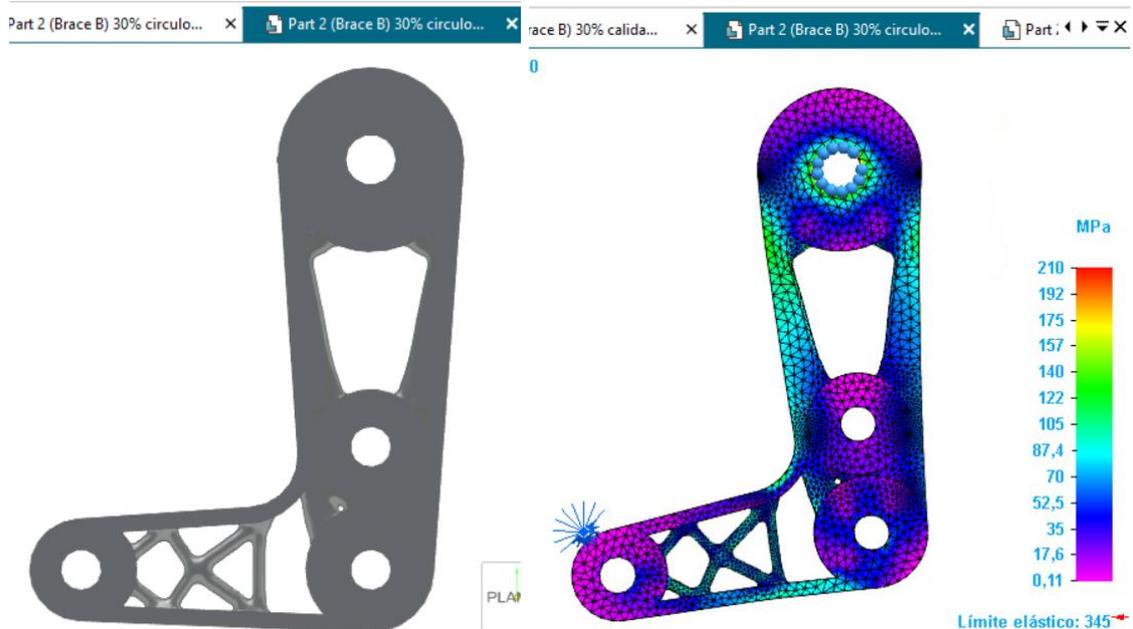


Ilustración 49: Modelo IV preservaciones. Fuente: Elaboración propia

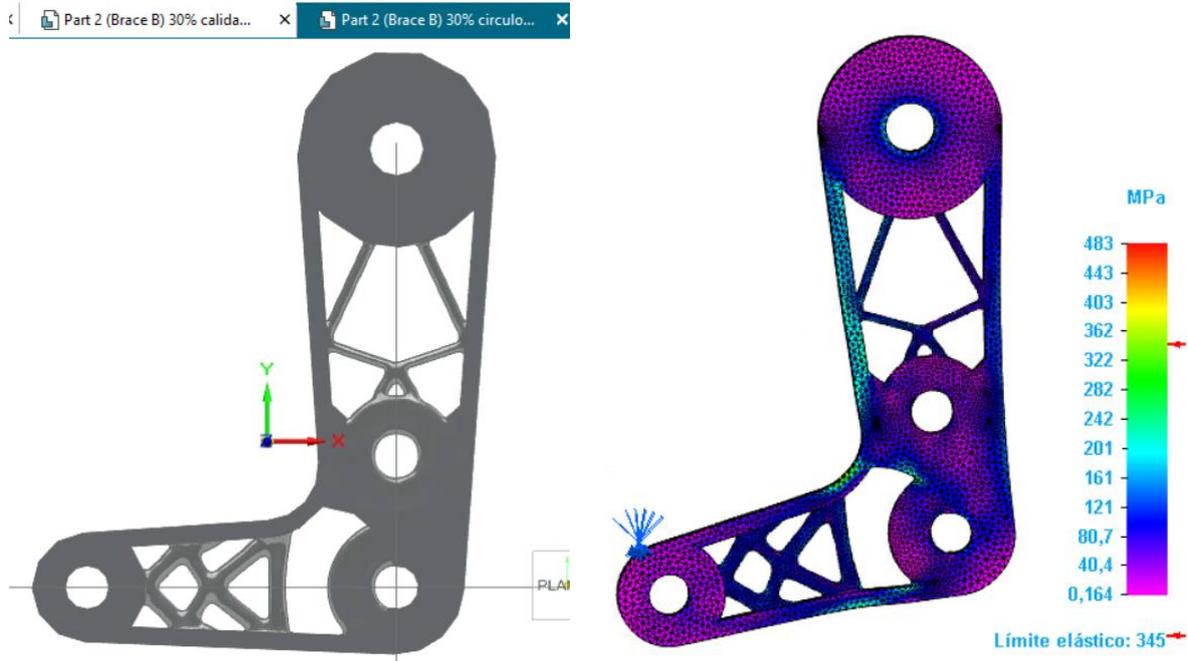


Ilustración 50: Modelo V preservaciones. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 46 e Ilustración 47 muestran modelos en los que se preserva un mayor radio en los orificios situados en la parte superior y en la zona inferior izquierda del brazo, lo cual contribuye a una mejor distribución de tensiones en esas áreas. En contraste, la Ilustración 50 presenta una preservación más reducida en los laterales de la pieza, lo que compromete parcialmente su rigidez estructural. Por su parte, los modelos representados en las Ilustración 48 e Ilustración 49 destacan por una mayor conservación de material en las esquinas del brazo, zonas que concentran esfuerzos relevantes según el análisis FEM.

Habiéndose familiarizado con el comportamiento del diseño generativo en el brazo B, en el caso del brazo A se aplicaron desde el inicio unas regiones de preservación ya optimizadas, basadas en los aprendizajes previos. Las regiones de preservación seleccionadas finalmente para el diseño generativo se muestran a continuación marcadas en rojo.

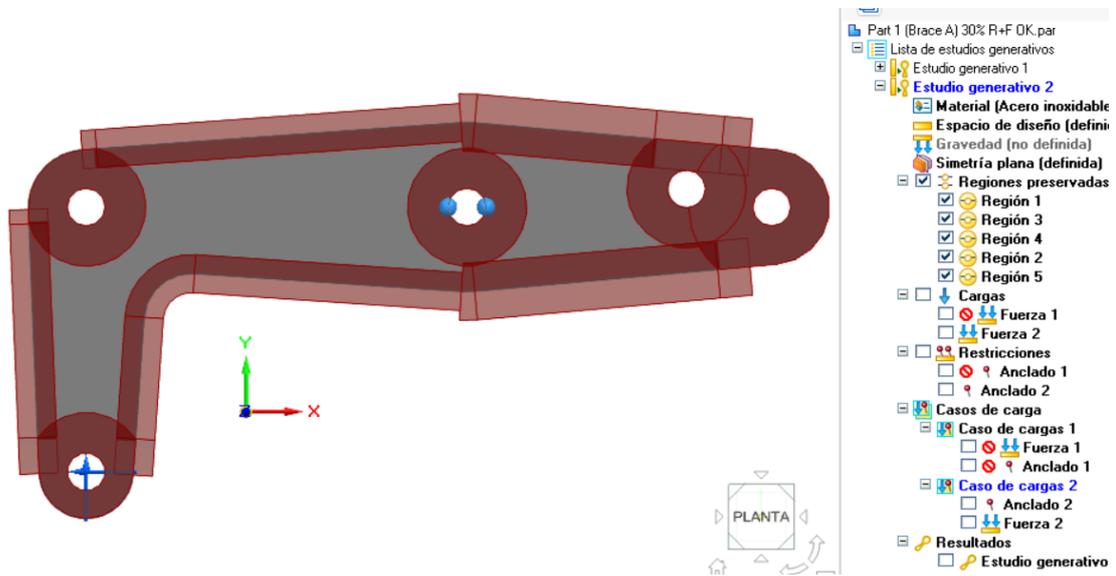


Ilustración 51: Zonas de preservación brazo A. Fuente: Elaboración propia

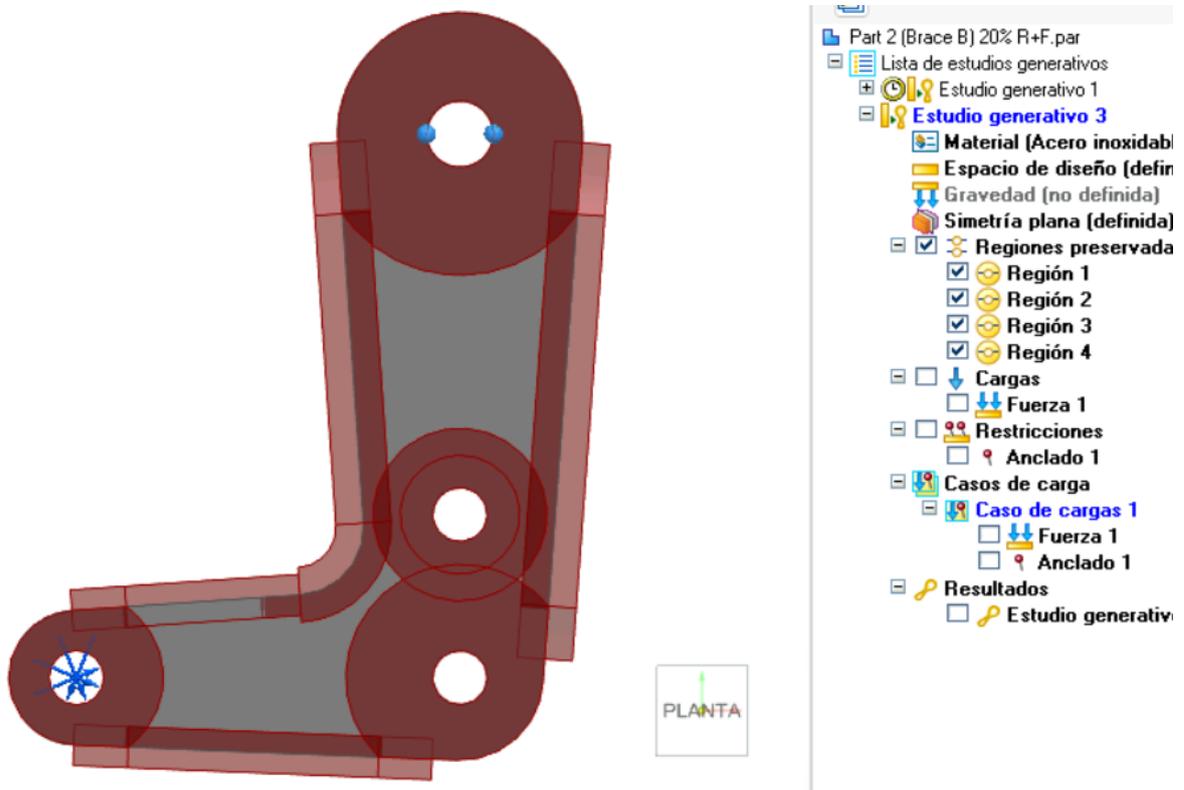


Ilustración 52: Zonas de preservación brazo B. Fuente: Elaboración propia

4.2.2 DETERMINACIÓN DE % DE REDUCCIÓN DE MASA ÓPTIMO

A continuación, se describen las distintas iteraciones realizadas sobre el diseño de los brazos con el objetivo de determinar el porcentaje de masa óptimo. Este proceso se ha llevado a cabo de forma iterativa, validando cada propuesta mediante análisis por elementos finitos (FEM) para identificar el umbral a partir del cual la pieza comenzaba a presentar fallos estructurales.

La propuesta inicial se generó introduciendo únicamente las regiones a preservar, las restricciones de contorno y las condiciones de carga. Los resultados obtenidos para esta configuración se muestran en las Ilustración 53 y 32. Sin embargo, la geometría resultante presentaba una complejidad excesiva, con formas poco adecuadas para su fabricación y un reparto de masa poco equilibrado.

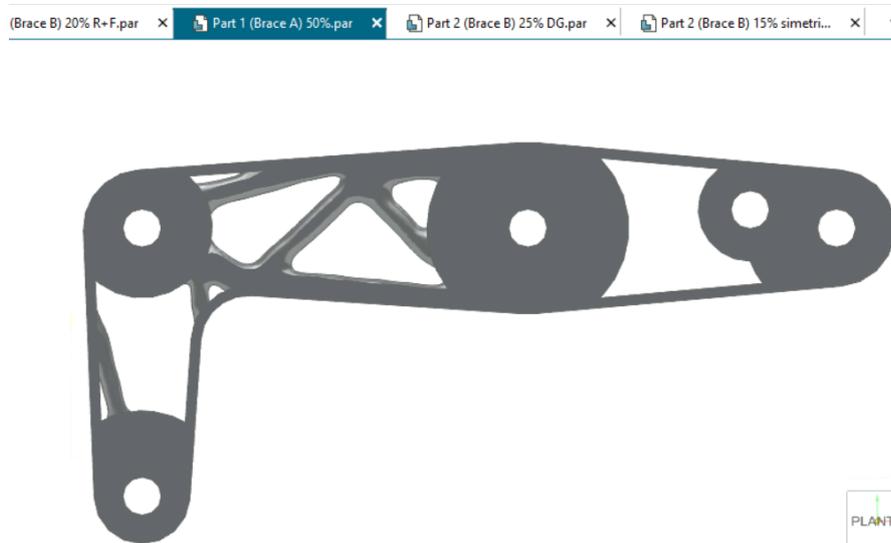


Ilustración 53: Iteración 1 brazo A.

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 54: Iteración I brazo B

Fuente: Elaboración propia

Por este motivo, se decidió introducir simetría respecto a los ejes horizontal y vertical de los brazos, con el objetivo de obtener una geometría más uniforme, funcional y visualmente coherente. Para ello, se empleó la herramienta de *Simetría Plana en un cuarto*, seleccionando como planos de simetría aquellos que atraviesan el centro geométrico de cada pieza. Dichos planos están señalizados en verde en las Ilustración 55 y 29. Esta estrategia permitió simplificar la geometría, facilitar su manufactura a posteriori.

Se un plano seleccionado.

 **Simetría plana**

Crea un modelo optimizado para que sea simétrico respecto de un plano seleccionado.
Pulse F1 para ver la ayuda.

