



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Proyecto de fin de grado

Aplicación de la fabricación aditiva en el desarrollo de utillajes de sujeción en máquinas-herramientas

Autor: Alejandro Portillo Avellaneda

Directores: Mariano Jiménez Calzado y David Fraiz Cosano

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Aplicación de la fabricación aditiva en el desarrollo de utillajes de sujeción en
máquinas-herramientas**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **2021/22** 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.: **Alejandro Portillo Avellaneda**

Fecha: 01/07/2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fecha: 01/07/2022

Fdo.: **Prof. Mariano Jiménez Calzado**

Prof. David Fraiz Cosano



Agradecimientos

A mis padres, simplemente gracias.

Aplicación de la fabricación aditiva en el desarrollo de utillajes de sujeción en máquinas-herramientas

Autor: Alejandro Portillo Avellaneda

Directores: Mariano Jiménez Calzado y David Fraiz Cosano

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como objetivo obtener, mediante técnicas de fabricación aditiva, piezas propias de utillajes de sujeción empleados habitualmente en máquinas-herramientas para procesos de arranque de material. Concretamente, las partes a analizar de dichos utillajes de sujeción son dos; por un lado, las garras o bocas de una mordaza hidráulica y, por otro, las garras de un plato de garras.

Las máquinas-herramientas donde se emplean dichos utillajes de sujeción son el torno convencional para el caso del plato de garras y la fresadora universal para el caso de la mordaza hidráulica.

Dichos elementos por analizar son los encargados de proporcionar una buena sujeción que permita garantizar un buen mecanizado durante el proceso de arranque de material. Lo que se pretende, por tanto, es verificar la posibilidad de sustituir los elementos originales, fabricados en acero templado normalmente, por otros fabricados con materiales y técnicas propios de la fabricación aditiva.

Se realiza un primer modelado 3D de las piezas a imprimir para posteriormente realizar un análisis de fuerzas, además de un análisis para una posible optimización de su geometría. También se valoran distintas opciones de diseño en función de necesidades concretas y la posibilidad o necesidad de reforzar dichas piezas. Con todo esto, se procede a realizar ensayos reales empleando las piezas fabricadas en los utillajes de sujeción pertinentes.

La fabricación de piezas se realizará empleando la impresora y el software que acompaña a la misma desarrollado y distribuido por MarkForged. De la misma forma, uno de los puntos más importantes es el de los materiales empleados, ya que por el tipo de piezas que se están analizando se espera de ellos una alta resistencia mecánica para poder confirmar su validez.

Entre los materiales ofertados por el fabricante se ha valorado la posibilidad de emplear tanto Nylon como Onyx en el caso del material base de las piezas y, en el caso de emplear material de refuerzo en aquellas piezas que así lo precisen, el uso de la fibra de carbono o la fibra de vidrio.

Finalmente, tras analizar todos los parámetros de diseño y fases que acompañan a toda impresión basada en aditiva, las fuerzas de trabajo, las tensiones y deformaciones existentes, así como posibles variaciones y modificaciones respecto de las piezas base, se consiguen desarrollar distintos prototipos.



ILUSTRACIÓN 1: ESQUEMA BÁSICO DE TRABAJO EN IMPRESIÓN 3D

El estudio de la viabilidad de dichas piezas se confirma a través de ensayos reales usando las piezas impresas en los utillajes de sujeción originales tanto para el caso del torno convencional como de la fresadora universal.

Finalmente, se consigue llegar a un prototipo que permite realizar trabajos de arranque de material en ambas máquinas-herramientas sin comprometer el proceso o el acabado de la pieza a mecanizar, garantizando la estabilidad y resistencia de las piezas impresas durante el proceso y su posibilidad de ser empleadas en trabajos posteriores.

Verificada la viabilidad de las piezas impresas, se propone una comparativa con las piezas o repuestos originales donde se analizan factores como el precio, peso, tiempo de sustitución o fabricación, grado de personalización, calidad del acabado entre otros.



ILUSTRACIÓN 2: GARRA PARA TORNO ORIGINAL (ARRIBA DERECHA) Y DOS PROTOTIPOS IMPRESOS POR ADITIVA

Las distintas conclusiones que ofrece este proyecto se pueden sintetizar en la idea de que, una vez superada la barrera de las limitaciones mecánicas de los materiales empleados en la fabricación aditiva (los cuales, aunque presentan buenas propiedades, quedan lejos de las ofrecidas por los materiales metálicos) la ventaja competitiva de esta tecnología es indudable.

Aunque en términos rentabilidad para series con una producción de piezas elevadas los procesos productivos tradicionales son más competitivos que los basados en la tecnología 3D, esta presenta numerosas ventajas en otros aspectos. Cuando se habla de prototipos, fabricación de series cortas o repuestos de piezas, en base a los resultados obtenidos, se consigue una reducción significativa de factores como el precio, aunque no se limita a este.

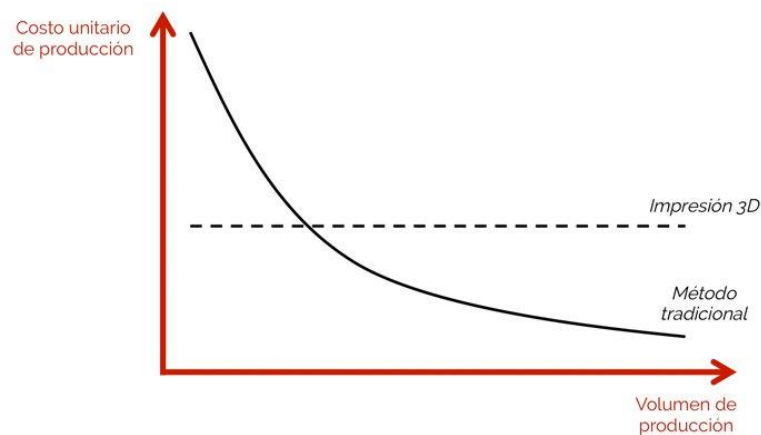


ILUSTRACIÓN 3: COSTE UNITARIO SEGÚN TECNOLOGÍA

Queda demostrado que la técnica empleada consigue una ventaja clara respecto a la original en términos de reducción de peso, posibilidad de realizar modificaciones para trabajos concretos, personalización de piezas o tiempos de repuesto (entendido desde el momento en el que dicha pieza es necesaria hasta que dicha pieza puede ser empleada).

APPLICATION OF ADDITIVE MANUFACTURING IN THE DEVELOPMENT OF CLAMPING TOOLS FOR STOCK REMOVAL PROCESSES.

Author: Alejandro Portillo Avellaneda

Supervisors: Mariano Jiménez Calzado y David Fraiz Cosano

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The objective of this project is to obtain, using additive manufacturing techniques, parts of clamping tools used in stock removal processes. Specifically, the parts to be analyzed of these clamping tools are two; on the one hand, the jaws of a hydraulic clamp and, on the other hand, the jaws of a chuck.

The machines where these clamping tools are used are the parallel lathe in the case of the chuck and the universal milling machine in the case of the hydraulic clamp.

These elements to be analyzed are the ones in charge of providing a good clamping to guarantee a good machining during the material removal process. The aim, therefore, is to verify whether it is possible to replace the original elements, usually made of hardened steel, with others manufactured with materials and techniques typical of additive manufacturing.

At first, a 3D modeling of the parts to be printed is carried out in order to subsequently perform a force analysis as well as an analysis for a possible optimization of their geometry. In addition, different design options are evaluated according to specific needs and also the possibility or need to reinforce these parts is considered. With all this, we proceed to carry out real tests using the printed parts in the original clamping tools.

The printing of parts will be done using the printer and the software developed and distributed by MarkForged. In the same way, one of the most important points is the materials used, since due to the type of parts being analyzed, a high mechanical resistance is expected from them in order to verify their validity.

Among the materials offered by the manufacturer, the possibility of using both Nylon and Onyx in the case of the base material of the parts has been evaluated and, in the case of using reinforcement material in those parts that require it, the use of carbon fiber or fiberglass will be considered.

Finally, after analyzing all the design parameters and phases involved in all additive-based printing, the working forces, the existing stresses and deformations, as well as possible variations and modifications with respect to the base parts, different prototypes are developed.



FIGURE 1: BASIC SCHEME OF WORK IN 3D PRINTING

The study of the feasibility of these parts is confirmed through real tests using the printed parts on the original clamping tools for both the lathe and the milling machine.

Finally, different prototype are manufactured allowing material removal work to be carried out on both stock material machines without compromising the process or the quality of the part to be machined and guaranteeing the stability and resistance of the printed parts during the process and their possibility of being used in subsequent work.

Once the viability of the printed parts has been verified, a comparison with the original parts or spare parts is proposed, where factors such as price, weight, replacement or manufacturing time, degree of customization, quality, among others, are analyzed.



FIGURE 2: ORIGINAL LATHE GRIPPER (TOP RIGHT) AND TWO ADDITIVE PRINTED PROTOTYPES

The different conclusions offered by this project can be summarized in the idea that, once the barrier of the mechanical limitations of the materials used in additive manufacturing (which, although they have good properties, are far from those offered by metallic materials) has been overcome, the competitive advantage of this technology is unquestionable.

Although in terms of profitability for series with a high production of parts, traditional production processes are more competitive than those based on 3D technology, this technology has numerous advantages in other aspects. When it comes to prototypes, short sized series or spare parts, based on the results obtained, a significant reduction in factors such as price is achieved, although it is not limited to this.

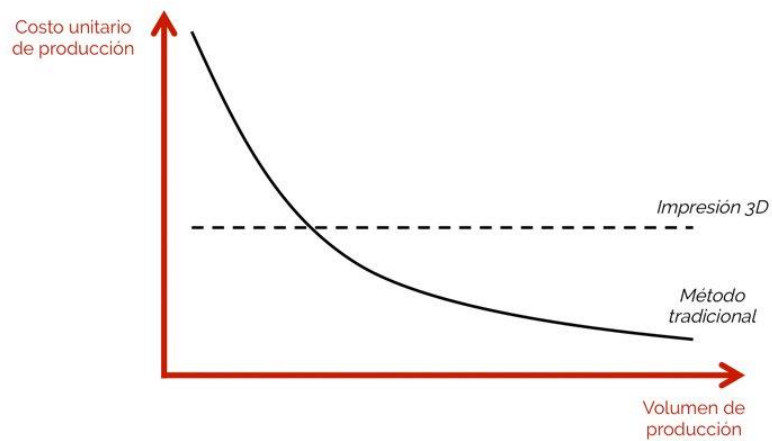


FIGURE 3: UNIT COST BY TECHNOLOGY

It has been demonstrated that the technique used achieve a clear advantage over the original process in terms of weight reduction, possibility of making modifications for specific Jobs, customization or replacement times (understood from the moment the part is needed until it can be used).