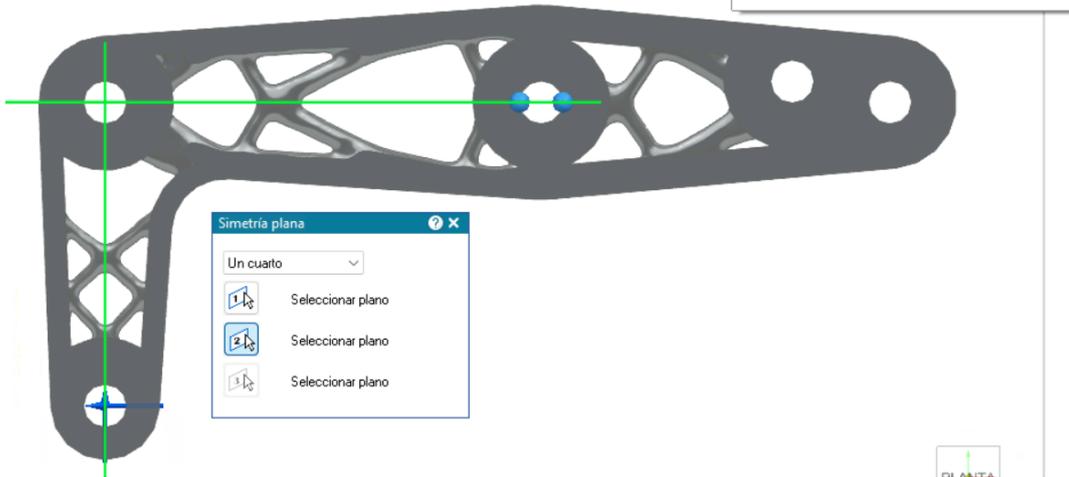


Ilustración 55: Simetría en diseño final brazo A. Fuente: Elaboración propia

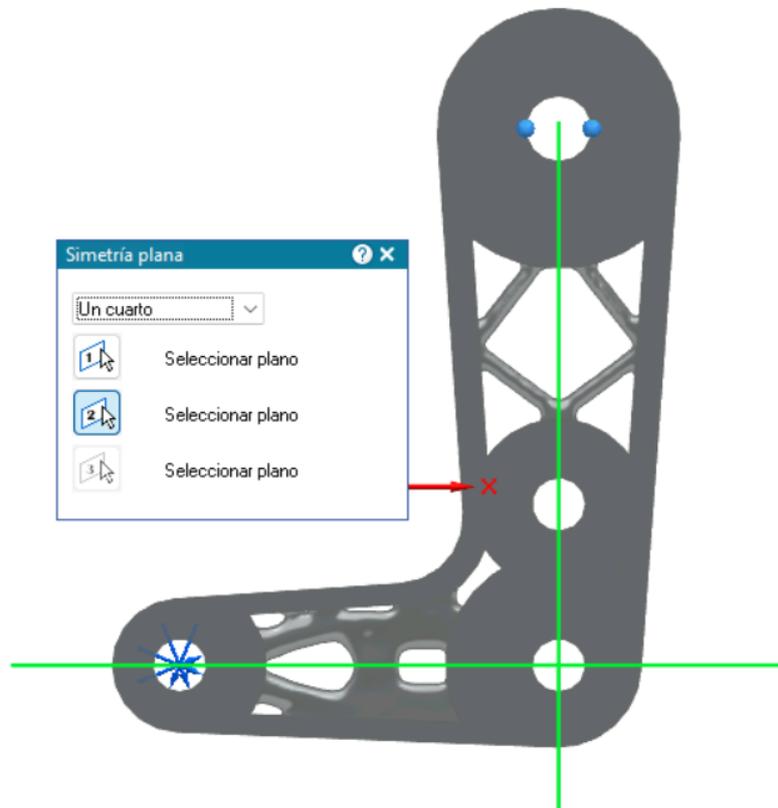
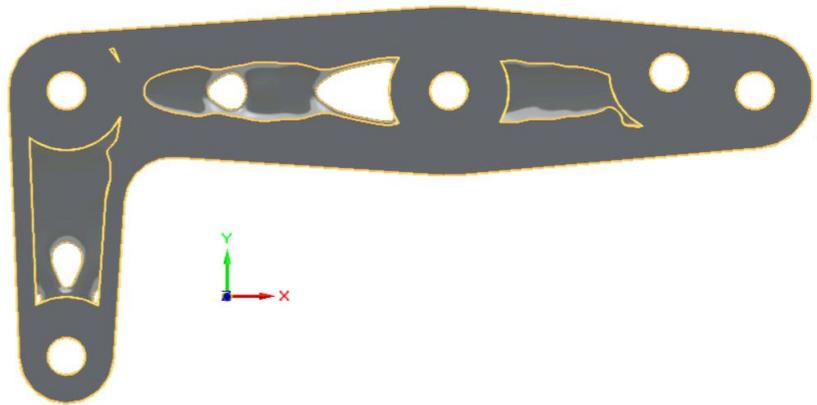


Ilustración 56: Simetría en diseño final en brazo B. Fuente: Elaboración propia

4.2.3 ITERACIONES BRAZO A

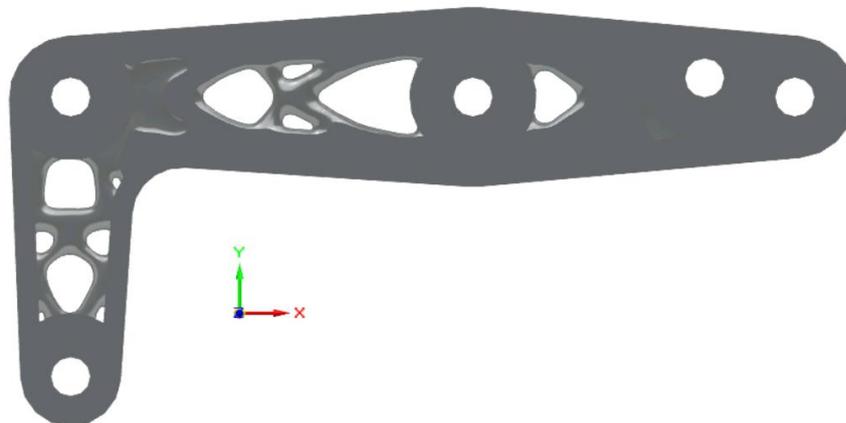
Definida la simetría de la pieza, el siguiente paso consistió en ajustar el porcentaje de reducción de masa. Para ello, se optó por una estrategia incremental: se comenzó con una reducción del 10% y se fue aumentando progresivamente en función de los resultados obtenidos en los análisis de esfuerzos, buscando siempre un equilibrio entre aligeramiento y resistencia estructural.

Ilustración 57: Iteración II – reducción del 10%. Fuente: Elaboración propia



Considerando que la geometría resultante tras la iteración seguía siendo bastante compacta, se decidió incrementar la reducción de masa en un 10%.

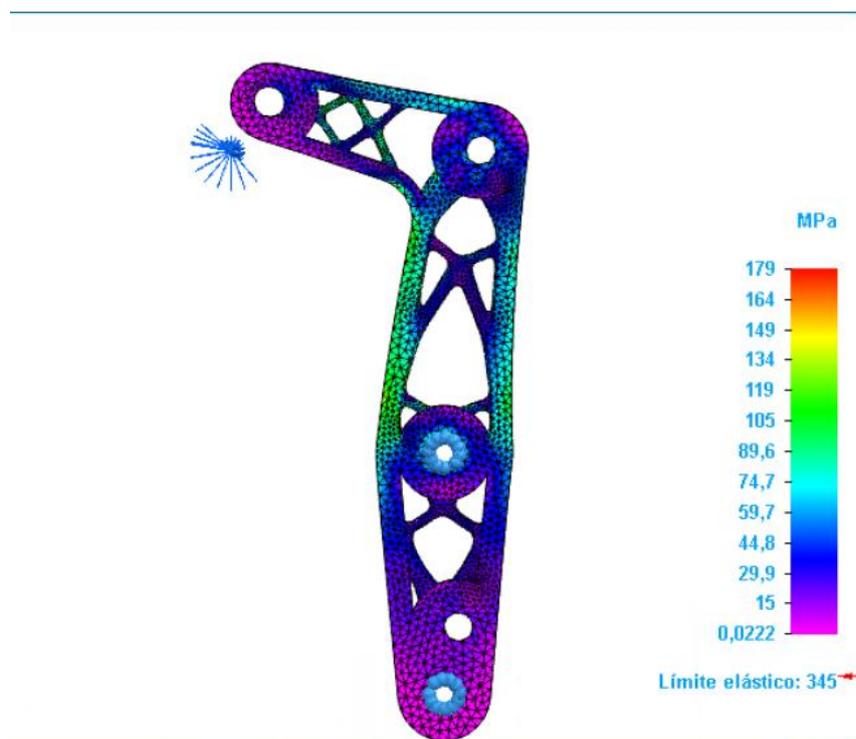
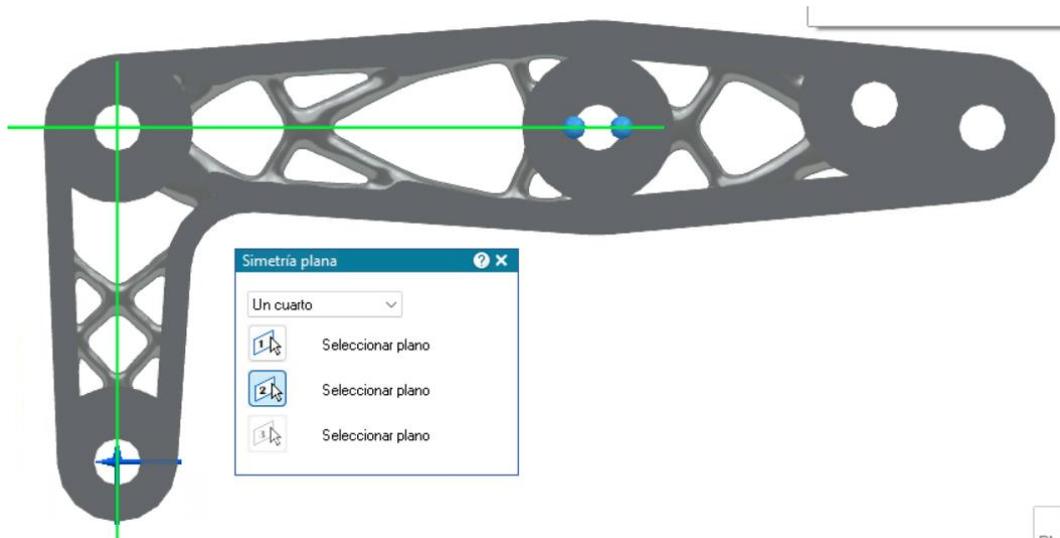
Ilustración 58: Iteración III – reducción del 20%. Fuente: Elaboración propia



Este nuevo diseño, con una reducción de masa de 20%, comenzaba a presentar una forma más ajustada, pero los resultados del análisis mediante elementos finitos indicaban que aún existía margen para una mayor optimización.

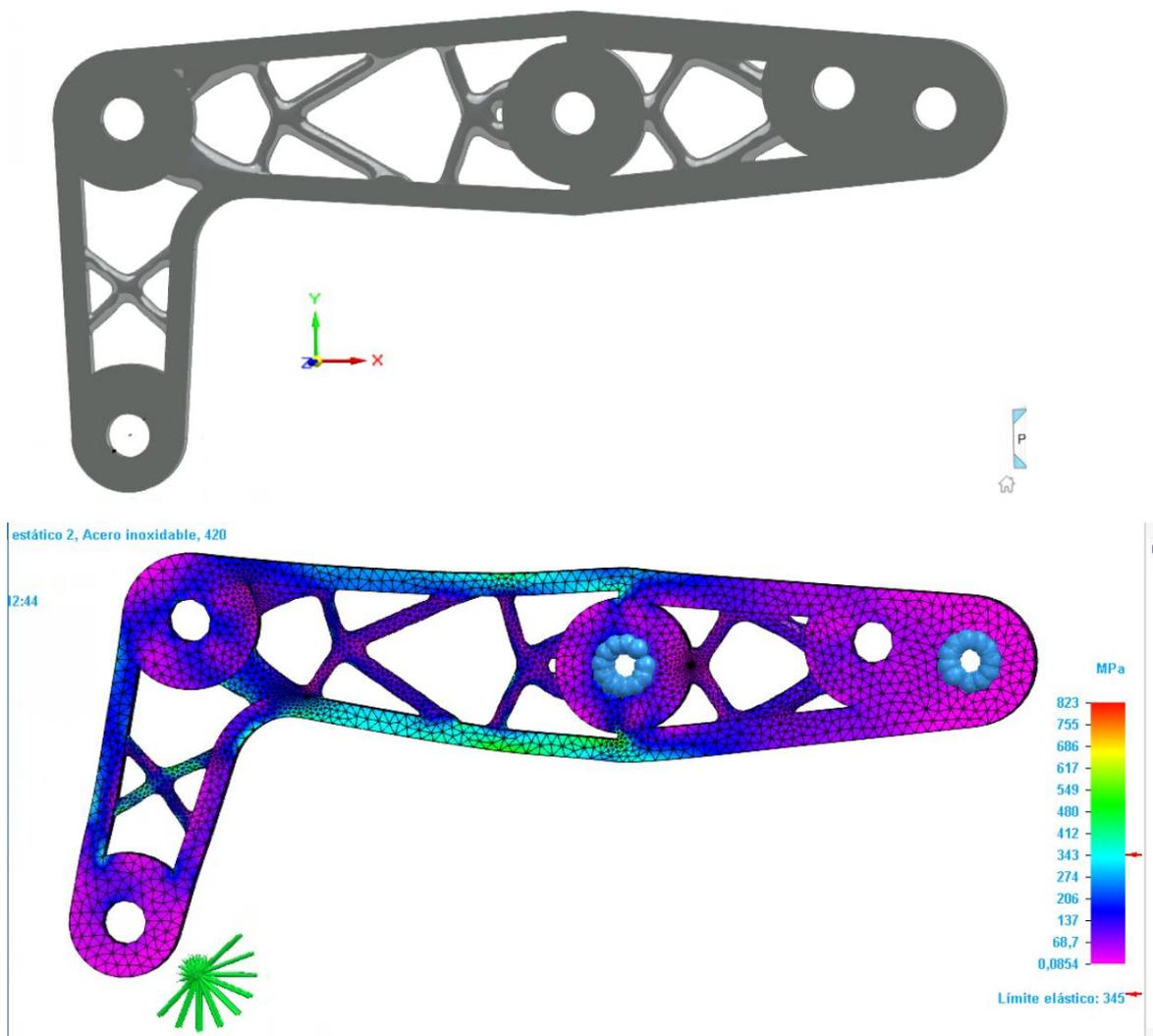
Ilustración 59: Iteración IV – reducción del 30%

Fuente: Elaboración propia



En la cuarta iteración del brazo A, como muestra la Ilustración 59, como se ha realizado un refinamiento mayor de la estructura, preservando las regiones importantes y eliminado masa de donde no era necesaria. El análisis FEM muestra buenos resultados sobre la resistencia de este modelo, no obstante se quiso probar a seguir incrementando la reducción de masa para ver si el modelo sería el mejor.

Ilustración 60: Iteración V – reducción del 40% Fuente: Elaboración propia



En consecuencia, se procedió a una cuarta iteración con un 30 % de reducción, y posteriormente a una quinta con un 40%. No obstante, en esta última versión se observó que el algoritmo comenzaba a reticular demasiado el interior de los brazos contribuyendo a una geometría que no era capaz de soportar la fuerza aplicada. Por este motivo, y dado que una reducción del 30 % ya representa una optimización considerable, se optó por mantener la versión previa como configuración final del brazo A.

4.2.4 ITERACIONES BRAZO B

Para el brazo B, se definieron las preservaciones, se aplicó simetría y se realizaron iteraciones con reducciones crecientes. Siguiendo los mismos pasos y aplicando los mismos criterios que al brazo A. La versión por lo que se adoptó finalmente es la de una reducción del 30 %.

Ilustración 61: Iteración II (B) – reducción del 7% Fuente: Elaboración propia

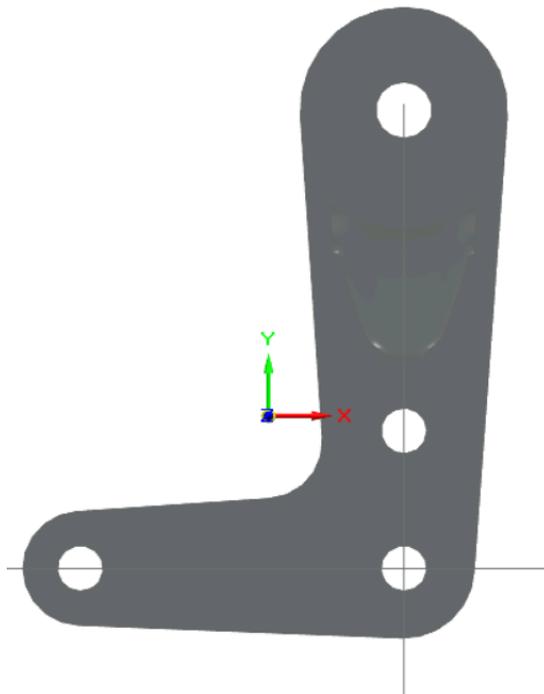


Ilustración 62: Iteración III (B) – reducción del 15% Fuente: Elaboración propia

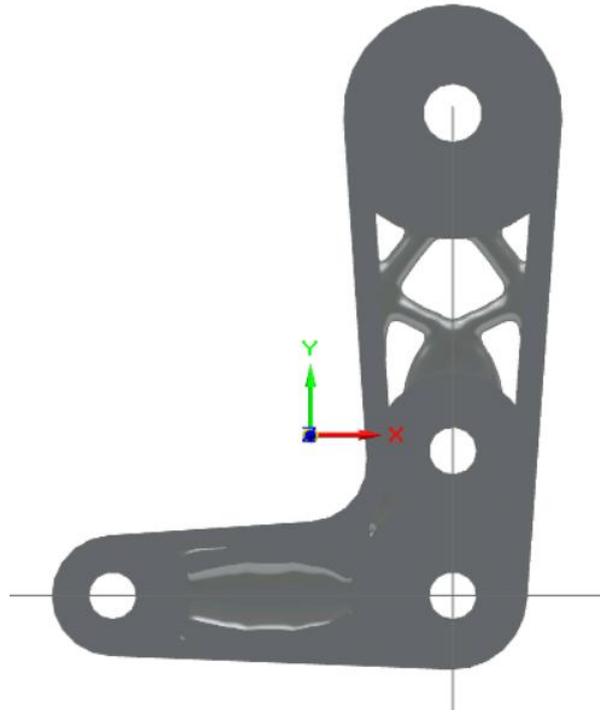


Ilustración 63: Iteración IV (B) – reducción del 20% Fuente: Elaboración propia

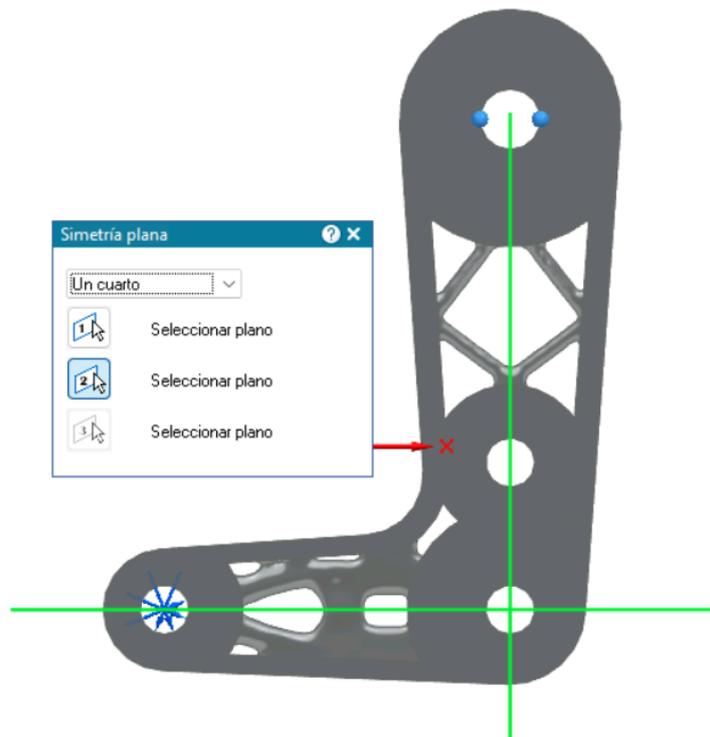
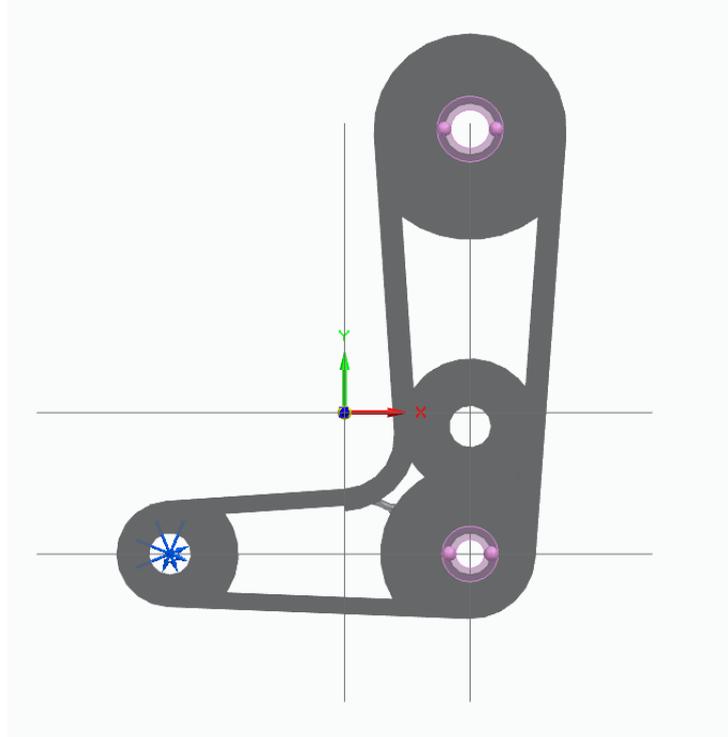


Ilustración 64: Iteración V (B) – reducción del 30% Fuente: Elaboración propia



4.2.5 DETERMINACIÓN DE ESTADO DE CARGAS MÁS RESTRICTIVO

Para identificar el estado de carga más desfavorable, se ha llevado a cabo el diseño generativo (DG) en ambos estados de carga mencionados anteriormente, brazos completamente abiertos y brazos cerrados. Se ha realizado el análisis por elementos finitos (FEM) para cada propuesta, evaluando su comportamiento bajo los dos tipos de carga posibles. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Caso con brazos completamente abiertos:

- Bajo carga correspondiente a brazos cerrados:

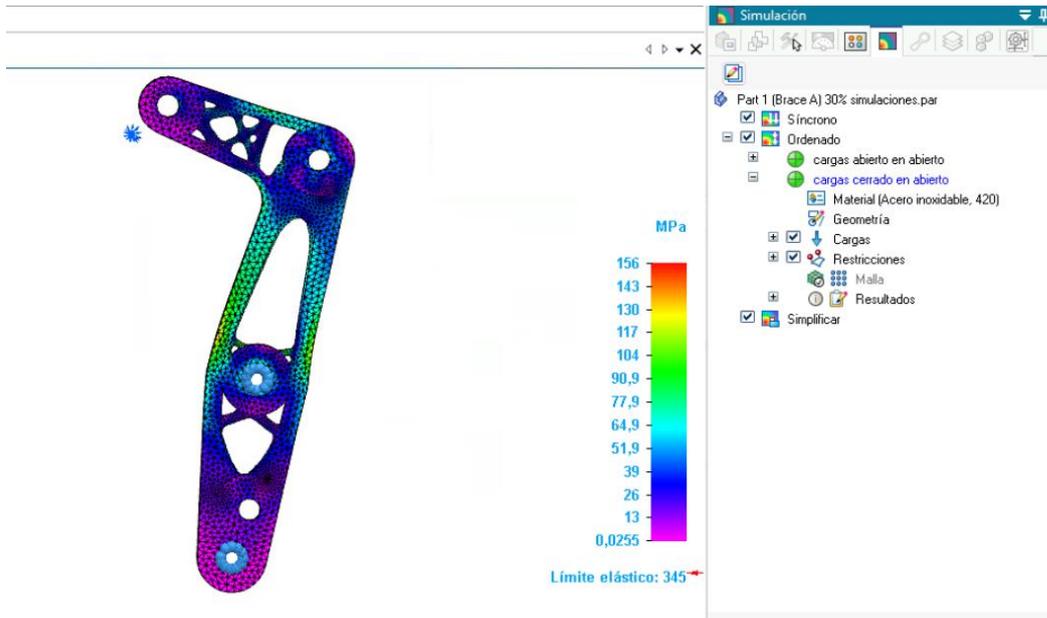


Ilustración 65: FEM cargas cerrado en abierto. Fuente: Elaboración propia

- Bajo carga correspondiente a brazos abiertos

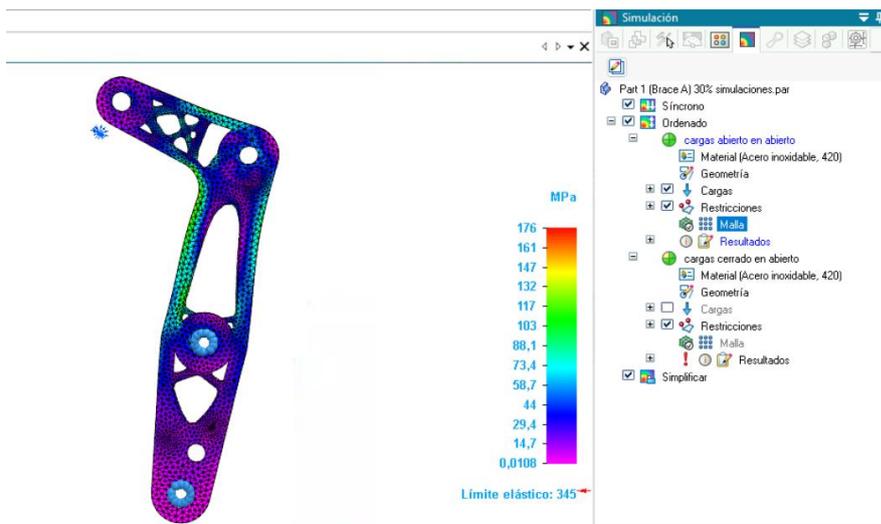


Ilustración 66: FEM cargas abierto en abierto. Fuente: Elaboración propia

Caso con brazos cerrados:

- Bajo carga correspondiente a brazos abiertos:

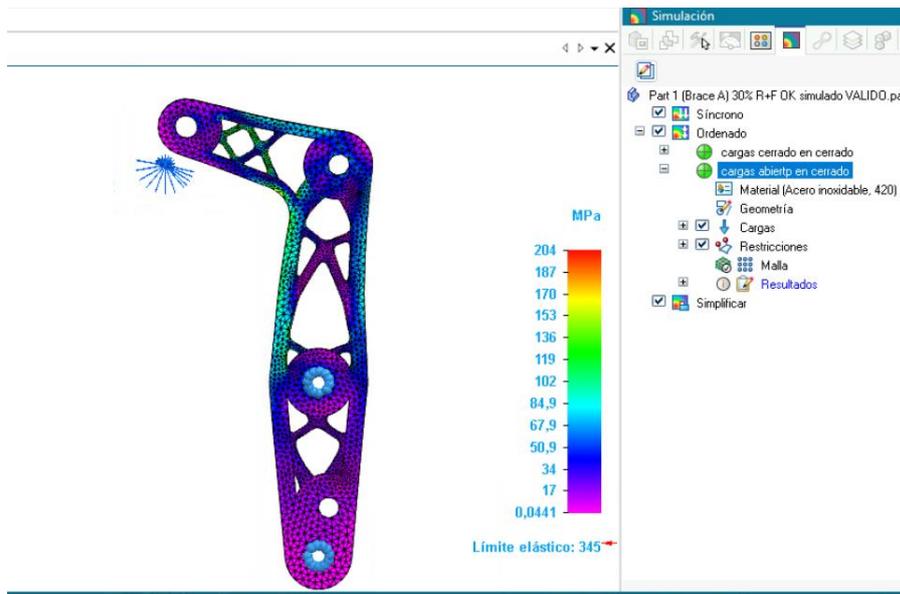


Ilustración 67: FEM cargas abierto en cerrado. Fuente: Elaboración propia

- Bajo carga correspondiente a brazos cerrados:

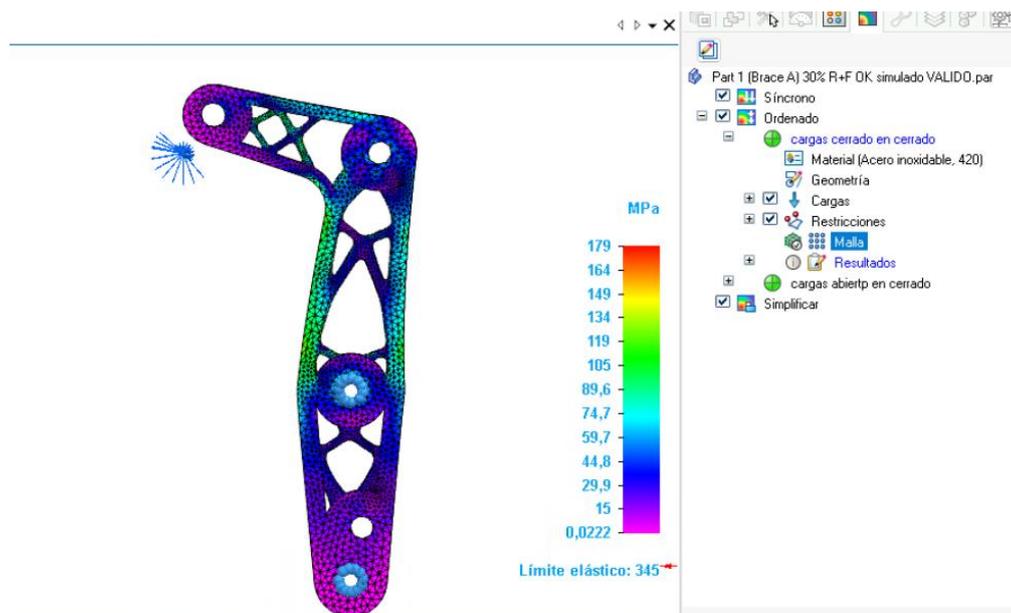


Ilustración 68: FEM cargas cerrado en abierto. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 67 muestra en la escala de esfuerzos el caso más crítico, se produce cuando la geometría optimizada para brazos cerrados es sometida a la carga correspondiente a brazos abiertos. Dado que esta configuración resulta la más exigente en términos de tensiones, es seleccionado como el estado de cargas con el que optimizar las piezas.

Cabe señalar que, dado que ambos brazos del conjunto están sometidos al mismo tipo de cargas en cada estado operativo, no resulta coherente optimizar cada uno bajo un estado de carga distinto. En este trabajo se ha seleccionado el brazo A como referencia, y los resultados obtenidos para este se consideran representativos y aplicables al brazo B.

El diseño generativo se lleva a cabo utilizando como condición de carga aquella en la que la fuerza aplicada forma un ángulo de 45 grados con respecto al plano vertical del brazo, al haber demostrado ser el caso más restrictivo. Esta aproximación garantiza que la geometría resultante sea capaz de soportar adecuadamente las cargas en ambas configuraciones: abierta y cerrada.

4.3 REFINAMIENTO Y FABRICACIÓN DE LOS PROTOTIPOS

4.3.1 REFINAR GEOMETRÍA CON ALTAIR INSPIRE

Antes de proceder a la fabricación mediante impresión 3D, es necesario transformar la geometría resultante de la optimización topológica en un modelo apto para su manufactura. Los resultados de la simulación suelen generar una malla triangular con superficies irregulares, no directamente imprimibles ni compatibles con entornos CAD. Por ello, se requiere un proceso de suavizado y reconstrucción geométrica que garantice la continuidad superficial, respete los límites del diseño optimizado y asegure la precisión dimensional del modelo.

Para ello, se ha empleado el software *Altair Inspire*, concretamente la herramienta *PolyNURBS*, que permite convertir geometrías discretas en modelos CAD continuos mediante superficies *NURBS* (Non-Uniform Rational B-Splines).

En particular, se ha utilizado la herramienta *Ajustar (Fit)*, que proyecta una geometría *NURBS* sobre la superficie optimizada, eliminando rugosidades y preservando las restricciones geométricas impuestas. El procedimiento requiere definir correctamente dos parámetros fundamentales [28]:

- **Número de caras base:** determina el número de superficies iniciales a partir de las cuales se genera el modelo *NURBS*. Un valor demasiado bajo puede simplificar excesivamente la geometría, mientras que uno demasiado alto puede generar modelos innecesariamente complejos.
- **Porcentaje de curvatura:** regula el nivel de ajuste de la superficie *NURBS* a la malla de entrada. Un valor intermedio permite preservar las zonas críticas de carga sin introducir discontinuidades superficiales.

En el caso concreto de las piezas diseñadas en este proyecto, se ha fijado un número de 800 caras base y un 80 % de curvatura como se muestra en la Ilustración 69.

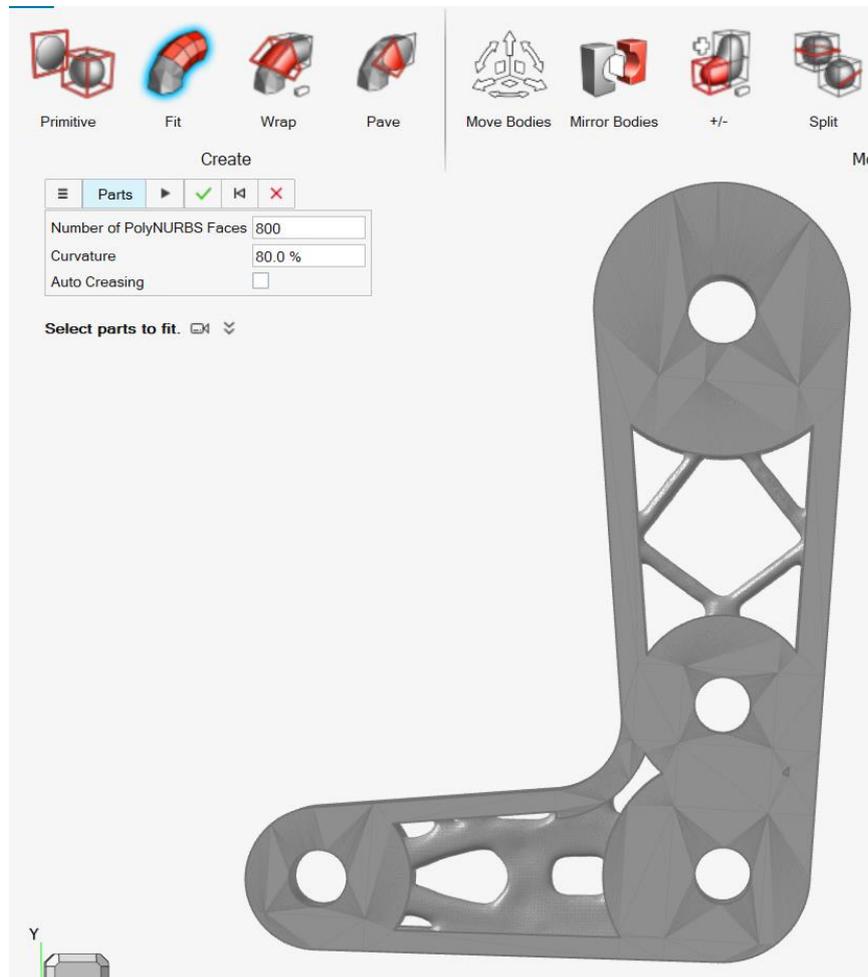


Ilustración 69: Parámetros de ajuste PolyNURBS.

Fuente: Elaboración propia

Aunque la herramienta *PolyNURBS* genera una geometría lista para impresión, es esencial preservar con precisión los orificios funcionales, ya que un suavizado excesivo puede deformarlos e impedir el montaje. En la Ilustración 70 se observa el caso donde los agujeros han sido suavizados indebidamente.

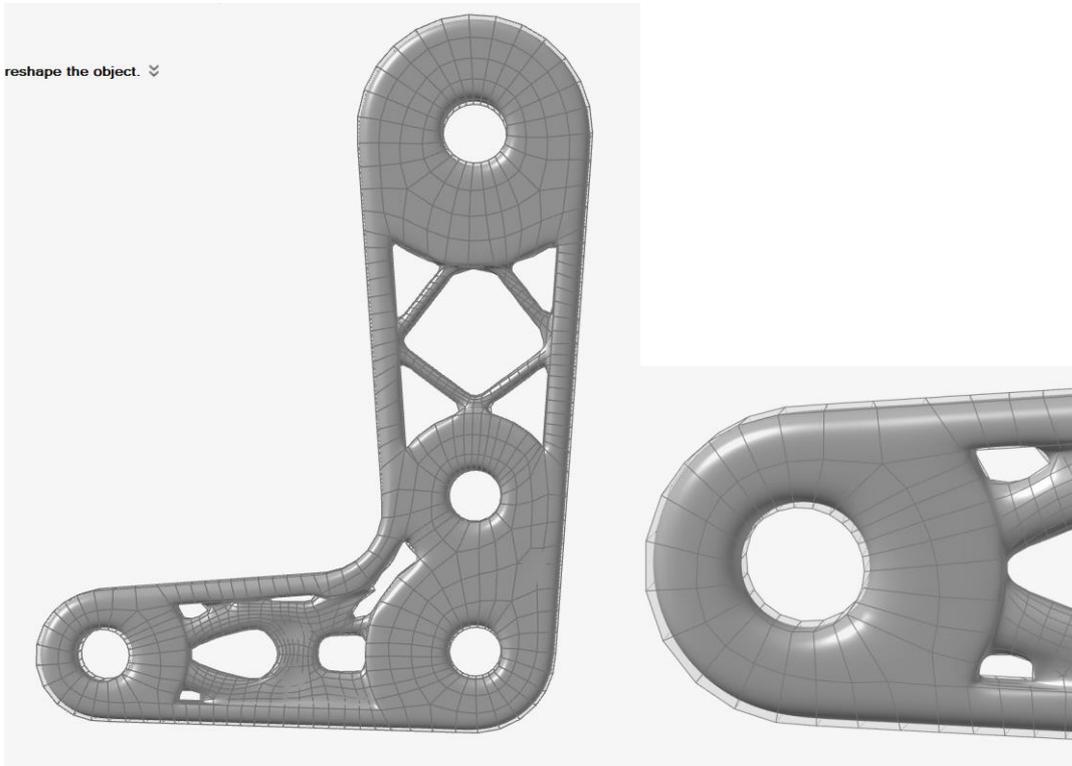


Ilustración 70: Suavizado incorrecto en agujeros

Fuente: Elaboración propia

Para evitar esta situación, es necesario delimitar dichas zonas antes de aplicar el refinamiento. El procedimiento consiste en exportar la geometría en formato STEP e identificar las regiones que deben mantenerse intactas. A continuación, se crea un nuevo boceto (*Sketch*) sobre el plano correspondiente, se traza la geometría de recorte y se finaliza el boceto. Desde el menú *Geometry*, se accede a la herramienta *Trim/Split*, donde se selecciona como “*target*” el sólido a cortar y como “*tool*” el boceto creado. Una vez realizada la segmentación, se eliminan las partes no deseadas y se reconstruye la geometría mediante una operación de unión (*Union*) que preserve la forma original de los agujeros.

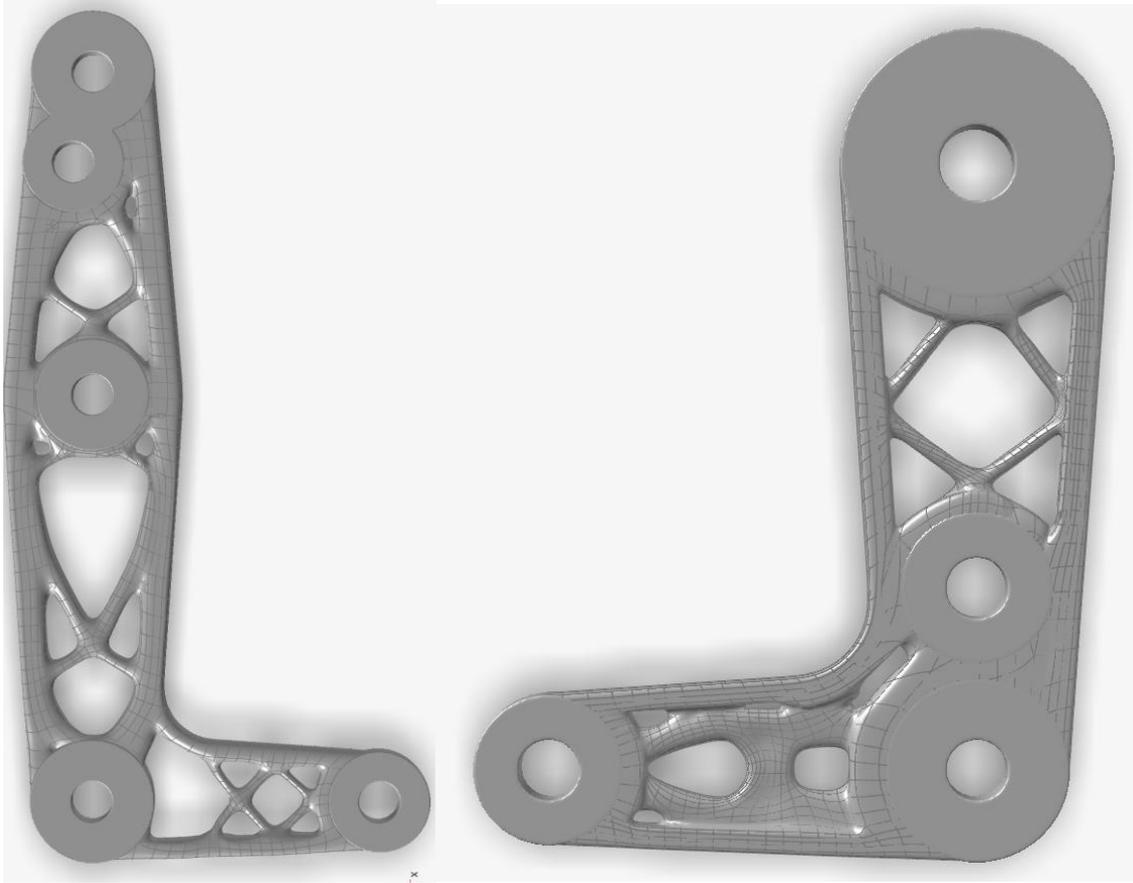


Ilustración 71: Suavizado correcto en Altair Inspire.