Índice de contenidos

1. Introducción.....	21
2. Motivación.....	22
3. Objetivos del proyecto.....	23
4. Estado del arte.....	24
4.1. Fabricación aditiva	24
4.1.1. Historia de la fabricación aditiva.....	24
4.1.2. Ventajas e inconvenientes de la fabricación aditiva	26
4.1.3. Proceso de fabricación aditiva.....	29
4.1.4. Variables de diseño.....	32
4.2. Utillajes	39
4.2.1. Generalidades de los utillajes.	39
4.2.2. Clasificación de los utillajes.	41
4.2.3. Principales tipos de utillajes.	43
4.3. Máquinas herramientas.....	49
4.3.1. Torno convencional.....	49
4.3.2. Fresadora.....	53
4.3.3. Otros procesos de conformado por arranque de material.	55
5. Recursos a emplear	56
5.1. Diseño y análisis de piezas.....	56
5.1.1. Dimensiones y medidas.	56
5.1.2. Solid Edge.....	57

5.1.3.	<i>Análisis por elementos finitos.....</i>	58
5.1.4.	<i>Diseño generativo u optimización topológica.</i>	59
5.2.	<i>Fabricación de piezas.....</i>	60
5.2.1.	<i>Impresora Mark Two.</i>	60
5.2.2.	<i>Materiales de impresión.....</i>	61
5.3.	<i>Ensayo de piezas.....</i>	65
6.	<i>Metodología de trabajo.....</i>	69
6.1.	<i>Modelado 3D de la pieza</i>	69
6.1.1.	<i>Descripción y modelado 3D de las garras de mordaza para fresadora.</i>	69
6.1.2.	<i>Descripción y modelado 3D de garras de un plato para torneado.....</i>	70
6.1.3.	<i>Otras consideraciones en el modelado de piezas.....</i>	72
6.2.	<i>Impresión de prototipos.....</i>	73
6.2.1.	<i>Parámetros de diseño en impresión de prototipos.....</i>	73
6.2.2.	<i>Propuestas iniciales de impresión.....</i>	79
6.2.3.	<i>Resultados de impresión.....</i>	81
6.3.	<i>Análisis de las fuerzas de sujeción.....</i>	84
6.3.1.	<i>Análisis de fuerzas de sujeción para garra de mordaza.</i>	84
6.3.2.	<i>Fuerzas de sujeción en el plato de garras de un torno paralelo.....</i>	85
6.4.	<i>Análisis por elementos finitos</i>	88
6.4.1.	<i>Análisis por elementos finitos para garra de mordaza.</i>	88
6.4.2.	<i>Análisis por elementos finitos para garra de plato.</i>	90
6.5.	<i>Diseño generativo.....</i>	93
6.5.1.	<i>Diseño generativo de garra para mordaza.</i>	93

6.5.2.	<i>Diseño generativo de garra para mordaza.</i>	96
6.6.	Nuevos prototipos y modificaciones	99
6.6.1.	<i>Nuevo prototipo para garra de mordaza.</i>	99
6.6.2.	<i>Nuevo prototipo para garra de plato.</i>	102
7.	Resultados	107
7.1.	Ensayo de piezas.	107
7.1.1.	<i>Ensayo de garras para mordaza en operaciones de fresado.</i>	107
7.1.2.	<i>Ensayo de garras para plato en operaciones de torneado.</i>	111
7.2.	Viabilidad de las piezas y posibles modificaciones.	116
7.2.1.	<i>Viabilidad de garra para mordaza.</i>	116
7.2.2.	<i>Viabilidad de garra para plato de garras</i>	118
7.3.	Comparativa con repuestos originales.	119
7.3.1.	<i>Comparativa de garras para mordaza.</i>	120
7.3.2.	<i>Comparativa de garras para plato</i>	122
8.	Conclusiones	124
9.	Bibliografía	126
10.	Anexos.	131
	<i>Anexo I: Especificaciones técnicas recursos fabricación aditiva.</i>	131
	<i>Anexo II: Especificaciones de los utillajes y máquinas-herramientas empleadas</i>	134
	<i>Anexo III: Planos de las piezas impresas.</i>	139
	<i>Anexo IV: Objetivos de desarrollo sostenible.</i>	145

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Esquema básico de trabajo en impresión 3D. Obtenido de: https://www.interempresas.net/	4
Ilustración 2: Garra para torno original (arriba derecha) y dos prototipos impresos por aditiva	4
Ilustración 3: Coste unitario según tecnología. Obtenido de: https://www.3dnatives.com/es/	5
Ilustración 4: Eje cronológico fabricación aditiva. Obtenido de: http://fabricacionaditiva.online/5.htm	25
Ilustración 5: Pieza por fabricación aditiva. Obtenido de: http://tresdpro.com/que-se-puede-imprimir-con-impresoras-3d/	26
Ilustración 6: Comparativa fabricación tradicional y aditiva. <i>Hernández-Castellano et al., 2018</i>	27
Ilustración 7: Nivel de detalle en función de la impresora y material. Obtenido de: https://filament2print.com/	28
Ilustración 8: Fases proceso de fabricación aditiva. Obtenido de: https://addvance3d.com/	29
Ilustración 9: Archivo STL. Obtenido de: https://mizaradditive.com/	30
Ilustración 10: Fase de post-procesado. Obtenido de: https://www.izaro.com/	31
Ilustración 11: Materiales de impresión. Obtenido de: https://www.addimen.com/impresion-plastico/	32
Ilustración 12: Modelado por haz de alta energía. Obtenido de: https://www.3dnatives.com/	33
Ilustración 13: Modelado por deposición fundida. Obtenido de: https://www.3dnatives.com/	34
Ilustración 14: Modelado por deposición fundida. Obtenido de: https://es.wikipedia.org/	35
Ilustración 15: Modelado por estereolitografía. <i>Mendialdua Landecho, 2020</i>	36
Ilustración 16: Modelado por SLS. Obtenido de: https://www.3dnatives.com/	37

Ilustración 17: Modelado por MJF. Obtenido de: https://descubrearduino.com/	38
Ilustración 18: Ejemplo de utillajes; plato y lunetas. Obtenido de: http://oposyeducion.blogspot.com/	39
Ilustración 19: Ejemplo de utillaje mecánico. Obtenido de: https://www.dismak.com/ ...	41
Ilustración 20: Ejemplos de utillajes neumáticos. Obtenido de: http://emaergonomia.com/	42
Ilustración 21: Ejemplo de utillaje hidráulico. Obtenido de: https://coparoman.blogspot.com/	42
Ilustración 22: Ejemplo de utillaje magnético. Obtenido de: https://www.fertrans.com/	43
Ilustración 23: Ejemplo plato de garras. Obtenido de: https://www.roehm.biz/es/productos/	44
Ilustración 24: Ejemplo de punto rotativo. Obtenido de: https://www.roehm.biz/es/productos/	44
Ilustración 25: Ejemplo arrastrador frontal. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	44
Ilustración 26: Ejemplo de mandril expansible. Obtenido de: https://www.roehm.biz/es/productos/	45
Ilustración 27: Ejemplo de luneta. Obtenido de: https://www.roehm.biz/es/productos/	45
Ilustración 28: Ejemplo de mordaza. <i>Obtenido de:</i> https://www.roehm.biz/es/productos/	46
Ilustración 29: Ejemplo de divisor. Obtenido de: https://tecnomaquinas.es/	46
Ilustración 30: Ejemplo de mesa circular. Obtenido de: https://www.fresadora.fun/	47
Ilustración 31: Ejemplo de sujeción modular. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	47
Ilustración 32: Ejemplo de plato magnético. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	47
Ilustración 33: Ejemplo de sujeción por vacío. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	48

Ilustración 34: Partes de torno convencional. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	49
Ilustración 35: Operaciones en torno convencional. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	51
Ilustración 36: Partes de fresadora universal. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	53
Ilustración 37: Operaciones en fresadora universal. <i>Apuntes tecnologías de fabricación y producción</i>	54
Ilustración 38: Pie de rey midiendo garra de torno	56
Ilustración 39: Ejemplo de análisis por elementos finitos. Obtenido de: https://www.pixelsistemas.com/	58
Ilustración 40: Ejemplo de diseño generativo. Obtenido de: https://www.bloquetech.com/el-diseno-generativo/	59
Ilustración 41: Impresora fabricando una pieza.....	60
Ilustración 42: Impresora Mark Two	60
Ilustración 43: Ejemplo pieza impresa con material Onyx	61
Ilustración 44: Fibra de carbono.....	62
Ilustración 45: Fibra de vidrio.....	62
Ilustración 46: Mordaza empleada.....	66
Ilustración 47: Fresadora y mordaza empleada	66
Ilustración 48: Plato y torno empleados	68
Ilustración 49: Torno convencional empleado	68
Ilustración 50: Garra de mordaza 2	70
Ilustración 51: Garra de mordaza 1	70
Ilustración 52: Partes de un plato de garras. Obtenido de: https://www.mk-coin.com/es/catalogo/platos-manuales/	70
Ilustración 53: Garras de plato (1).....	71
Ilustración 54: Garras de plato (2) 71	
Ilustración 55: Impacto de la altura de capa. Obtenido de: https://tresde.pe/entendiendo-los-parametros-de-la-impresion-3d-de-resina/	73

Ilustración 56: Material de soporte según orientación. Obtenido de:	
https://tresde.pe/entendiendo-los-parametros-de-la-impression-3d-de-resina/	74
Ilustración 57: Influencia de la densidad de relleno. Obtenido de:	
https://www.3dworks.cl/post/porcentaje-de-relleno-en-impresi%C3%B3n-3d	75
Ilustración 58: Tipos de patrones de relleno. Obtenido de:	
https://support.bcn3d.com/es/knowledge/infill	77
Ilustración 59: Prototipo 1 de garra para mordaza	79
Ilustración 60: Prototipo 1 de garra para plato de garras	80
Ilustración 61: Resultado de impresión de garra para mordaza	81
Ilustración 62: Garra para mordaza sujetando una pieza	82
Ilustración 63: Resultado impresión garra para torno	82
Ilustración 64: Garra para torno y material de soporte	82
Ilustración 65: Detalle de la garra encajada en el plato	83
Ilustración 66: Garra para torno sujetando una pieza	83
Ilustración 67: Comprobación de que las garras encajan entre sí	83
Ilustración 68: Fuerza centrífuga en plato de garras. Obtenido de:	
https://wryen.com/2021/12/28/calculo-de-la-fuerza-de-sujecion-en-el-plato-hidraulico-de-un-torno-cnc/	85
Ilustración 69: Fuerzas en un plato de garras durante el mecanizado. Obtenido de:	
https://wryen.com/2021/12/28/calculo-de-la-fuerza-de-sujecion-en-el-plato-hidraulico-de-un-torno-cnc/	86
Ilustración 70: Resultados de análisis por elementos finitos de garra para mordaza (1)...	89
Ilustración 71: Resultado de análisis por elementos finitos de garra para mordaza (2)	89
Ilustración 72: Resultados de análisis por elementos finitos de garra para plato (1).....	91
Ilustración 73: Resultados de análisis por elementos finitos de garra para plato (2).....	91
Ilustración 74: Resultado diseño generativo de garra para mordaza (1).....	94
Ilustración 75: Resultado diseño generativo de garra para mordaza (2).....	94
Ilustración 76: Detalle reducción en masa por diseño generativo.....	94
Ilustración 77: Resultado diseño generativo de garra para mordaza (3).....	94