Fuente: Elaboración propia

En este caso, la verificación del rendimiento mediante un nuevo análisis FEM tras la optimización puede omitirse, ya que la reducción de volumen obtenida no es lo suficientemente significativa, inferior al 5%, como para alterar de forma relevante el comportamiento estructural de la pieza. Dado que las tensiones obtenidas en la simulación inicial se encontraban muy por debajo del límite elástico del material, se puede asumir con seguridad que la geometría optimizada seguirá cumpliendo los requisitos mecánicos sin necesidad de una nueva validación computacional.

Capítulo 5. FABRICACIÓN POR FA

Las últimas fases del flujo de trabajo comprenden la fabricación de los prototipos y el análisis final, en el que se realiza una evaluación de costes y se obtienen las conclusiones del proyecto.

5.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO FA

Los pasos que se deben llevar a cabo en la impresión mediante tecnologías de fabricación aditiva se resumen en la Ilustración 72.

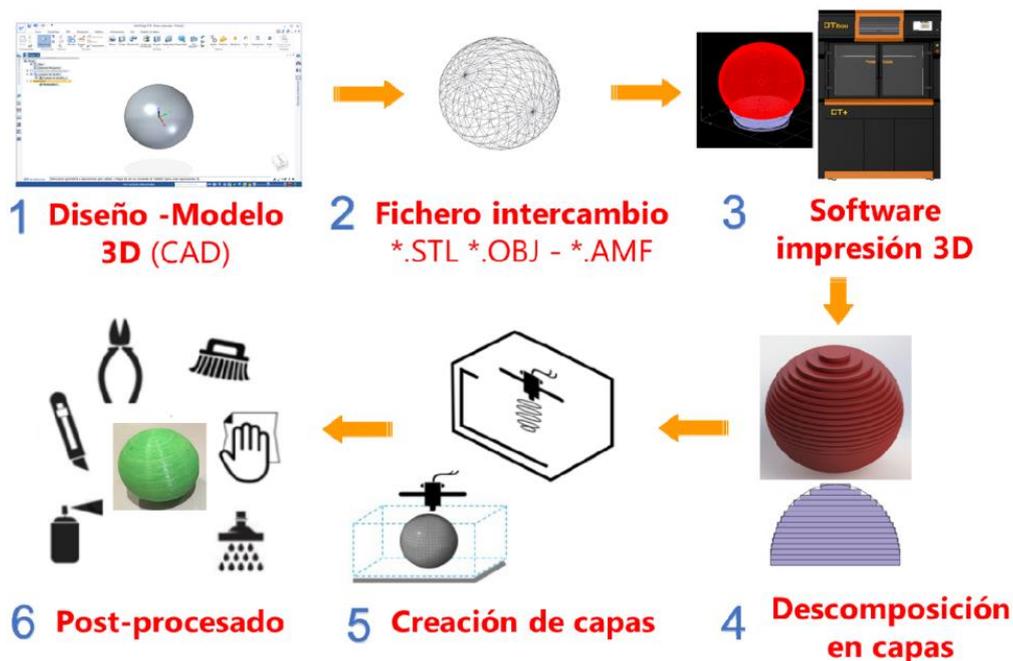


Ilustración 72: Metodología de I3D

Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

Una vez que se tiene el diseño suavizado de las piezas mediante Altair Inspire, es necesario exportar el archivo en formato “.stl”. Para garantizar la máxima calidad de la geometría al descargar las piezas, se han utilizado una tolerancia de cuerda de 0,01 mm y una tolerancia angular de 1°. De este modo, el mallado resultante presenta un nivel de detalle óptimo, evitando la aparición de irregularidades en las superficies.

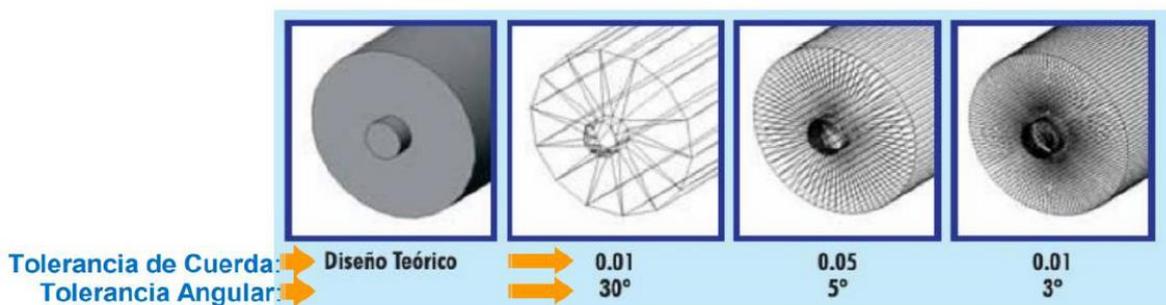


Ilustración 73: Tolerancias archivos “.stl”

Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

5.1.1 PARÁMETROS IMPORTANTES PARA CONSIDERAR EN EL PROCESO

A continuación, se describen los parámetros más relevantes para tener en cuenta, dado que condicionan directamente la calidad, la resistencia mecánica y la funcionalidad de las piezas del conjunto de la prensa de sujeción paralela [29].

- **Laminado de capas**

El laminado consiste en la división del modelo 3D en un conjunto de capas de espesor constante que se imprimen secuencialmente. El grosor de capa influye tanto en el tiempo de fabricación como en la precisión dimensional y la calidad superficial. Capas más finas permiten un acabado más detallado y menos escalonamiento entre capas, aunque incrementan significativamente la duración del proceso.

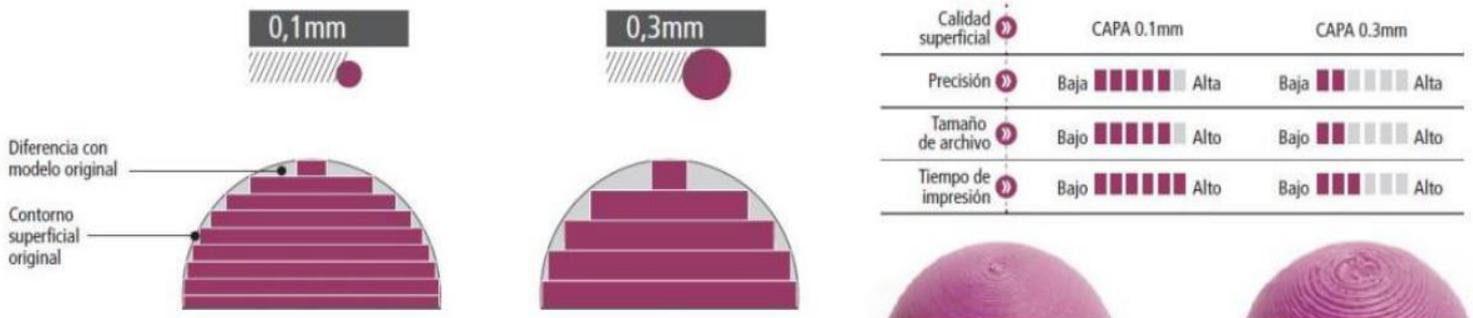


Ilustración 74: Detalle de cómo afecta el tamaño de capa

Fuente: Diapositiva Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

- **Estructura de relleno**

La estructura de relleno determina la geometría interna de la pieza, que puede configurarse con diferentes patrones (por ejemplo, lineal, triangular o en celda) y porcentajes de densidad. Este parámetro afecta la rigidez global, el peso y el consumo de material, siendo especialmente crítico en componentes que requieren soportar cargas mecánicas o impactos.

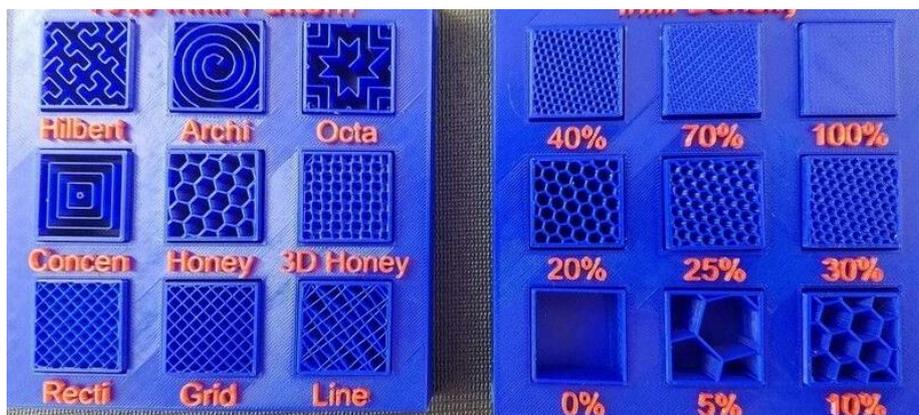


Ilustración 75: Tipos de estructuras de relleno

- **Ensamblaje**

En el diseño de modelos que necesitan ser ensamblados, es importante un ajuste perfecto en el diseño desde el software para proporcionar suficiente distancia entre las partes que se ensamblan. Algunas veces el software no calcula la fricción presente en el mundo real.

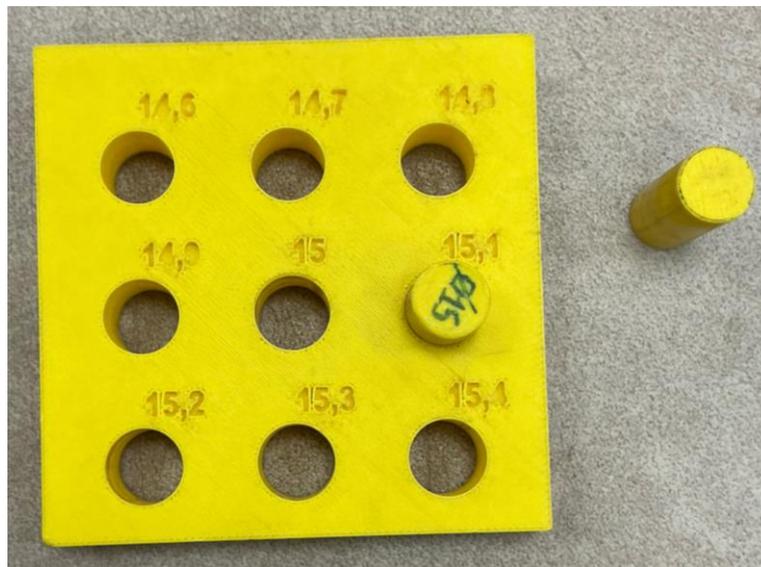


Ilustración 76: Ensamblaje y tolerancias

Fuente: Fotografía de elaboración propia

- **Anisotropía y precisión**

La anisotropía es una característica propia a la fabricación aditiva por deposición capa a capa, que genera zonas de menor resistencia mecánica en función de la orientación de impresión. Estos “puntos débiles” pueden provocar que elementos delgados y sobresalientes se fracturen con facilidad. Por este motivo, la orientación del sentido de la impresión se considera un parámetro fundamental. Asimismo, se han ajustado las dimensiones de los pasadores para disponer de un margen de 0,2 milímetros entre el agujero y el pasador, de manera que, incluso con las pequeñas rugosidades superficiales propias del proceso, sea posible realizar el ensamblaje correcto de la pieza.

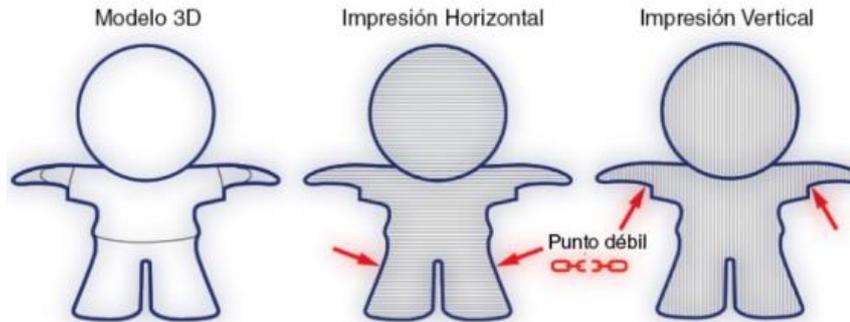


Ilustración 77: Anisotropía en I3D

Fuente: (NTH, 2021)[29]

Todos estos aspectos son especialmente importantes en este proyecto, dado que el diseño corresponde a un ensamblaje de piezas mediante pasadores, en el que existen movimientos relativos y rotación en determinados puntos. Por este motivo, se ha puesto especial atención en la orientación de impresión, en la configuración de relleno y en el control de tolerancias dimensionales, con el fin de garantizar la funcionalidad y la precisión del conjunto ensamblado.

5.2 TECNOLOGÍAS Y SOFTWARES DE IMPRESIÓN

Existen diferentes tipos de FA como muestra la Ilustración 78.

UNE-EN ISO 17296 (2017)

- Fotopolimerización en tanque o cuba (Vat Polymerization) / SLA – DLP – CDLP 
- Proyección de material (Material Jetting) / MJ - NPJ – DOD 
- Proyección de aglutinante (Binder Jetting) / BJ 
- Fusión de lecho de polvo (Powder Bed Fusion) / SLS – EBM – MJF – SLM - DMLS 
- Extrusión de material (Material Extrusion) / FDM 
- Deposición de energía focalizada (Direct Energy Deposition) / LENS - EBAM 
- Laminado de hojas (Sheet Lamination) / LOM 

Ilustración 78: Tecnologías de impresión.

Fuente. Diapositiva presentación I3D de Fabricación Comillas ICAI

De las cuales se utilizan para el prototipado de la pieza:

- Fusión de lecho de polvo** (Powder Bed Fusion) / **SLS – EBM – MJF**
- Extrusión de material** (Material Extrusion) / **FDM** 

La **fusión de lecho de polvo** es una tecnología de fabricación aditiva que utiliza una fuente de calor (normalmente un láser) para sinterizar o fusionar las partículas de polvo atomizado. Este proceso se lleva a cabo de manera capa a capa, consolidando selectivamente las zonas que conforman la geometría de la pieza hasta completarla [30]. La consolidación del material permite obtener componentes con buena resolución dimensional, propiedades mecánicas homogéneas y una porosidad reducida.

En este trabajo se ha empleado la máquina *HP Jet Fusion 580C MJF*, basada en la tecnología Multi Jet Fusion, que deposita agentes de fusión y detallado sobre el lecho de polvo y aplica calor de manera controlada para lograr la sinterización progresiva de cada capa [31].

Por otro lado, la **extrusión de material** es un método en el que un filamento termoplástico es fundido y extruido a través de una boquilla, depositándose capa sobre capa para dar forma al objeto final. Esta técnica resulta idónea para prototipos estéticos y piezas de menor exigencia mecánica [32].

Para imprimir las piezas se han utilizado dos equipos: la *Prusa i3 MK3s*, que usa PLA (ácido poliláctico) como material de impresión, y la *Markforged X7*, que imprime con el termoplástico Onyx con la incorporación de fibra de vidrio para aumentar la rigidez estructural de las piezas fabricadas [33].

5.3 IMPRESIÓN DE PROTOTIPOS

En el caso de la fabricación aditiva mediante FDM con PLA, se ha utilizado el programa *Ultimaker Cura* como software de preparación de impresión. Este software permite realizar la descomposición en capas del modelo CAD y orientar las piezas de tal manera que se use la menor cantidad de material y tiempo posible.

Además, proporciona una estimación detallada del tiempo total de impresión y de la cantidad de filamento PLA necesario para cada pieza, información que resulta fundamental para el cálculo posterior de costes.

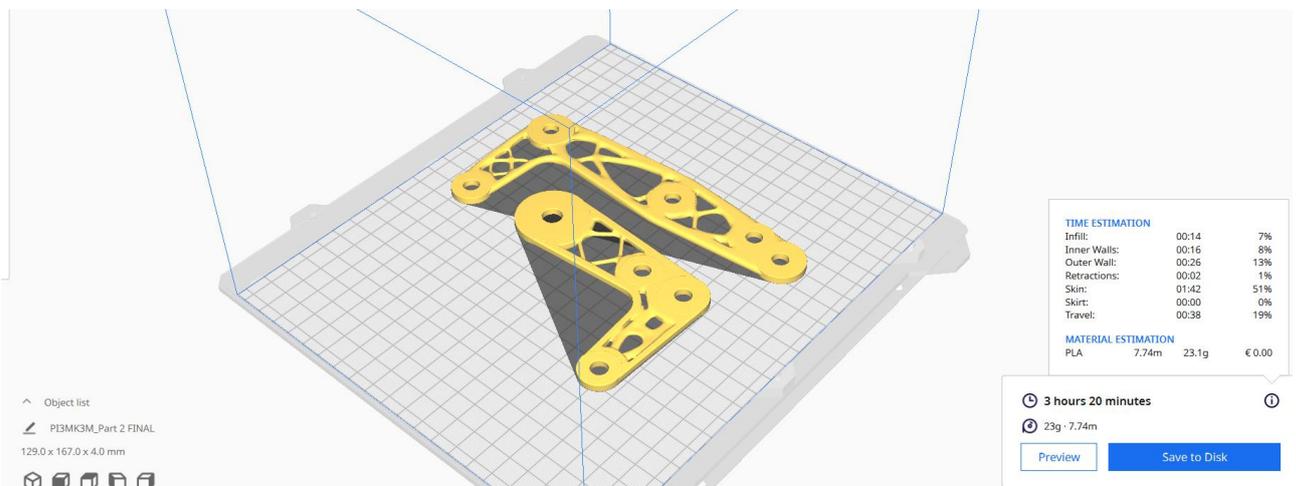


Ilustración 79: Detalles piezas en Cura

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Ilustración 79, se utiliza un total de 23.1 gramos de PLA aproximadamente, y la impresión de ambas piezas tarda 3 horas y 20 minutos.

Por otro lado, se utiliza el programa *Markforged* para preparar la impresión con refuerzo continuo de fibras (CFR). El software permite configurar la adjudicación de la cantidad y la posición del material compuesto, definiendo qué zonas de la pieza incorporarán refuerzos de fibra continua de vidrio y cuáles se imprimirán únicamente con matriz de Onyx.

Asimismo, el software proporciona una estimación precisa del tiempo de impresión de cada pieza y del consumo total de Onyx y de fibra, información necesaria para el control de costes.

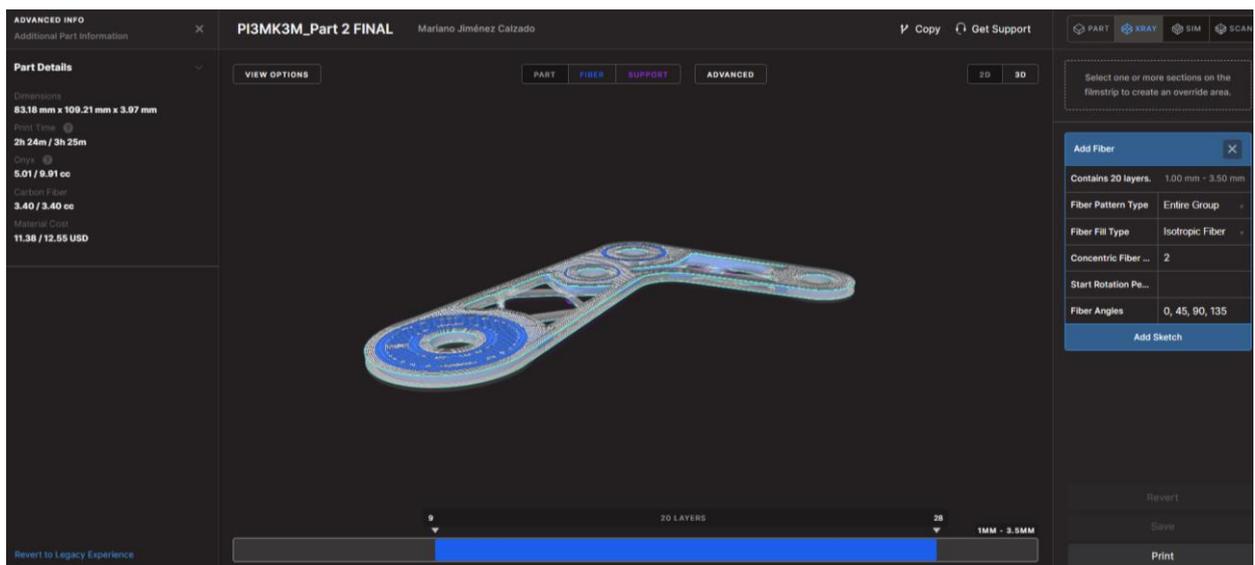
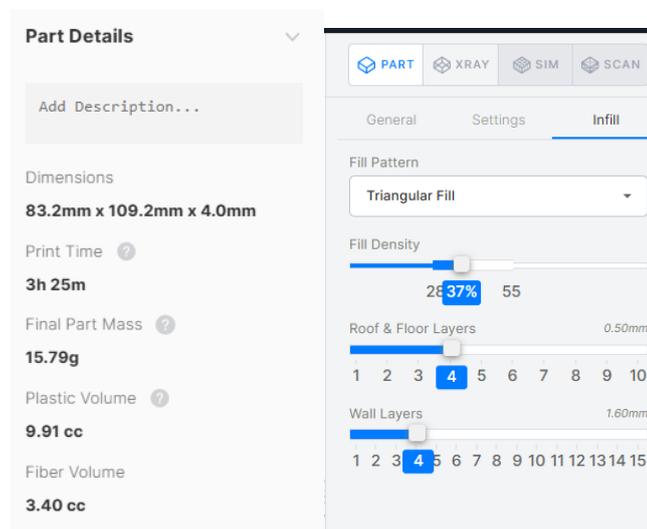


Ilustración 80: Parámetros impresión Markforged brazo B Fuente: Elaboración propia

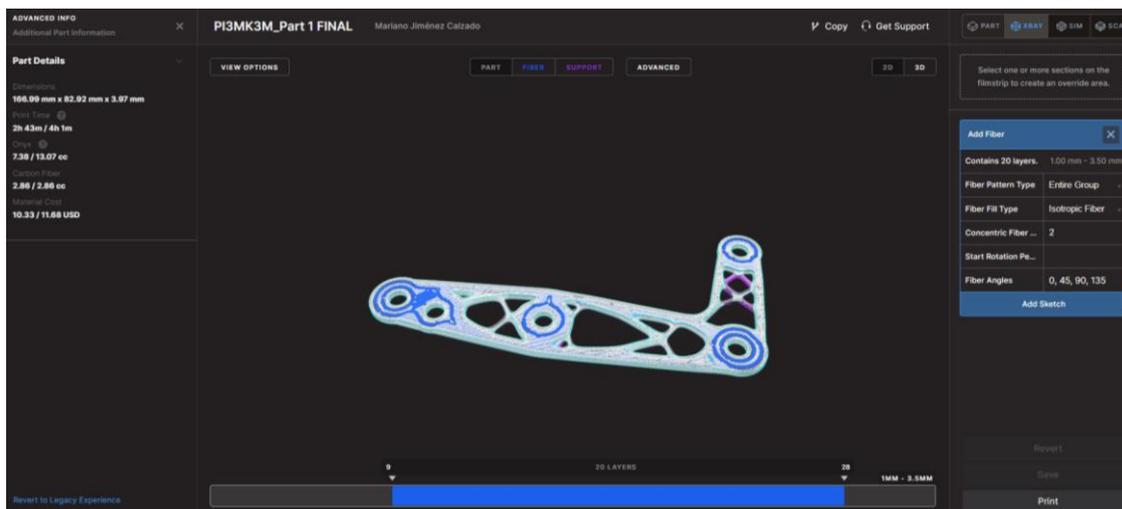
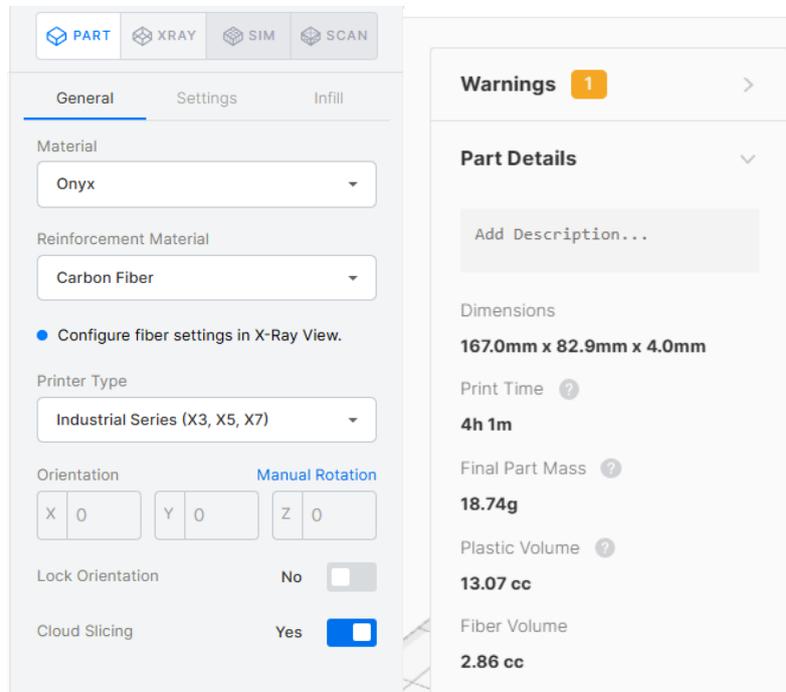


Ilustración 81: Parámetros impresión Markforged brazo A

Fuente: Elaboración propia

En este proyecto, se ha utilizado una altura de capa de 0,125 mm, con un patrón de relleno en celda triangular al 37% de densidad, y se han configurado cuatro capas de pared y cuatro capas de superficie inferior y superior. Se han asignado 20 capas centrales en las piezas para la colocación del refuerzo de fibra, con el fin de garantizar una resistencia estructural elevada.

5.4 FABRICACIÓN POR CORTE DE CHORRO DE AGUA

Por otro lado, se ha fabricado un prototipo utilizando la técnica de corte por chorro de agua. La geometría de las piezas, al presentar un espesor constante hacía de esta opción una alternativa económicamente viable y con un alto potencial como prototipo funcional.

Se utilizó el programa *ProtoMAX MAKE* para configurar la trayectoria de corte en la placa de acero. Del programa se puede cuantificar el tiempo y gasto de material para el corte de cada brazo por separado, datos necesarios para posteriormente realizar los cálculos de costes. La máquina utilizada fue la *ProtoMax build by Omax*.