Ilustración 78: Resultado diseño generativo de garra para mordaza (4).....	95
Ilustración 79: Resultado diseño generativo de garra para plato (2).....	96
Ilustración 80: Resultado diseño generativo de garra para plato (1).....	96
Ilustración 81: Resultado diseño generativo de garra para plato (4).....	97
Ilustración 82: Resultado diseño generativo de garra para plato (3).....	97
Ilustración 83: Barra de apoyo usada para piezas de pequeña sección.....	99
Ilustración 84: Prototipo 2 de garra para mordaza	100
Ilustración 85: Resultado análisis por elementos finitos prototipo 2 de garra para mordaza (1).....	101
Ilustración 86: Resultado análisis por elementos finitos prototipo 2 de garra para mordaza (2).....	101
Ilustración 87: Prototipo 2 de garra para plato (2)	103
Ilustración 88: Prototipo 2 de garra para plato (1)	103
Ilustración 89: Resultado de análisis por elementos finitos prototipo 2 de garra para plato (1).....	104
Ilustración 90: Resultado de análisis por elementos finitos prototipo 2 de garra para plato (2).....	104
Ilustración 91: Prototipo 2 de garra para plato (garras 1 y 2) (2)	105
Ilustración 92: Prototipo 2 de garra para plato (garras 1 y 2) (1)	105
Ilustración 93: Ensayo prototipo 1 de garra para mordaza (4)	108
Ilustración 94: Ensayo prototipo 1 de garra para mordaza (3)	108
Ilustración 95: Ensayo prototipo 1 de garra para mordaza (2)	108
Ilustración 96: Ensayo prototipo 1 de garra para mordaza (1)	108
Ilustración 97: Detalle de la garra tras el ensayo	109
Ilustración 98: Estado tras ensayo de prototipo 1 de garra para mordaza.....	109
Ilustración 99: Ensayo prototipo 2 de garra para mordaza (2)	110
Ilustración 100: Ensayo prototipo 2 de garra para mordaza (1)	110
Ilustración 101: Estado tras ensayo prototipo 2 de garra para mordaza.....	111
Ilustración 102: Detalle de la garra tras ensayo	111

Ilustración 103: Comprobación apriete de pieza en el plato de garras	112
Ilustración 104: Detalle pieza a 400 revoluciones.....	112
Ilustración 105: Detalle del encaje las tres garras impresas	113
Ilustración 106: Detalle del plato a 1500 revoluciones	113
Ilustración 107: Detalle de la operación de refrentado	114
Ilustración 108: Detalle de la operación de cilindrado.....	114
Ilustración 109: Acabado tras refrentado	114
Ilustración 110: Acabado tras cilindrado.....	114
Ilustración 111: Estado de las garras tras mecanizado (2)	114
Ilustración 112: Estado de las garras tras mecanizado (1)	114
Ilustración 113: Detalle de zona de refuerzo de garra para mordaza.....	117
Ilustración 114: Detalle del refuerzo propuesto (azul)	118
Ilustración 115: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Obtenido de: https://ihppediatria.com/blog-ihp/	145

Índice de tablas

Tabla 1: Categorías en función del estado del material. <i>Basada de Guo et al., 2013</i>	33
Tabla 2: Propiedades de los materiales de impresión	64
Tabla 3: Datos fresadora universal empleada	65
Tabla 4: Datos mordaza hidráulica empleada	66
Tabla 5: Datos torno paralelo empleado.....	67
Tabla 6: Datos plato de garras empleado.....	67
Tabla 7: Datos prototipo 1 de garra para mordaza	79
Tabla 8: Datos prototipo 1 de garra para plato de garras.....	80
Tabla 9: Especificaciones prototipo 2 de garra para mordaza	100
Tabla 10: Especificaciones prototipo 2 de garra para plato.....	103
Tabla 11: Especificaciones prototipo 2 de garra para plato (garras 1 y 2).....	105
Tabla 12: Especificaciones de garra para mordaza con refuerzo de fibra de carbono	117
Tabla 13: Especificaciones de garra para plato con refuerzo de fibra de carbono.....	119
Tabla 14: Comparativa entre garras para mordaza.....	120
Tabla 15: Comparativa entre garras para plato	122

Glosario

3D:	Acrónimo de tres dimensiones, refiriéndose a las tres dimensiones del espacio y a diseños realizados en volumen.
3DP:	Derivado de lo anterior, referido a la impresión de volúmenes en las tres dimensiones del espacio.
CAD:	Software de diseño asistido por ordenador (en inglés Computer-Aided Design) para crear y desarrollar modelos en las dos y tres dimensiones del espacio.
Coste unitario:	Valor de producir un determinado bien o servicio.
Fabricación aditiva:	Proceso productivo basado en la deposición de material capa por capa en función de la geometría buscada.
Fresado:	Corte de material mediante el uso de una herramienta rotativa de varios filos a través de distintos avances en las distintas dimensiones del espacio.
Fuerza centrífuga:	También llamada fuerza inercial a la que queda sometida cualquier objeto sometido a un marco de referencia giratorio.
Hidráulico:	Elemento encargado de transmitir potencia mecánica mediante el uso de un líquido poco compresible.
Límite elástico:	Tensión máxima que un material plástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.
Material base:	Material principal empleado en la fabricación de una pieza o prototipo.
Material de refuerzo:	Materiales empleados de distintas propiedades, geometrías cuyas propiedades, en combinación con las del material base, mejoran las prestaciones finales de la pieza.

Material de soporte:	Estructuras que se imprimen junto con el modelo pero que no son parte de la pieza definitiva, sirven para dar apoyo a las partes o geometrías que sobresalen o exceden los 45º como norma general.
Mecanizado:	Proceso de eliminación de material de forma controlada hasta obtener la forma y tamaño buscado.
Módulo de Young:	También llamado módulo de elasticidad longitudinal, parámetro que caracteriza el comportamiento elástico de un material.
Neumático:	Elemento que emplea un compresor de aire.
Polímero:	Compuestos químicos basados en moléculas de cadena o moléculas ramificadas.
Prototipo:	Primer ejemplar que se fabrica de una figura o elemento y que sirve de modelo para fabricar otros iguales.
Punto crítico:	Punto o lugar geométrico donde las cargas aplicadas producen un efecto combinado que da lugar al esfuerzo máximo.
Tensión de rotura:	Máxima tensión que un material puede soportar antes de que su sección transversal se contraiga de manera significativa.
Tolerancia:	Intervalo de valores entre los que debe encontrarse una medida.
Torneado:	Proceso de mecanizado empleado para elaborar piezas cilíndricas en que la herramienta de corte se mueve de forma lineal mientras que la gira la pieza de trabajo.

1. Introducción

La impresión 3D se presenta como uno de los grandes avances dentro de las técnicas de fabricación aplicándose hoy en día en multitud de campos como diseño industrial, arquitectura, ingeniería, construcción, automoción, sector aeroespacial, industrias médicas entre muchos otros.

Como se detallará más adelante, esta tecnología tiene como base la fabricación por adición, donde un objeto tridimensional es creado mediante sucesivas capas de material. Desde su introducción en la industria sus aplicaciones y prestaciones han aumentado de forma exponencial. Por lo general, las impresoras 3D constituyen una técnica más económica, rápida y también de mayor facilidad en comparación con los métodos de fabricación tradicionales.

Entre las muchas ventajas de esta tecnología, la fabricación aditiva permite desarrollar geometrías complejas sin necesidad de procesos adicionales o del empleo de utillajes, permitiendo en ocasiones geometrías que no son posibles con otro proceso de fabricación. Además, permite reducir el plazo de lanzamiento al mercado gracias a plazos de diseño y producción más ajustados y con un tiempo de sustitución de herramientas deterioradas necesarias en el proceso productivo menor, suponiendo un considerable ahorro de costes.

Desde el punto de vista medioambiental cabe mencionar la significativa reducción de residuos que la fabricación aditiva conlleva. Poniendo como ejemplo el sector de la automoción, la fabricación de buena parte de sus componentes se lleva a cabo mediante procesos de mecanizado por CNC. Este proceso crea piezas a partir de un bloque de material, que puede ser bien de acero o aluminio entre otros, eliminando material con distintas herramientas hasta que surge la pieza final. A pesar de ser un proceso de gran utilidad tiene el inconveniente de la cantidad de residuos que se generan durante el proceso, siendo necesario recoger, limpiar y reciclar el material sobrante. La fabricación aditiva como proceso industrial permite eliminar gran parte de estos residuos.

El objetivo de este proyecto es, precisamente, profundizar y analizar el alcance de las técnicas de fabricación aditiva con materiales de alta resistencia, concretamente, en la fabricación de utillajes de sujeción en máquinas-herramientas: garras, mordazas, entre otros. Para ello, se diseñarán las propuestas en CAD para posteriormente seleccionar entre las tecnologías de fabricación aditiva la más adecuada, así como el material idóneo. Finalmente, se realizarán ensayos sobre máquinas.

2. Motivación

La fabricación aditiva se presenta en la actualidad como una técnica en constante desarrollo y actualización. Estas técnicas son de gran utilidad para fabricar piezas de forma rápida y poder probar su funcionalidad, destacando notablemente en el proceso de prototipado rápido. No obstante, las nuevas técnicas de fabricación que emplean tanto metales como materiales plásticos de altas prestaciones capaces de sustituir a técnicas y materiales tradicionales es el principal foco de interés de esta tecnología.

Resulta, por tanto, de gran interés profundizar y realizar una investigación tanto de carácter práctico como teórico en esta ciencia que se encuentra en pleno desarrollo. La fabricación aditiva por medio de materiales plásticos de altas prestaciones es una realidad, que va acompañada de la aparición continua de nuevos materiales, técnicas y maquinaria de impresión.

Uno de los grandes atractivos de este proyecto es que recoge todas las etapas o fases desde la concepción inicial de una pieza, pasando por el análisis de fuerzas, elección de las propiedades y posible rediseño, hasta su fabricación y ensayo final. Iniciarse en este proyecto supone profundizar también en el manejo de programas CAD tan demandados actualmente dentro del perfil profesional de un ingeniero. Por otro lado, además de todo lo relacionado con esta tecnología, la selección idónea de los parámetros de las piezas a imprimir y de los materiales a emplear en base a propiedades buscadas, resulta también de interés la posibilidad de realizar ensayos sobre máquinas y plantear así posibles mejoras.