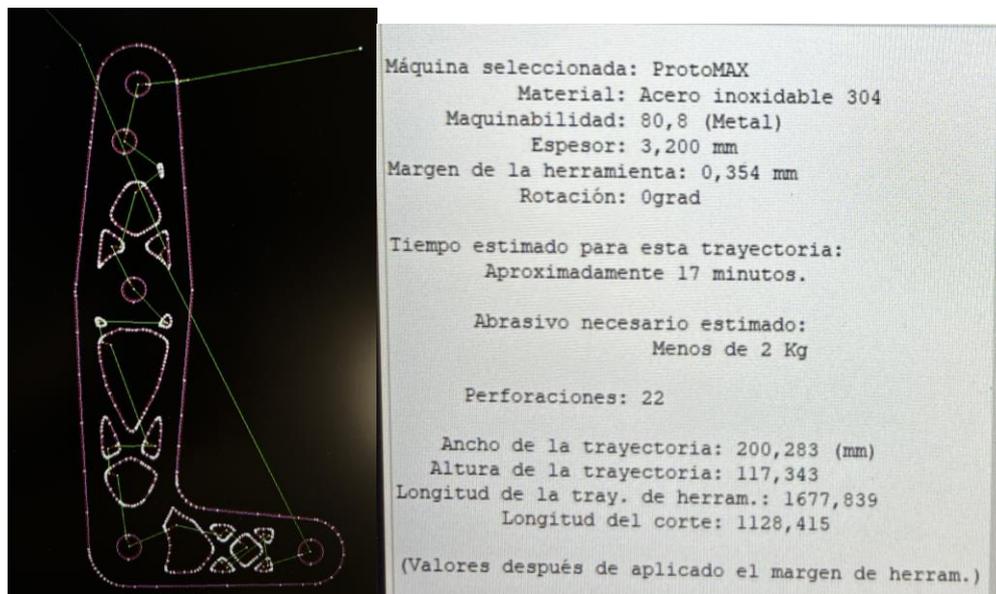


Ilustración 82: Configuración corte por chorro de agua

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran las piezas recién fabricadas en todas las técnicas antes de ser sometidas al post-procesado:

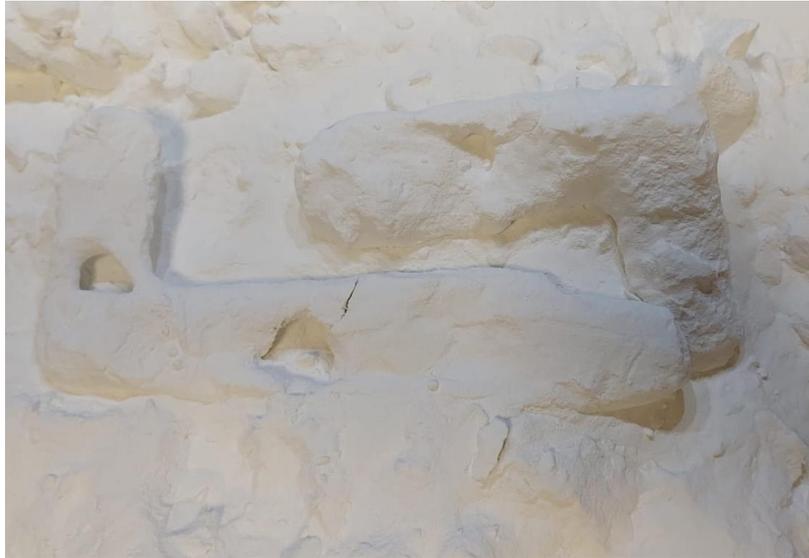


Ilustración 83: Fabricación en MJF

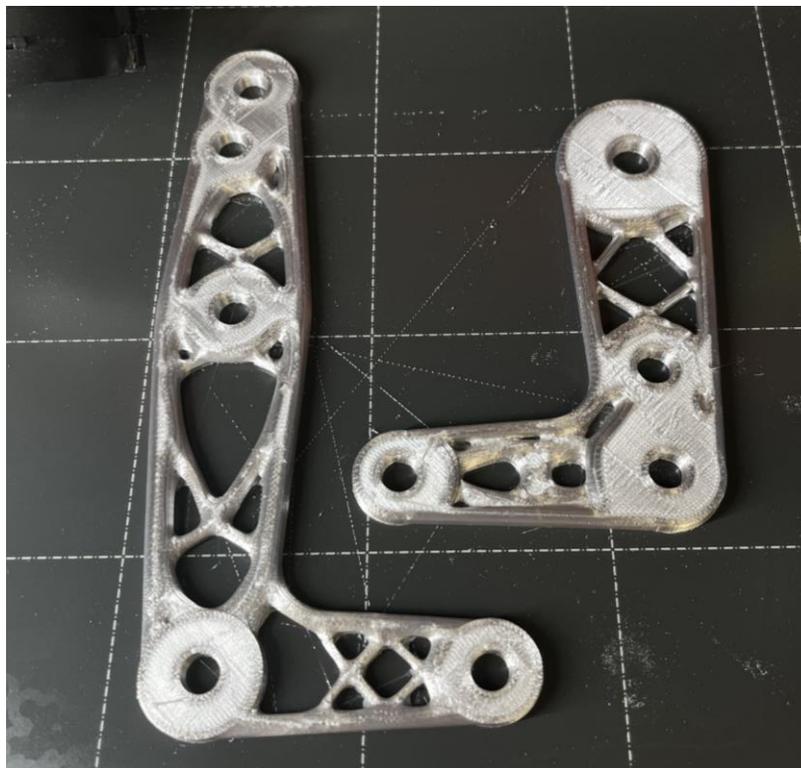


Ilustración 84: Fabricación en FDM

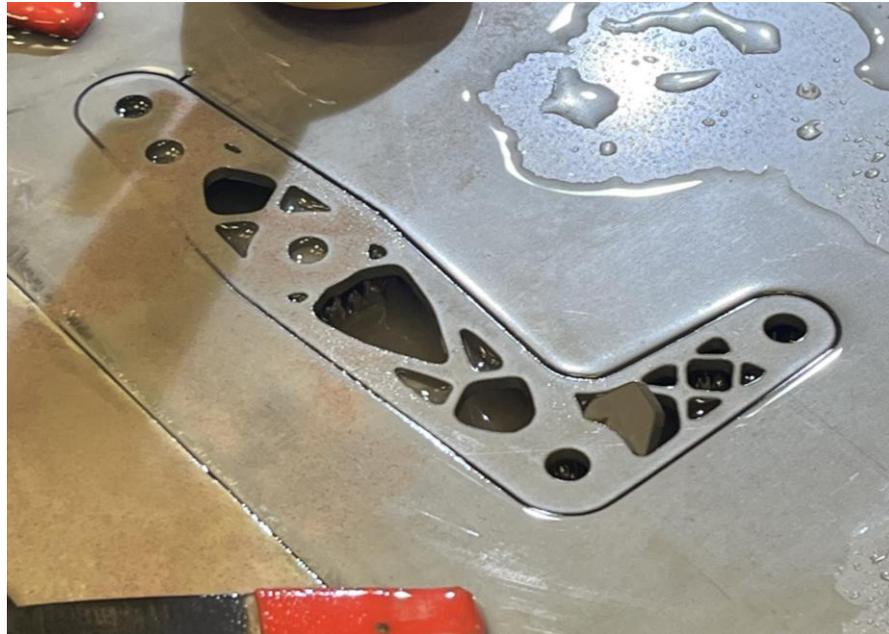


Ilustración 85: Fabricación por corte de chorro de agua



Ilustración 86: Prototipos sin optimizar, impreso en polvo, impreso en PLA

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 87: Brazo A en polvo, PLA, Onyx con fibra de vidrio Fuente: Elaboración propia

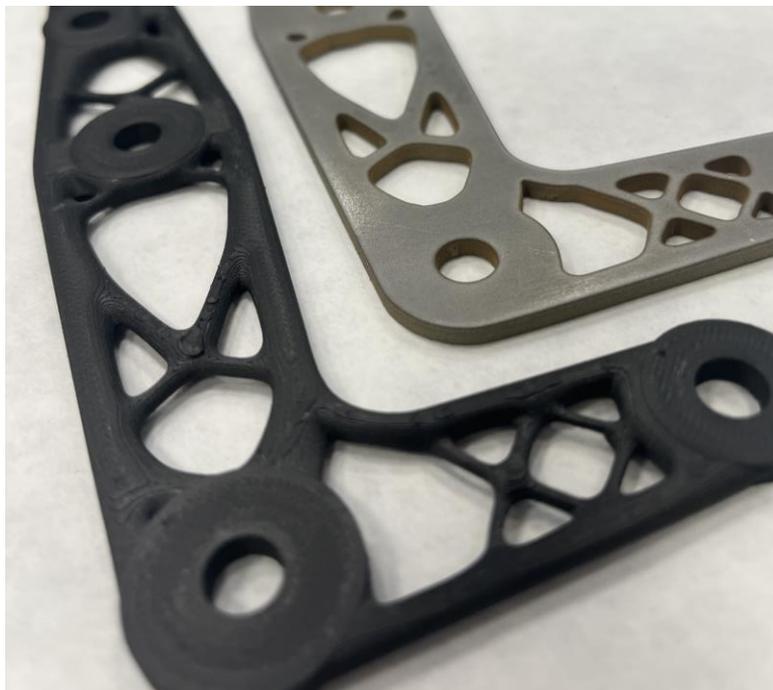


Ilustración 88: Corte por chorro de agua (2D) vs. CFR (3D) Fuente: Elaboración propia

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 PRESUPUESTOS ECONÓMICOS

Para evaluar la viabilidad económica de las soluciones desarrolladas, se han estimado los costes asociados al prototipado de la prensa de sujeción paralela en diferentes tecnologías de fabricación aditiva.

Se tiene en cuenta que las tecnologías de impresión 3D tiene un costo inicial de preparación más bajo y permite un mayor tiempo para generar ingresos a través de la fabricación. A pesar de que la inversión inicial puede ser elevada, la inversión se recupera rápidamente. Las curvas de costos generales para la impresión 3D y la fabricación convencional se muestran en la Ilustración posterior.

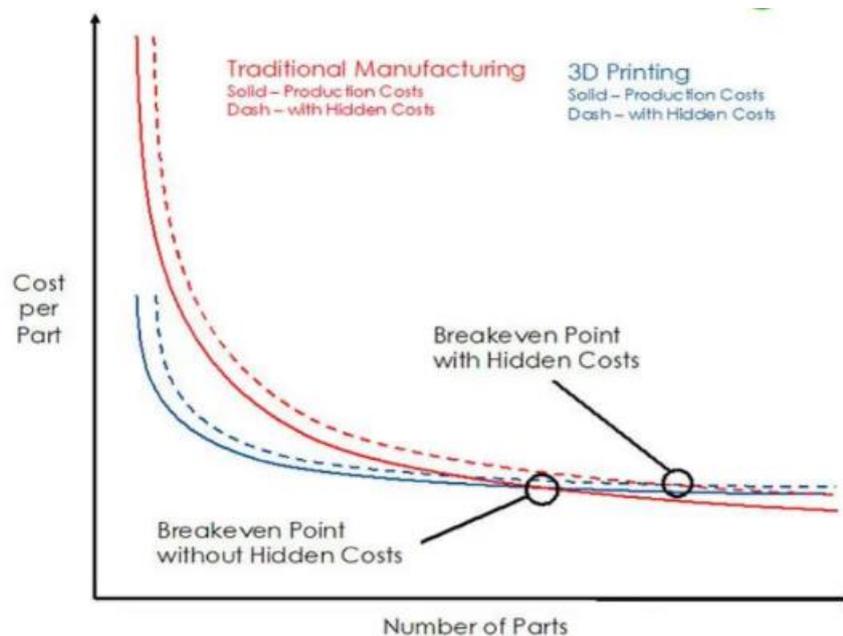


Ilustración 89: Curvas de costes I3D vs. Tradicional

Fuente: Diapositiva presentación I3D de Fabricación Comillas ICAI

Como se mencionó en el capítulo anterior, los tres métodos de fabricación aditiva empleados en este proyecto han sido FDM, MJF y CFR. Adicionalmente, se ha considerado la posibilidad de trabajar con tecnologías como sinterización directa por láser de metal (DMLS).

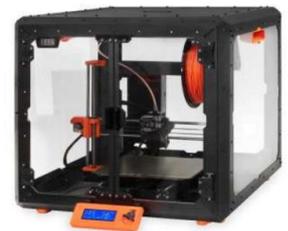
El proceso FDM destaca por ser la opción más económica, aunque sus aplicaciones suelen limitarse a prototipos de verificación estética o de montaje sin requerimientos estructurales significativos. Por otro lado, el proceso CFR se utiliza principalmente en entornos profesionales y permite, gracias al refuerzo con material compuesto, obtener piezas funcionales con propiedades mecánicas mejoradas, si bien con un coste más elevado que el FDM. Finalmente, el proceso DMLS se sitúa a nivel industrial, orientado a la fabricación de componentes metálicos de alta precisión y prestaciones.

En cuanto a la referencia económica, se estima que los brazos de una prensa de sujeción paralela, con dimensiones similares a los prototipos desarrollados en este proyecto y fabricados en acero inoxidable, presentan un precio de mercado aproximado de 200 euros por unidad [34]. No obstante, este coste puede variar en función del proveedor y de factores asociados a economías de escala.

6.1.1 COSTES PROTOTIPADO FUNCIONAL DE MONTAJE

FDM:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		1.200
Coste mantenimiento anual (€)		120
Años de amortización		4
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		0,22
Precio Hora venta-público (€/h)		0,28
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)		0,03
Coste material soporte: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)		0,03
Coste material bandeja (€/Ud.): (20€-100 uds.)		0,20
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Malla	Costes parciales
Material modelo (cc)	28,64	0,76 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	3,33	0,95 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,10	3,00 €
Cantidad de piezas	2,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	3,41 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	6,82 €	



MJF:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		80.000
Coste mantenimiento anual (€)		8.000
Años de amortización		5
Días impresión/año		90
Impresiones/día		1
Precio impresión (€)		266,67
Precio Impresión venta-público (€)		346,67
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)		100,00
Coste material: (€/cc)		0,11
Volumen Total (cc)		15634,75
Densidad de Empaquetado		10,00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)		20
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	28,64	3,01 €/ud
Impresión (h)	11,04	6,35 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	2,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	29,36 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	58,73 €	



6.1.2 COSTES PROTOTIPADO DE USO FINAL

CFR:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		66.500
Coste mantenimiento anual (€)		6.650
Años de amortización		7
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		6,18
Precio Hora venta-público (€/h)		8,03
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (240 €-750 cc)		0,32
Coste material modelo: fibra (€/cc) (240 €-750 cc)		0,50
Coste material bandeja (€/Ud.): (50€-100 uds.)		0,50
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		20
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS		
	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	22,98	7,35 €/ud
Soporte modelo (cc)	6,26	3,13 €/ud
Tiempo modelo (h)	7,06	56,67 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,50 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,10	2,00 €
Cantidad de piezas	2,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	68,66 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	137,32 €	



Corte por chorro de agua:

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN CORE CHORRO DE AGUA PROTOMAX		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		35.000
Coste mantenimiento anual (€)		3.500
Años de amortización		5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		5,10
Precio Hora venta-público (€/h)		6,63
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: Abrasivo tamaño 120 (€/kg)		0,60
Coste material: placa acero inoxidable (€/mm ³)		0,000611
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		20
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS		
	Opción Solido	Costes parciales
Material abrasivo (g)	3500,00	2,10 €/ud
Material acero (mm ³)	28637,00	0,02 €/ud
Tiempo modelo (h)	0,500000	3,32 €/ud
Tiempo post-procesado (h)	0,10	2,00 €
Cantidad de piezas	2,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	23,92 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	47,85 €	



Se valoró la posibilidad de fabricar los prototipos en metal mediante impresión 3D y se solicitaron presupuestos a empresas como ONXY, pero no fue posible obtener una estimación aproximada de costes debido a las dimensiones de las piezas. Ante esta limitación, se estudiaron alternativas como la impresión mediante CFR o la fabricación mediante corte por chorro de agua, que podían ofrecer una solución técnica y económica adecuada para piezas de uso final.

6.2 ANÁLISIS Y COMPARATIVA

Se ha realizado una comparativa entre el coste de fabricación del conjunto completo de la prensa de sujeción paralela, formado por dos piezas de cada brazo, mediante tres métodos diferentes de fabricación aditiva: impresión con CFR, impresión MJF y tecnología FDM. Adicionalmente, se ha incorporado un prototipo fabricado mediante corte por chorro de agua, que presenta asimismo una propuesta de valor interesante. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Precio mediante impresión MJF: 58.73 euros

Precio mediante impresión FDM: 6.82 euros

Precio mediante CFR: 137.32 euros

Por corte por chorro de agua: 47.85 euros

Como se ha comentado anteriormente, tanto la tecnología MJF como la FDM constituyen opciones adecuadas principalmente para la obtención de prototipos de modelado, pero no resultan recomendables para la fabricación de piezas de uso final, dada su limitada resistencia mecánica y las restricciones inherentes a los materiales empleados.

Por este motivo, se considera que la alternativa más idónea es la fabricación mediante CFR, que ofrece un equilibrio adecuado entre coste y propiedades mecánicas. Resulta de interés destacar que, en determinadas condiciones, su comportamiento podría llegar a sustituir el de una aleación metálica. Este aspecto se identifica como una posible línea de trabajo futuro, orientada a investigar en detalle sus prestaciones estructurales y la viabilidad de su uso en aplicaciones definitivas.

La opción del corte por chorro de agua también representa una alternativa llamativa, dado que presenta un coste inferior al de la fabricación mediante CFR (un 65,1 % menos aproximadamente). No obstante, su aplicación se encuentra limitada a geometrías con espesor constante y uniforme, por lo que únicamente sería viable en combinación con estrategias de optimización topológica que respeten este condicionante geométrico.

Se ha cuantificado la disminución de volumen obtenida mediante las iteraciones de optimización topológica realizadas sobre ambas piezas. La suma de los volúmenes iniciales y finales de los brazos A y B es la siguiente:

- **Volumen inicial total:**
 - Brazo A: 22446 mm³
 - Brazo B: 16049 mm³
 - Total inicial: 38495 mm³

- **Volumen final total:**
 - Brazo A: 12768 mm³
 - Brazo B: 15869 mm³
 - Total final: 28637 mm³

La reducción de volumen obtenida es de 9858 mm³, lo que supone una disminución aproximada del 25,63 % respecto al volumen inicial del conjunto.

Los análisis realizados permiten constatar que la optimización topológica aplicada sobre el diseño de la prensa de sujeción ha proporcionado una reducción significativa del volumen y, por tanto, del peso potencial de la pieza, manteniendo a su vez la funcionalidad estructural. Asimismo, la evaluación comparativa de costes confirma que la fabricación mediante CFR representa la alternativa más equilibrada entre prestaciones mecánicas y viabilidad económica, mientras que el corte por chorro de agua puede ser considerado en casos específicos con geometrías simplificadas.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de este proyecto se han alcanzado los objetivos propuestos, logrando diseñar y optimizar una prensa de sujeción paralela mediante técnicas avanzadas de diseño generativo, optimización topológica y fabricación aditiva. Entre los principales resultados obtenidos, cabe destacar:

- Reducción de costes respecto a soluciones tradicionales, con un coste mínimo estimado de fabricación de 6,82 euros mediante FDM y un coste de referencia de 137,32 euros para la fabricación con CFR, opción considerada más idónea por su equilibrio entre resistencia y coste.
- Reducción del volumen y, por ende, de la masa del conjunto en un 25,63 %, gracias a la aplicación de iteraciones de optimización topológica, manteniendo la funcionalidad estructural de la pieza.

Estas mejoras permiten confirmar que se han cumplido los objetivos definidos al inicio del trabajo, entre los que se incluyen:

- Aplicar técnicas de diseño generativo con el propósito de reducir la masa de las piezas sin comprometer sus propiedades mecánicas ni su funcionalidad principal.
- Modelar la prensa de sujeción en Solid Edge y realizar un análisis detallado del estado de cargas durante su funcionamiento, verificando que se cumplen los criterios de rigidez exigidos.
- Adquirir un manejo competente de las herramientas de análisis por elementos finitos (FEM) y diseño generativo (DG) disponibles en Solid Edge, lo que ha permitido simular, evaluar e iterar el diseño hasta obtener una solución optimizada.
- Investigar y comparar distintos tipos de tecnologías de fabricación aditiva con el fin de seleccionar la más adecuada para materializar un prototipo funcional del rediseño propuesto.

El desarrollo de este trabajo ha permitido consolidar conocimientos prácticos y teóricos en diversos ámbitos, como el modelado paramétrico en Solid Edge, la realización de análisis estructurales mediante el método de elementos finitos, la aplicación de criterios de diseño generativo y la fabricación mediante tecnologías de impresión 3D y corte por chorro de agua.

Los resultados obtenidos sirven como punto de partida para futuros trabajos de investigación, entre los que destacan:

- Realizar ensayos destructivos y no destructivos sobre prototipos fabricados, con el fin de verificar experimentalmente la rigidez y resistencia del diseño optimizado.
- Estudiar en mayor profundidad el comportamiento mecánico del material compuesto utilizado en CFR, para determinar con precisión si puede sustituir a determinadas aleaciones metálicas en aplicaciones reales.
- Analizar nuevas geometrías de optimización topológica compatibles con corte por chorro de agua, ampliando así el rango de procesos de fabricación viables.

En definitiva, este trabajo es un ejemplo de cómo el diseño y la ingeniería están avanzando gracias a nuevas tecnologías que permiten mejorar piezas que ya parecían totalmente desarrolladas. La posibilidad de optimizar geometrías, reducir costes y fabricar de forma más eficiente abre un abanico de oportunidades muy amplio. Aunque en este caso se ha trabajado sobre una prensa de sujeción, el mismo enfoque se podría aplicar a muchos otros componentes, lo que demuestra el gran potencial que tienen estas herramientas para el desarrollo de productos en el futuro.

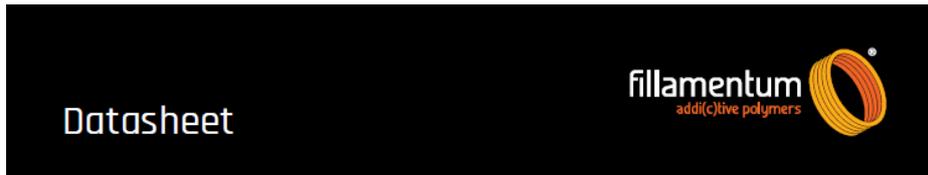
Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Kant Twist Clamp Assembly», pdfcoffee.com. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pdfcoffee.com/kant-twist-clamp-assembly-3-pdf-free.html>
- [2] «Kant Clamp and Engineering Drawings in Fusion 360 – Woody’s Workshop». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://altrish.co.uk/2021/05/03/kant-clamp-and-engineering-drawings-in-fusion-360/>
- [3] C. E. N. Alcantar, L. A. P. Gallardo, M. A. M. Bocanegra, y M. B. Sánchez, «Diseño generativo aplicado en el diseño de un pedal de frenado para automóvil», *Rev. Cienc. Tecnológicas*, vol. 6, n.º 4, Art. n.º 4, nov. 2023, doi: 10.37636/recit.v6n4e299.
- [4] «La empresa emergente de prótesis que ayuda a los amputados indios». Accedido: 6 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/es/design-make/articles/prosthetics-in-india>
- [5] «Pioneering bionic 3D printing | Airbus». Accedido: 6 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-03-pioneering-bionic-3d-printing>
- [6] «EFECTO DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA, EL NÚMERO DE ELEMENTOS Y EL EXPONENTE DE PENALIZACIÓN EN OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA ESTRUCTURAL», ResearchGate. Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/242174737_EFECTO_DE_LA_FRACCION_VOLU_METRICA_EL_NUMERO_DE_ELEMENTOS_Y_EL_EXPONENTE_DE_PENALIZACION_EN_OPTIMIZACION_TOPOLOGICA_ESTRUCTURAL
- [7] E. Franco, «Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido», ene. 2015, Accedido: 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/66810832/Optimizaci%C3%B3n_topol%C3%B3gica_aplicada_al_dise%C3%B1o_de_componentes_estructurales_mec%C3%A1nicos_de_peso_reducido
- [8] «Análisis de ingeniería con SolidWorks Simulation 2017», SlideShare. Accedido: 14 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/anlisis-de-ingeniera-con-solidworks-simulation-2017/67505486>
- [9] L. L. O. Pereiro, «Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos», *Ing. Mecánica*, vol. 9, n.º 3, pp. 7-13, 2006.
- [10] G. Mirlisenna, «Método de los elementos finitos: ¿qué es?», ESSS. Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.esss.com/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-ques/>
- [11] O. G. Woge, C. O. G. Morán, y A. L. Chau, «Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab», vol. 1, 2020.
- [12] J. T. Celigüeta, «Método de los Elementos Finitos».
- [13] T. Hidayat *et al.*, «Investigation of mesh model for a finite element simulation of the», 2023.
- [14] «Análisis de elementos finitos en Solid Edge Simulation». Accedido: 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.sw.siemens.com/es-ES/doc/246738425/PL20190201104957790.sesim/xid1655083>
- [15] M. Zahera, «LA FABRICACIÓN ADITIVA, TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS», 2012.
- [16] C. A. Heredia Martínez y J. P. Franco Rubio, «Tecnologías de fabricación aditiva. La impresora 3D, antecedentes y funcionamiento», *Ignis*, n.º 7, pp. 24-30, abr. 2014, doi: 10.52143/2711-029X.92.

- [17] «IMPRESION 3D por Estereolitografía (SLA) | ¿Qué es y cómo funciona?», Innovación y Tecnología. Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/>
- [18] ALICE, «Comprender el proceso de impresión 3D: una guía completa sobre las tecnologías de impresión 3D», Goldsupplier. Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.goldsupplier.com/es/3d-printing-diagram/>
- [19] I. Lopez, «Tendencias en impresión 3D para 2025», Sicnova. Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/tendencias-impresion-3d/>
- [20] «Fabricación Híbrida: El Futuro de la Manufactura Combinada». Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tecnobro3d.com/integracion-impresion-3d-y-cnc/>
- [21] «KANT TWIST 407 2-1/2». Accedido: 16 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.travers.com/product/kant-twist-407-c-clamp-61-150-025>
- [22] «KANT-TWIST® T-Handle Clamps», Industrial Magnetics, Inc. Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.magnetics.com/products/kant-twist-t-handle>
- [23] «Kant Twist Cantilever Clamp, Stainless Steel, 4-1/2" Jaw Capacity - K045TSD| Penn Tool Co., Inc». Accedido: 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.penntoolco.com/kant-twist-cantilever-clamp-stainless-steel-4-1-2-jaw-capacity-k045tsd/>
- [24] Switch & Lever, *Making a Kant Twist Clamp*, (26 de marzo de 2014). Accedido: 27 de mayo de 2025. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=rlvLUS2Lixc>
- [25] S. Lopez, «<http://www.clampmfg.com/>». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mcmaster.com/>
- [26] «McMaster-Carr». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mcmaster.com/>
- [27] «Kant-Twist Clamp | Metalworking Clamps | Carbide Processors». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://carbideprocessors.com/clamp-manufacturing-co/kant-twist-clamps/?srsltid=AfmBOor1xEi7AB1LjZWzuWtZYUtHqLCMQeHMkbig35E_zVA5YnVt5iB0
- [28] A. Deacon, «Fit». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://help.altair.com/inspire/en_us/topics/shared/geometry/polynurb_fit_st_t.htm?utm_source
- [29] G. NTH, «Consejos para el diseño e impresión 3D», Grilon3. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://grilon3.com.ar/consejos-para-el-diseno-e-impresion-3d/>
- [30] «Comprender la tecnología de fusión por lecho de polvo». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.protolabs.com/es-es/recursos/sugerencias-de-diseno/comprender-la-tecnologia-de-fusion-por-lecho-de-polvo/>
- [31] «Tecnología de impresión 3D HP Multi Jet Fusion | HP® España». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.hp.com/es-es/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>
- [32] «Tecnología de impresión 3D por deposición fundida», Xometry Pro. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://xometry.pro/es/articulos/impresion-3d-fdm-tecnologia/>
- [33] «Tecnologías y tipos de impresoras 3D». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-types-technologies>
- [34] «Tornillo de apriete paralelo 25 mm Turnus 431-001 | Leroy Merlin», Leroy Merlin - Bricolaje, Decoración, Hogar, Jardín. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.leroymerlin.es/productos/tornillo-de-apriete-paralelo-25-mm-turnus-431-001-86515475.html>

ANEXO I

Ficha técnica PLA:



PLA Extrafill

Description:

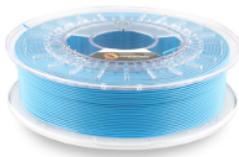
Fillamentum PLA Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0.05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1.24 g/cm ³	ASTM D792	
Melt flow index	6 g/10 min	ASTM D1238	210 °C, 2.16 kg
Diameter tolerance	+ 0.05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	53 MPa	ASTM D882	
Elongation at break	6 %	ASTM D882	
Tensile modulus	3600 MPa	ASTM D882	
Flexural strength	83 MPa	ASTM D790	
Flexural modulus	3800 MPa	ASTM D790	
Load impact strength	16 J/m	ASTM D256	23 °C, notched

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Glass transition temperature	56-60 °C	ASTM D3418	
Heat distortion temperature	56 °C	ASTM E2092	0.45 MPa

Printing properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Print temperature	190-210 °C		
Hot pad	40-50 °C		
Speed of printing	30-40 mm/min		

Coste placa acero grosor 3mm:



**Lámina metálica RS PRO,
 long. 500mm, anch.
 300mm, grosor 3mm**

Código RS
 559-111

1 Lote de 2
275,11 €

Cantidad

-

+

Añadir

[Hoja de datos](#)

RS PRO 500mm