Estos ensayos de prototipos son necesarios en todo tipo de procesos industriales para llegar hasta la pieza final, permitiendo corroborar lo diseñado a nivel teórico con lo obtenido finalmente en la práctica y, de ser necesario, volver a una etapa inicial de rediseño proponiendo modificaciones hasta satisfacer las especificaciones buscadas en la pieza a obtener.

3. Objetivos del proyecto

Los distintos objetivos que derivan de este proyecto, tanto principales como secundarios, se pueden resumir en los siguientes:

- Mejorar y perfeccionar el diseño de piezas por medio de software de diseño en CAD, que corresponde con un paso inicial y necesario dentro del proceso de la fabricación aditiva.
- Adquirir conocimientos avanzados sobre fabricación aditiva, tanto tecnologías disponibles, distintos materiales y sus prestaciones, así como el software de trabajo previo a la impresión 3D.
- Conocer el proceso real de diseño y fabricación de prototipos, así como fase final de ensayos en máquinas-herramientas. Prestando además especial interés es la fase de rediseño o de propuesta de modificaciones y su rápida implementación dentro de proceso productivo.
- Estudiar las posibilidades reales de sustituir piezas de utillaje en máquinas herramientas fabricadas con materiales tradicionales por materiales plásticos de altas prestaciones y estudiar su posible aplicación en la industria.
- Estudiar la viabilidad no solo a nivel mecánico sino a nivel económico, realizando una comparativa de precio de los distintos prototipos propuesto respecto a los repuestos originales, así como del resto de propiedades o especificaciones de relevancia en estas piezas.
- Concluir si la tecnología basada en técnicas aditivas puede llegar a ser implementada en la fabricación de piezas, ya sean de series cortas, prototipados o repuesto de piezas originales, y analizar en profundidad su ventaja competitiva respecto de las técnicas tradicionales.

4. Estado del arte

En este apartado se profundizará en el concepto de fabricación aditiva, presentado el contexto de esta técnica, los procesos, materiales y técnicas de impresión, así como las ventajas e inconvenientes de la misma. También se desarrollará el concepto de utillajes y sus distintos tipos y características. Por último, se hará hincapié en las máquinas-herramientas a las que está enfocado este proyecto, en concreto al torno convencional y a la fresadora. Este apartado se ha estructurado en los tres siguientes subapartados.

4.1. Fabricación aditiva

4.1.1. *Historia de la fabricación aditiva*

A diferencia de otras técnicas de producción y fabricación convencionales, la fabricación mediante técnicas de impresión 3D o aditiva es una ciencia relativamente joven. Sin embargo, la fabricación aditiva se presenta como una técnica fundamental y de gran relevancia dentro del sector industrial

Este proceso de diseño y creación de piezas puede parecer algo muy moderno para ciertos consumidores, pero su origen se remonta a poco más de 30 años. En el año 1984, Charles Hull inventó la primera tecnología de fabricación aditiva. El sistema consistía en utilizar polímeros sensibles a la luz ultravioleta. Más adelante, en el año 1986, este ingeniero norteamericano patentó dicha tecnología y creó, adicionalmente, la impresora 3D Systems. En medio de todo ese proceso, en el año 1981, Hideo Kodama, siendo parte del personal del Instituto Municipal de Investigación industrial de Nagoya (NMIRI), publicó un primer sistema de prototipado rápido mediante polímeros (Barrenetxea, s. f.).

Desde entonces, los avances logrados en este ámbito son muy numerosos y notables, llegando a la actualidad donde esta técnica ofrece posibilidades de diseño y fabricación que muchas de las técnicas tradicionales no son capaces de ofrecer.

En la siguiente imagen se resume los principales acontecimientos dentro de este campo.

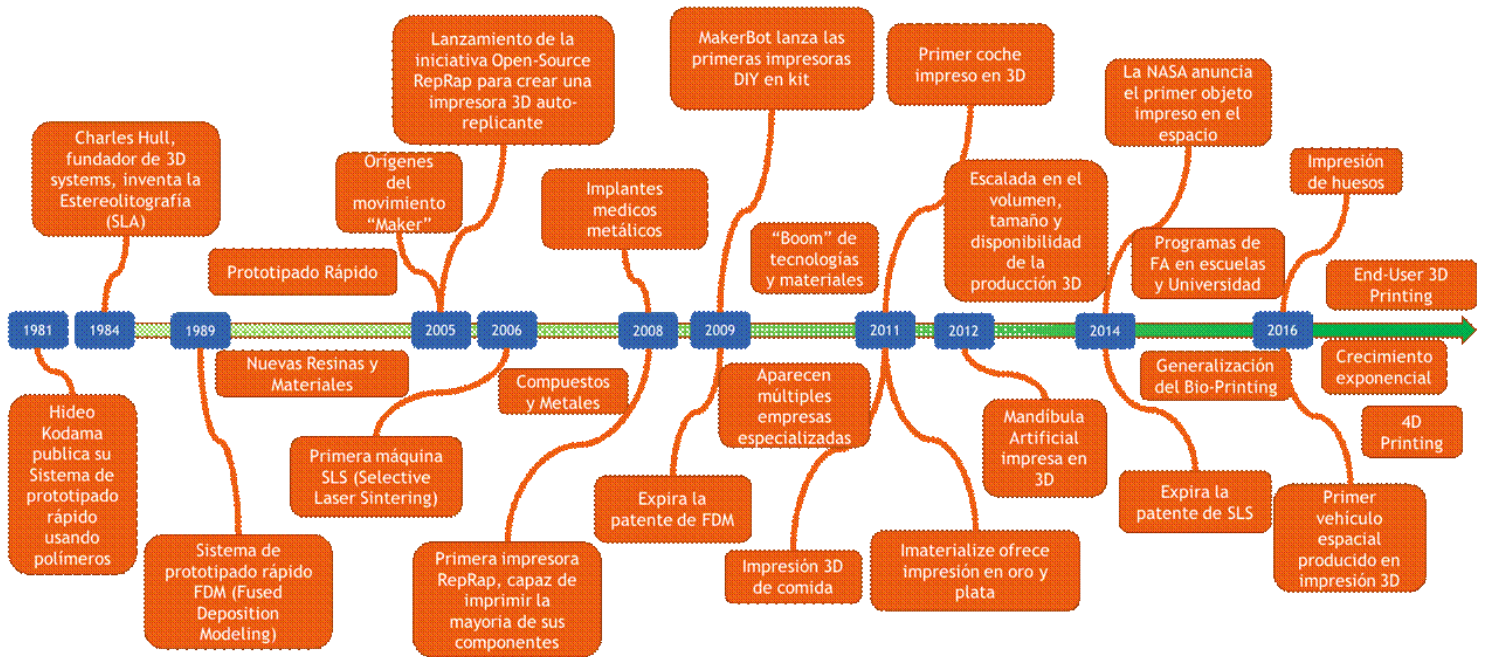


ILUSTRACIÓN 4: EJE CRONOLÓGICO FABRICACIÓN ADITIVA

Por todo lo anterior, podríamos destacar los siguientes puntos de la historia y la cronología de las técnicas de fabricación aditiva desde sus orígenes hasta hoy (Barrenetxea, s. f.):

- La existencia de patentes que limitaba su uso exclusivamente a propietarios ha quedado atrás con el vencimiento de algunas de las principales tecnologías, lo que trajo consigo la aparición de empresas especializadas.
- El desarrollo de múltiples materiales: resinas, compuestos cerámicos, metálicos, entre otros, que permiten, en función del objetivo y pieza buscada, elegir el material más idóneo.
- La popularidad del movimiento "Maker", que le ha dado a la impresión 3D un gran protagonismo en determinados sectores de población, gracias también a tecnologías de impresión de bajo coste.
- Por último, el propio marketing de las empresas líderes del sector, tanto fabricantes de máquinas de impresión 3D como de intermediarios en la producción, que ha desarrollado el uso industrial y el personal.

4.1.2. Ventajas e inconvenientes de la fabricación aditiva

Como se ha mencionado con anterioridad, la fabricación aditiva supone un avance revolucionario en comparación con los procesos de fabricación tradicionales. Sin embargo, no todo son ventajas. A continuación, se exponen las principales ventajas e inconvenientes de esta técnica.

Ventajas de la fabricación aditiva:

- Esta técnica tiene entre sus principales posibilidades crear piezas de elevada complejidad sin el factor de sobre coste. Permite crear la pieza en cuestión directamente desde cualquier software CAD, lo cual permite una notable simplificación del proceso al no tener que depender de utillajes, dividir el proceso en distintas fases o bien depender de más de una máquina para completar el proceso con, además, el correspondiente personal cualificado para el manejo de esta. (Hernández-Castellano et al., 2018).
- A todo lo anterior tenemos que añadir el factor de que permite obtener piezas que serían imposibles de obtener siguiendo cualquiera de los métodos tradicionales.
- La fabricación aditiva, como ya se ha mencionado con anterioridad, destaca por su enorme libertad en el diseño. Esta tecnología permite obtener geometrías más orgánicas y ergonómicas. Además, permite obtener piezas de gran personalización o fácilmente escalables gracias a su diseño paramétrico.

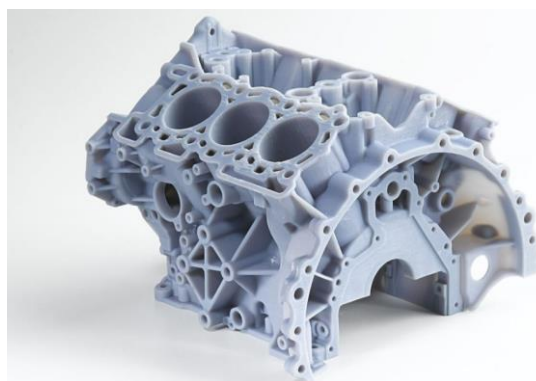


ILUSTRACIÓN 5: PIEZA POR FABRICACIÓN ADITIVA

- Es un proceso de fabricación rápido. Aunque la impresión de una pieza en particular pueda conllevar varias horas, el ahorro de tiempo se hace especialmente notable cuando analizamos el proceso en su conjunto. Permite obtener prototipos de forma rápida además de poder introducir cambios o modificaciones de forma sencilla, ajustando el modelo 3D hasta llegar al producto final.

- Un aspecto de gran importancia es que permite la rentabilidad cuando hablamos de la producción de series cortas y sin economías de escala. Esto se debe a que el coste por pieza, a grandes rasgos, suele ser independiente del número de piezas a fabricar, aunque este aspecto puede llegar a ser una desventaja (Conde Rubio, 2020a).

Si mostramos de forma gráfica los costes de producción unitarios por pieza en función del volumen de producción para procesos que apliquen la tecnología 3D con aquellos considerados como tradicionales obtenemos un gráfico como el siguiente:



ILUSTRACIÓN 6: COMPARATIVA FABRICACIÓN TRADICIONAL Y ADITIVA

- Como último aspecto a destacar, hay que sumarle una producción mínima de desechos. Por un lado, en el proceso solo se emplea el material necesario para la producción de la pieza, y por otro, en muchas ocasiones los materiales obtenidos en el post-procesado son reutilizables.

Desventajas de la fabricación aditiva:

- Los métodos de fabricación por impresión 3D no permiten la economía de escala, es decir, el precio total es más elevado cuando hablamos de producción de grandes series de piezas en comparación con métodos tradicionales. Por todo ello, hablamos de baja capacidad productiva (Hernández-Castellano et al., 2018).
- La velocidad tiene una relación directa con la calidad. En general, los ratios de producción son bajos, ya que mientras procesos como el moldeo por inyección permite obtener piezas en segundos, la fabricación aditiva suele ser un proceso asociado a horas. En cuanto a la calidad, al ser un proceso de producción mediante la superposición de capas, si se persigue un acabado superficial de mayor calidad esto requerirá de capas de mayor espesor, o lo que es lo mismo, de un mayor número de capas y, por todo lo anterior, de un mayor tiempo para generar la pieza (Hernández-Castellano et al., 2018).
- Además, la precisión también tiene relación con el factor precio, ya que cuando se persigue acabados de gran calidad o un alto nivel de resolución o nivel de detalle el precio tiende a aumentar de manera proporcional.



ILUSTRACIÓN 7: NIVEL DE DETALLE EN FUNCIÓN DE LA IMPRESORA Y MATERIAL

- Un aspecto negativo relevante tiene relación con la vulneración de los derechos de autor y con el uso malintencionado de esta tecnología. Al basarse en un modelo creado mediante un software de impresión 3D, gracias a internet, es relativamente fácil obtener modelos sin la autorización del autor original.
- Limitación en el tamaño de la pieza, lo cual está muy limitado con las dimensiones de la propia impresora. Las dimensiones habituales de una impresora de bajo coste son de 30x30x30 cm, de buscar dimensiones mayores se requerirá de impresoras también más grandes y de precios elevados (Conde Rubio, 2020).

4.1.3. Proceso de fabricación aditiva

La fabricación o impresión de piezas por técnicas de aditiva está compuesta por varios procesos o fases. Aunque la variedad de materiales, técnicas y piezas a obtener que ofrece esta tecnología es muy amplia, cualquier proceso de fabricación aditiva se puede sintetizar en las siguientes etapas:

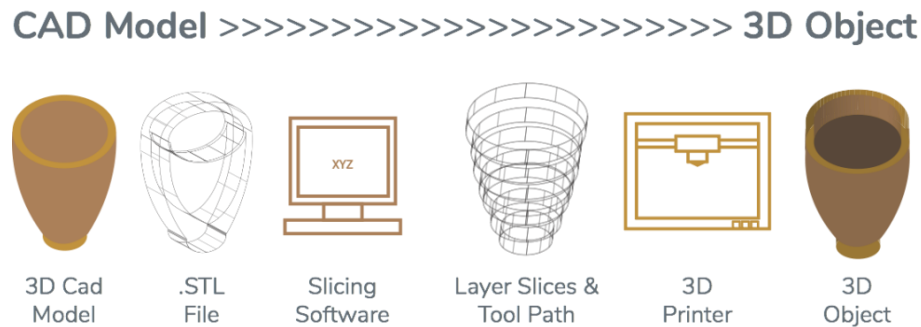


ILUSTRACIÓN 8: FASES PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA

A. Generación del modelo 3D.

El primer paso es crear un modelo digitalizado del elemento que buscamos imprimir. Así, partimos de un modelo 3D o modelo en CAD que cumpla con los requerimientos de la pieza a obtener, teniendo en cuenta las condiciones y reglas de diseño correspondientes con la tecnología que se pretende usar. Es decir, el modelo no será el mismo si la técnica a emplear es por FMD o bien por sinterizado láser.

B. Modelo y archivo STL.

A la hora de imprimir en 3D existen distintos tipos de ficheros con los que podemos trabajar. Aunque los archivos STL y OBJ son, por lo general, los más utilizados, existen otros tipos de ficheros con distintas características. En cuanto a los ficheros mencionados, cabe destacar algunas de sus características (addvance3d, 2021):

- Algunas de las principales características de un archivo STL es que codifica la superficie del objeto 3D en una malla triangular y que aparte del tamaño y la forma del modelo, una STL no contiene ninguna otra información.
- En cuanto al fichero OBJ, este es mucho más complejo. la superficie del modelo OBJ puede ser codificada usando varios polígonos. El resultado es una malla más lisa que simula mejor la superficie original. Aun siendo más flexible, su tamaño y complejidad han limitado su popularidad en el campo de la impresión en 3D.

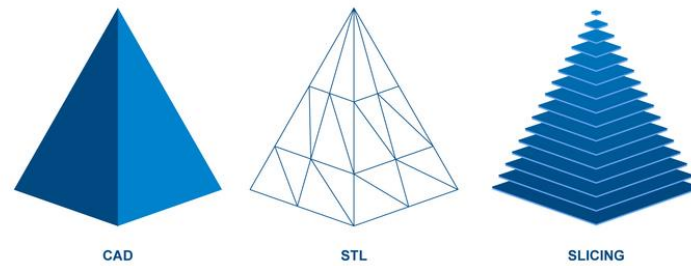


ILUSTRACIÓN 9: ARCHIVO STL

C. Software de impresión 3D.

Como se ha mencionado con anterioridad, la impresión 3D es una técnica relativamente nueva pero que ha experimentado un gran desarrollo en cuanto a sus posibilidades. En este sentido, nos encontramos en un contexto con una amplia variedad de software de impresión 3D tanto de carácter comercial (Simplify, Magics...) como de código abierto (Slic3r, CURA...).

Será necesario definir la orientación de la máquina o de la construcción y determinar si habrá estructuras de soporte. Dichas estructuras de soporte pueden ser necesarias cuando se trabaja con deposición de capas en orientaciones cercanas a la horizontal. Para continuar, se detalla la secuencia de fabricación. Estas acciones se realizan, igualmente, con un software específico que, muchas veces, viene determinado por cada impresora y tecnología.

D. Slicing.

La herramienta Slicer permite calcular las intersecciones de nuestro objeto 3D de los planos a la altura de la capa de impresión, determinando las secciones obtenidas. En otras palabras, divide el objeto en "rebanadas". Para cada una de estas rebanadas calcula los movimientos que debe hacer para completar cada área. Ya se hizo hincapié en la relación entre el número de capas y la calidad del acabado. Cuánto mayor es el número de capas en el que dividimos nuestra pieza, mayor calidad podremos esperar, aunque considerando también otros factores como material, técnica u orientación. Dicho aumento del número de capas supone una mayor complejidad de proceso y un tiempo de producción también mayor (*La fabricación aditiva paso a paso - Mizar Additive, 2021*).

E. Creación de capas.

Tras las fases previas nos encontramos en la fase de fabricación propiamente dicha. Así, nuestra impresora 3D realizará y ejecutará los comandos necesarios para construir el rebanado definido en la fase de Slicing mediante la superposición de capas.

Los pasos para la creación de cada una de las capas estarán condicionados por el tipo de tecnología seleccionada.

A la hora de realizar la impresión se deben tener en cuenta numerosos factores. Entre ellos cabe destacar el acabado superficial (que depende de la geometría de la pieza y la cantidad de soportes necesarios), la resolución de la pieza o nivel de detalle y la resistencia de la pieza a obtener.

F. Post-procesado.

Al igual que la fase anterior, el post-procesado será distinto según la tecnología empleada. En numerosas ocasiones, se requiere aplicar un postproceso como pueda ser la eliminación de estructuras de soporte o tratamiento térmico para la eliminación de tensiones residuales obteniendo de forma definitiva la pieza buscada.



ILUSTRACIÓN 10: FASE DE POST-PROCESADO

Podríamos incluir también una fase adicional centrada en la inspección y verificación. En ella tiene gran importancia la verificación dimensional, pudiéndose realizar de forma manual o mediante procesos más complejos como el uso de escáneres 3D. Esta fase puede llegar a ser una fase esencial, ya que permite comprobar si los valores especificados en el diseño, relativos a tolerancias, geometrías o dimensiones críticas, se corresponden con lo obtenido en la fase final del desarrollo. Así, permite identificar posibles defectos en la pieza, así como su posible solución (addvance3d, 2021).

4.1.4. Variables de diseño

A. Materiales.

Una variable fundamental dentro del proceso de impresión 3D es el material que emplear. A la hora de su elección se deben tener en cuenta distintas consideraciones entre las que se incluye la compatibilidad de la materia prima con el proceso de fabricación elegido y su correcto rendimiento, la capacidad de post-procesado para mejorar acabado o geometría, las propiedades del material tanto mecánicas como térmicas o químicas, entre otras consideraciones (Bourell et al., 2017).

Aunque inicialmente la impresión 3D se centró en el desarrollo de prototipos hechos en plásticos, se pueden encontrar impresoras y técnicas de fabricación que permiten utilizar materiales metálicos, cerámicos y poliméricos.

- Los materiales metálicos y sus aleaciones en la fabricación aditiva tienen un enfoque más centrado en sectores como el aeroespacial, ya que permite, con respecto a los procesos tradicionales, un mayor ahorro de tiempo, coste y dificultad manteniendo las exigentes propiedades en las piezas a fabricar (Calles Valero, 2019).
- En cuanto a la impresión con materiales cerámicos es un mercado con multitud de aplicaciones. Su ámbito se extiende tanto a sectores como el aeroespacial o automotriz, pero destaca especialmente en sectores como la medicina y odontología, con su aplicación para andamios de huesos y dientes, y también en el electrónico (Calles Valero, 2019).
- Los materiales poliméricos, según González-Henríquez et al. (2019), destacan por su versatilidad y adaptabilidad sintética, además de las propiedades que se pueden llegar a obtener con estos materiales. Los polímeros se presentan en distintas formas, en forma de resinas, polvos, monómeros reactivos o filamentos termoplásticos. En su aplicación cabe destacar el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).



ILUSTRACIÓN 11: MATERIALES DE IMPRESIÓN

B. Estado base del material.

Otra de las variables que debemos considerar a la hora de realizar un proceso productivo por aditiva es el estado base del material. Al igual que el tipo de material, el estado base de este influye en la clasificación y categoría de los procesos de fabricación. Pudiendo ser líquido curado, sólidos en hilos, láminas u otros o bien en polvo o unión-compactado (Calles Valero, 2019).

En la siguiente tabla se define la categoría en función del estado base del material:

TABLA 1: CATEGORÍAS EN FUNCIÓN DEL ESTADO BASE DEL MATERIAL

<i>Estado inicial del material</i>	<i>Categoría de proceso de fabricación</i>
Líquido	SLA
Filamento	FDM, FFF
Polvo	SLM, SLS, 3DP
Láminas sólidas	LOM

C. Principio empleado en la deposición del material.

Por último, en cuanto al principio que podemos utilizar en la deposición de material podemos distinguir dos grandes grupos: la deposición por haz o luz de alta energía y la deposición por inyección/extrusión.

En cuanto a la deposición por haz de alta energía el proceso es el siguiente: el material se deposita alimentado por una boquilla en forma de polvo o alambre, por otro lado, a medida que se deposita una fuente de calor va fundiendo simultáneamente el material. Dicha fuente de calor se genera usando un láser, haz de electrones o arco de plasma. Así, el proceso se realiza continuamente hasta que las distintas capas se solidifican y se obtiene la pieza en cuestión (Calles Valero, 2019).

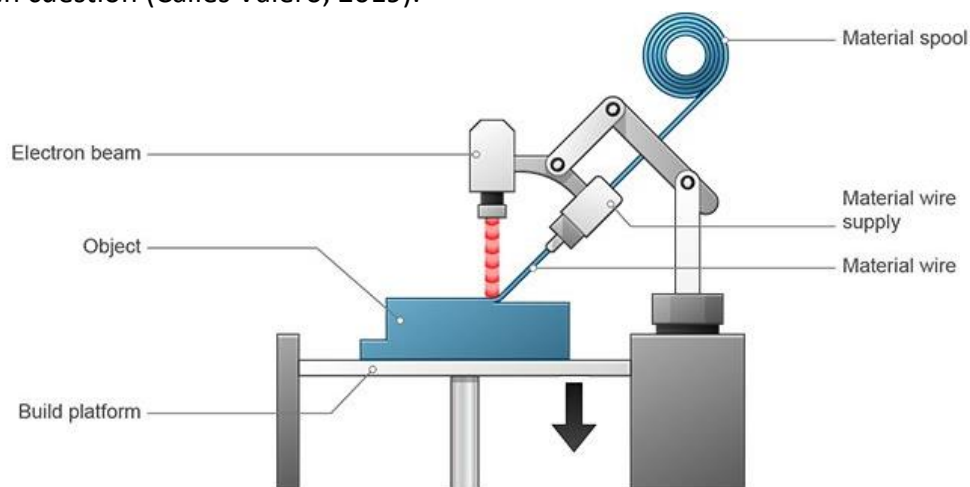


ILUSTRACIÓN 12: MODELADO POR HAZ DE ALTA ENERGÍA

La deposición por inyección o extrusión es considerada como uno de los métodos actuales de mayor sencillez. Consta de tres elementos principales, una placa/cama de impresión, una bobina con el filamento y un cabezal de extrusión. Así, el cabezal funde el material y lo va depositando formando cada una de las sucesivas capas sobre la cama de impresión (Sánchez, 2017).

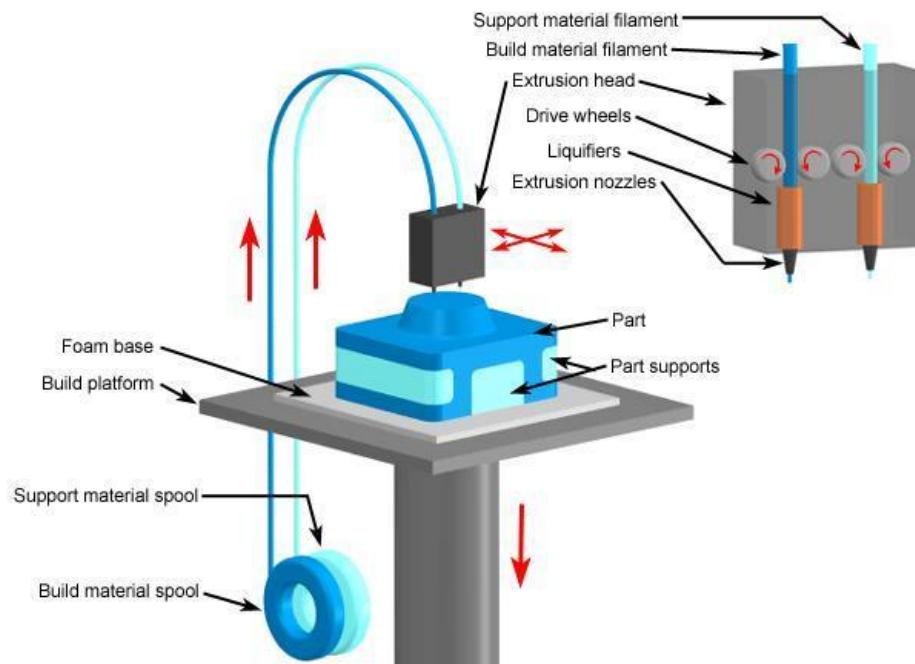


ILUSTRACIÓN 13: MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

D. Técnicas de impresión

Los continuos avances dentro del campo de la impresión 3D han dado lugar a multitud de técnicas de fabricación, algunas de ellas muy extendidas en la industria hoy en día. Sin duda, se trata de un campo en constante avance y desarrollo, lo cual dará lugar a técnicas cada vez más revolucionarias que irán dejando atrás a los procesos tradicionales. Entre las técnicas de impresión cabe destacar las siguientes.

- Modelado por deposición fundida (FDM):

Este tipo de modelado es uno de los más conocidos y extendidos, además, al ser una tecnología tan accesible y popular, permite obtener piezas a un precio más económico. El funcionamiento es el siguiente: el material es suministrado en forma de hilo a partir de una bobina. Mediante una resistencia eléctrica se consiguen temperaturas entre los 200 y 230°C, lo cual permite fundir el hilo. Así, una vez fundido el material, el material sale a través de una boquilla cuyo diámetro puede ser ajustado en función de la precisión buscada (Campodarve Montero, 2020).

Como bien hemos descrito en apartados anteriores, la secuencia de fabricación se realiza mediante la superposición de capas de material hasta obtener el objeto final. Así, el cabezal (compuesto por el extrusor, fusor y la boquilla) se desplaza de manera horizontal hasta completar la capa, y en el eje vertical para crear la capa siguiente.

Cuando trabajamos con piezas con cierto ángulo suele ser necesario el uso de soporte. Estos soportes se crean de forma conjunta con las sucesivas capas antes descritas.

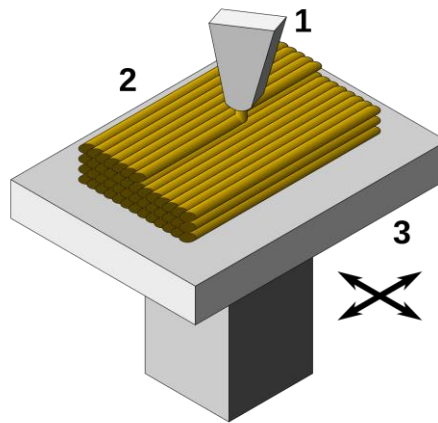


ILUSTRACIÓN 14: MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Entre sus ventajas ya hemos mencionado la posibilidad de generar prototipos de bajo coste, además suele ser un proceso relativamente rápido, aunque no tanto como algunos procesos de fabricación tradicionales. Sin embargo, presenta limitaciones en lo relativo a la precisión y acabado superficial. El acabado no es completamente liso y, especialmente en el caso de necesitar soportes, es necesario una etapa de post-procesado. Además, las propiedades mecánicas suelen ser bastante limitadas, aunque depende del material empleado (Campodarve Montero, 2020).

- Estereolitografía (SLA):

Otro proceso de fabricación a destacar es el de estereolitografía. Este método permite obtener todo tipo de geometrías y de tamaños sin perder precisión, aunque se trata de un proceso más complejo que el caso anterior.

Como material de impresión se emplea una resina líquida fotosensible. La base de este proceso está en la fotopolimerización, donde el material, tras recibir luz UV o visible, forma un polímero infusible, termoestable e insoluble. Se consigue así grandes propiedades térmicas y mecánicas (Campodarve Montero, 2020).

En este proceso, el rayo láser empleado barre la superficie de la resina líquida, siguiendo las especificaciones del modelo 3D aportado a la impresora. De esta manera, una vez solidifica la primera capa, la plataforma desciende un nivel (igual al grosor de una capa) y mediante un rodillo se realiza un barrido de forma que la capa queda cubierta de la resina líquida y se repite el ciclo. El número de ciclos depende así del grosor de cada capa y del volumen de la pieza a fabricar (Mendialdua Landecho, 2020).

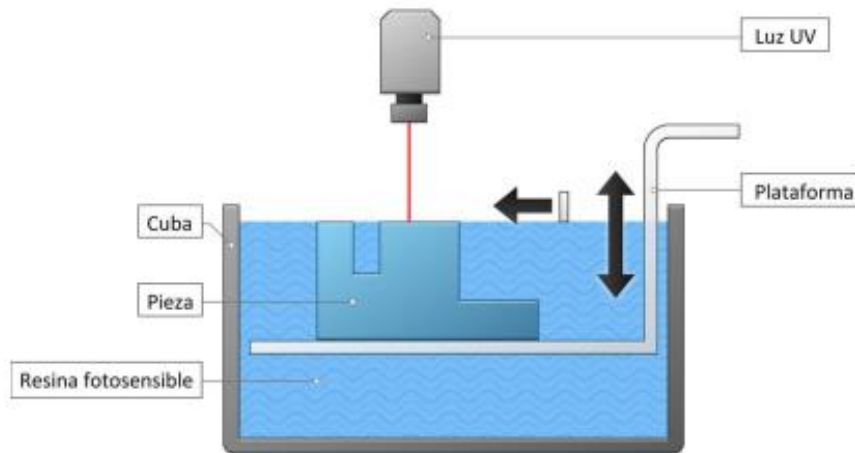


ILUSTRACIÓN 15: MODELADO POR ESTEREOLITOGRAFÍA

La variedad existente de resinas permite obtener piezas de diferentes propiedades: flexibles, rígidas o resistentes a altas temperaturas entre otras. En cuanto al acabado, se consigue una alta precisión y superficies lisas. En principal inconveniente es su precio, ya que suele constituir un proceso caro, un precio entre los 50 y 100 euros por litro de resina. (Campodarve Montero, 2020).

- Sinterizado selectivo por láser (SLS):

El funcionamiento de este proceso tiene su base en material en forma de polvo que, al aplicar temperatura mediante un láser, funde para después solidificar. Este método es una de las tecnologías de fabricación que más se ha desarrollado a nivel industrial.

En cuanto al funcionamiento de la impresora, es un proceso similar al caso anterior, pero empleando material en forma de polvo en lugar de resina líquida. En este caso, el láser avanza y sinteriza de forma selectiva aquellos granos de polvos necesarios para lograr la capa de la pieza buscada. Esta máquina cuenta con un depósito de polvo que permite, tras esta primera fase y una vez baja la plataforma, realizar un barrido para tener polvo sin fundir en la capa superior. De nuevo, se realiza este proceso tantas veces como capas sean necesarias para completar el volumen de la pieza a obtener (Mendialdua Landecho, 2020).

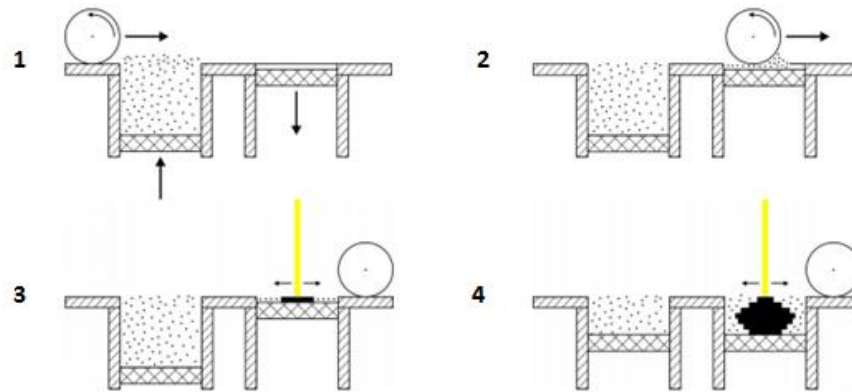


ILUSTRACIÓN 16: MODELADO POR SLS

En lo relativo al rendimiento mecánico y acabados y precisión, esta tecnología permite obtener buenos resultados. Su punto fuerte que destacar es que, a diferencia de otros procesos, no requiere de soportes cuando la geometría de la pieza implica zonas con cierto ángulo, ya que el propio polvo, al ser un material sólido, actúa como soporte.

Otro aspecto que destacar es el reciclado del material en forma de polvo, con unas tasas de desecho relativamente bajas en cada impresión. Si hubiera que destacar alguna desventaja de este proceso sería su ritmo de producción, siendo menor que el de otros procedimientos antes descritos (Campodarve Montero, 2020).

- Multi jet fusion (MJF):

Aunque tanto esta tecnología como la de sinterización selectiva por láser pertenecen al conjunto de técnicas por fusión de lecho de polvo, la diferencia radica en la fuente de calor utilizada para fundir el polvo. En este proceso, la fuente de energía empleada es luz infrarroja.

En cuanto al proceso seguido, primero se extiende una capa de polvo sobre la plataforma, la cual se calienta hasta una temperatura similar a la del proceso de sinterización. Además, un cabezal dispensa un agente de fusión sobre el material, el cual favorece la absorción de la luz infrarroja empleada. Posteriormente, haciendo uso, de la luz infrarroja, se funde únicamente las áreas de interés, de forma que posteriormente solidifica. Posteriormente la plataforma desciende y se repite el proceso descrito (Campodarve Montero, 2020).

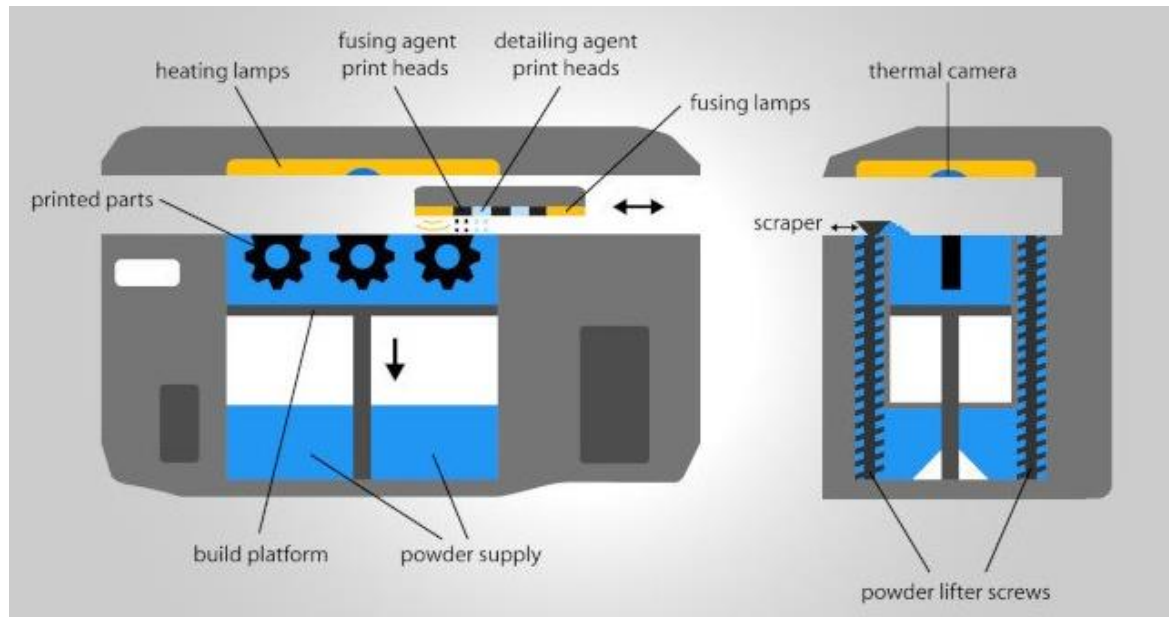


ILUSTRACIÓN 17: MODELADO POR MJF

- Curado con tierra sólida (SGC):

Este proceso es similar al de estereolitografía antes descrito, pero utilizando la radiación ultravioleta como fuente de energía. Empleando una máscara, la resina fotosensible es solidificada por el uso de esta radiación, solidificando a la vez todos los puntos de la respectiva capa, con un tiempo de solidificación de unos 3 segundos. Así, será necesario realizar un diseño de la pieza por capas, con su correspondiente máscara para cada una de ellas (Mendialdua Landecho, 2020).

4.2. Utillajes

Dentro de un proceso de mecanizado la sujeción de piezas es una de las consideraciones más relevantes para su fabricación. Debido a la gran variedad de piezas y especialmente para aquellas que presentan geometrías complejas son necesarios los distintos utillajes de sujeción. Estos elementos facilitan tanto el montaje como el mecanizado y verificación de la pieza.

4.2.1. Generalidades de los utillajes.

Cuando hablamos de un proceso de mecanizado suele ir asociado a él el concepto de utillaje. Un utillaje es un elemento más del proceso productivo que tiene como finalidad garantizar el aseguramiento de la pieza durante su fabricación. Su forma, tamaño y configuración dependerán de factores como la posición de la herramienta de corte o el espacio de trabajo del cual se dispone en la bancada, de forma que se garantice que el sistema de sujeción queda ubicado contra las fuerzas ejercidas por la herramienta durante el proceso productivo. También entran en juego otros factores, como vibraciones o bien la necesidad de garantizar automatización en tiempos y economía durante el montaje y desmontaje de la pieza (Cely, 2018).

Aunque el empleo de estos elementos permite obtener piezas precisas, idénticas e intercambiables, el diseño de estas herramientas es un proceso costoso y generalmente complicado, por lo que su uso suele quedar asociado a procesos productivos con un alto volumen de piezas (Conde Rubio, 2020).



ILUSTRACIÓN 18: EJEMPLO DE UTILLAJES; PLATO Y LUNETAS

Este es precisamente uno de los enfoques principales de este proyecto, estudiar, diseñar y fabricar un elemento de sujeción para procesos de mecanizado por máquinas-herramientas. Así, el empleo de tecnologías de fabricación aditiva busca encontrar un proceso de menor complejidad y coste, especialmente para una primera fase de prototipado, pero garantizando las exigencias mecánicas o térmicas que cabe esperar de estos elementos.

Antes de realizar el diseño de cualquier tipo de utillaje es necesario conocer el tipo de mecanizado que vamos a emplear, el estado de la pieza antes de dicho mecanizado y, en lo relativo a la calidad esperada, las tolerancias exigidas y superficies donde se va a realizar el proceso.

Con todo lo anterior, cabe esperar las siguientes características de un utillaje de sujeción (Conde Rubio, 2020):

- Fácil colocación de la pieza.
- Sujeción rápida y eficaz, sin deformar las superficies o caras ya trabajadas.
- Evitar cualquier tipo de desplazamiento o deformación de la pieza durante el proceso de mecanizado.
- Desmontaje fácil y rápido.
- Facilidad en su uso y manipulación.
- Seguridad en su uso, evitando cualquier elemento que pueda suponer un riesgo para quien lo usa.
- Construcción del montaje sencilla.

4.2.2. Clasificación de los utillajes.

Como se ha mencionado anteriormente, existe una gran variedad de utillajes que admiten varias clasificaciones. Una primera clasificación podría ser la siguiente:

- *Utillajes generales de fijación:*

Estos son los utillajes corrientes que podemos encontrar en el mercado. Se encuentran como accesorios de máquinas herramientas (mandriles, mordazas, platos redondos...) y también como utillajes normalizados, los cuales se adaptan a la pieza con el órgano adecuado (casquillos portaútiles, puntos para centrar...).

- *Utillajes especiales:*

En este grupo se encuentran aquellos elementos que solo están diseñados para una determinada pieza y para cada operación del proceso productivo, en otras palabras, aquellos que deben ser diseñados y contruidos para cada caso en particular.

Además, también se puede hacer una clasificación en función del principio empleado para realizar la sujeción. Así podemos encontrar utillajes de los siguientes tipos:

A. *Mecánicos:*

Este tipo de sujeción es más habitual y se puede realizar mediante distintos mecanismos. Así podemos encontrar sistemas de presión mediante tornillos (bridas, pernos, casquillos...), mediante palancas o mediante excéntricas (bridas de sujeción central o por los extremos, tirantes, balancines...).



ILUSTRACIÓN 19: EJEMPLO DE UTILLAJE MECÁNICO

B. Neumáticos:

El fundamento de estos utillajes se encuentra en el uso de un sistema de aire comprimido. Se trata de una técnica moderna donde el aire comprimido debe empujar un émbolo deslizante en la cámara sobre un cilindro para garantizar la sujeción. Dentro de sus elementos constructivos incluimos los cilindros, émbolos, guarniciones, distribuidores y las bridas (Conde Rubio, 2020).



ILUSTRACIÓN 20: EJEMPLOS DE UTILAJES NEUMÁTICOS

C. Hidráulicos:

Este tipo también tiene un uso muy extendido en la industria. Dentro de este tipo podemos destacar una serie de ventajas frente a los utillajes de tipo neumáticos, entre ellas la incompresibilidad (el fluido transmite de forma inmediata la presión a todos los elementos), mayor presión y menor volumen de los cilindros (ya que al ejercer una mayor presión por volumen se puede conseguir la misma presión con cilindros de menor diámetro) (Fernández Jaramillo, 2021).

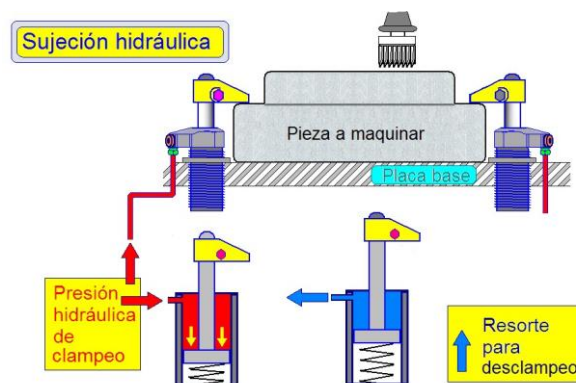


ILUSTRACIÓN 21: EJEMPLO DE UTILAJE HIDRÁULICO

D. Magnéticos:

Los utillajes de tipo magnético son de gran utilidad en la manipulación de piezas de origen ferroso tanto planos como cilíndricos. Estos tienen distintas formas de trabajo que permiten fijar la estructura permitiendo trabajar de forma cómoda con ellas. Son muy utilizados en trabajos de soldadura, en montajes industriales y en talleres de mecanizado.



ILUSTRACIÓN 22: EJEMPLO DE UTILLAJE MAGNÉTICO

Por último, tal y como se desarrolla en el siguiente subapartado, podemos hacer una clasificación de los utillajes según la máquina-herramienta a la que está destinado su uso, concretamente, entre el torno convencional y la fresadora.

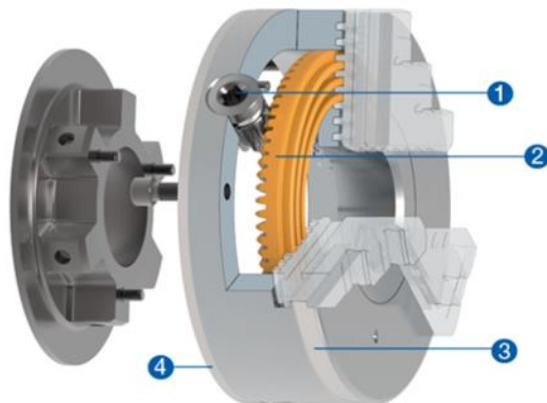
4.2.3. Principales tipos de utillajes.

Los accesorios más empleados en las máquinas-herramientas, concretamente en torno convencional y fresadora, son los siguientes:

A. Torno convencional:

- Plato de garras: Este es uno de los más utilizado, permite el amarre de elementos cilíndricos tanto interior como exterior. Así, podemos encontrar platos de 3 y 4 garras, platos expansibles y de garras retractiles con punto y platos indexables.

Las garras del plato se cierran o abren simultáneamente por medio de una llave de ajuste, aunque también existen modelos con mordazas independientes. La distancia entre el plato y la pieza debe de ser lo menor posible, haciendo uso de un contrapunto siempre que sea posible. Una pieza demasiado larga pandeará y será necesitará una luneta (Fernández Jaramillo, 2021).



1: Accionamiento dispuesto radialmente para la introducción del par definida mediante llave dinamométrica.

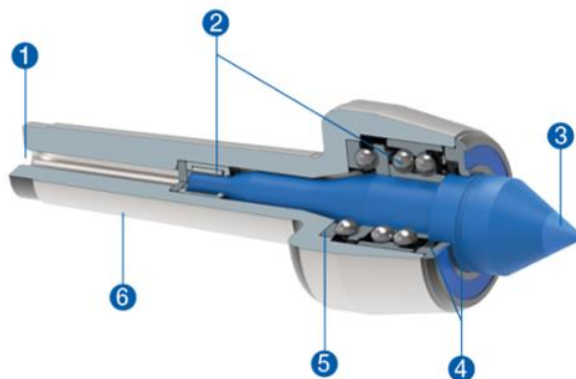
2: Corona espiral para la transmisión precisa de la fuerza y la regulación rápida de las mordazas en todo el rango de sujeción.

3: Protección del husillo de máquina del lubricante refrigerante.

4: Borde de control para el ajuste rápido y sencillo en la máquina.

ILUSTRACIÓN 23: EJEMPLO PLATO DE GARRAS

- Punto rotativo: También de gran uso en la fabricación por arranque de material. Podemos encontrar configuraciones de sujeción entre dos puntos o entre plato y punto.



1: Perforación en el mango para facilitar el cambio de la punta rotatoria.

2: Cojinetes y rodamientos de agujas.

3: Punta rotatoria con inserto de metal duro.

4: Junta labial y ranura adicional.

5: Superficie de apoyo maciza en el rodamiento axial.

6: Mango rectificado de forma calibrada.

ILUSTRACIÓN 24: EJEMPLO DE PUNTO ROTATIVO

- Arrastrador frontal: Está compuesto por una cabeza de arrastre donde se alojan el punto de centrado y las uñetas de arrastre.

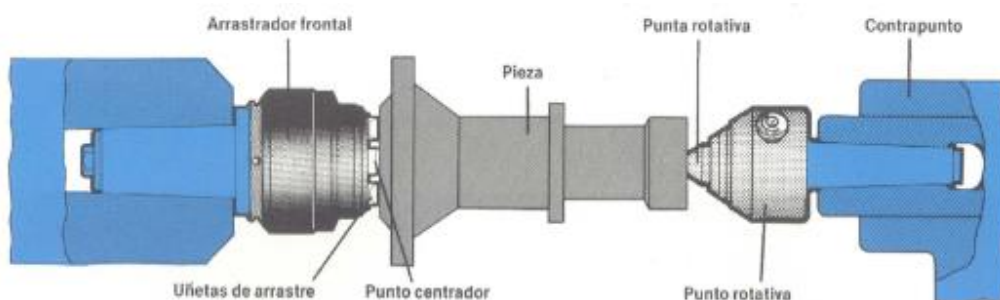
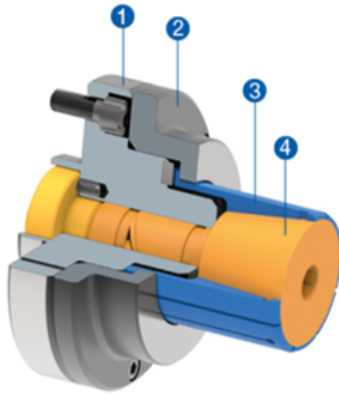


ILUSTRACIÓN 25: EJEMPLO DE ARRASTRADOR FRONTAL

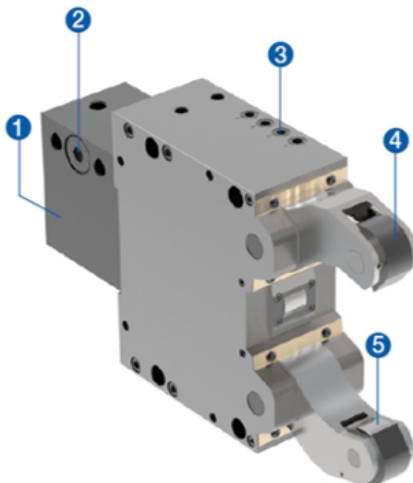
- Mandril expansible: Entre sus ventajas destaca que permite sujetar la pieza de manera muy rápida garantizando una precisión muy elevada.



- 1: Peso y altura constructiva reducidos.
- 2: Tope de pieza para una alta precisión de planeidad.
- 3: Casquillo pinza de sujeción ranurado en dos lados para una alta precisión de concentricidad.
- 4: Expansión del casquillo pinza de sujeción a través del cono de sujeción.

ILUSTRACIÓN 26: EJEMPLO DE MANDRIL EXPANSIBLE

- Luneta: La luneta está ideada para proporcionar una sujeción adicional para elementos de longitud elevada, evitando así que el propio peso de la pieza pueda comprometer la sujeción.

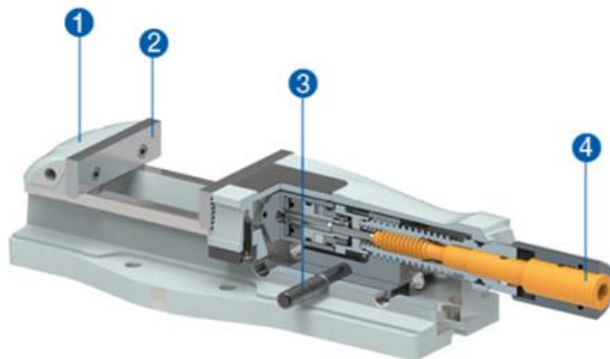


- 1: Posibilidad de accionamiento hidráulico o neumático.
- 2: Válvula de seguridad para garantizar la seguridad operativa.
- 3: Posibilidad de lubricación centralizada o lubricación manual según la aplicación.
- 4: Disponible con y sin protección contra virutas.
- 5: Según la aplicación se pueden suministrar rodillos abombados o cilíndricos

ILUSTRACIÓN 27: EJEMPLO DE LUNETAS

B. Fresadora:

- Mordaza: Se trata probablemente del elemento más habitual y extendido dentro de la industria y de cualquier proceso de fabricación por arranque de material.



1: Descarga óptima del refrigerante y de las virutas.

2: Amplio variedad de garras.

3: Ajuste sencillo y rápido del rango de sujeción.

4: Preajuste escalonado de la fuerza de sujeción.

ILUSTRACIÓN 28: EJEMPLO DE MORDAZA

- Divisor: Es uno de los elementos más importantes de la fresadora. Tiene como objetivo hacer la división de la trayectoria circular del trabajo y sujetar el material que se trabaja.



ILUSTRACIÓN 29: EJEMPLO DE DIVISOR

- Mesa circular: La mesa circular horizontal ayuda cuando trabajamos con la fresadora a realizar divisiones, curvas o ángulos en función de las exigencias de la pieza a fabricar.



ILUSTRACIÓN 30: EJEMPLO DE MESA CIRCULAR

- Sujeción modular: Mediante el uso de pilares de sujeción y una estructura modular se consigue que las piezas queden sujetas sin necesidad de equipo adicional.

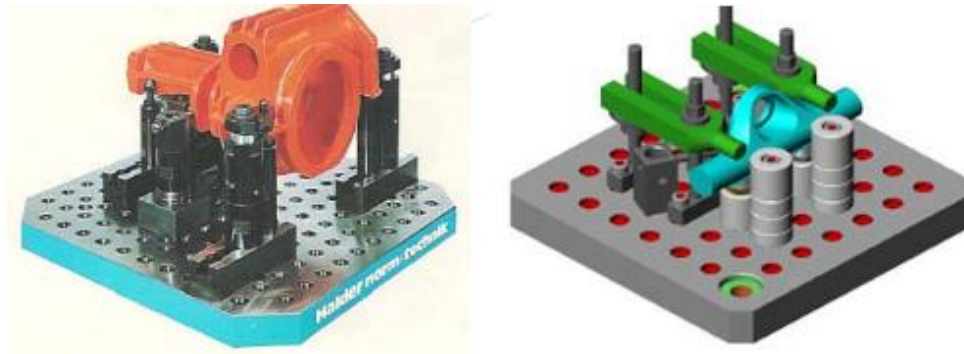


ILUSTRACIÓN 31: EJEMPLO DE SUJECIÓN MODULAR

- Plato magnético: La pieza queda sujeta mediante un campo magnético, lo que libera todo el exterior de la pieza. Sirve solo para piezas férricas.

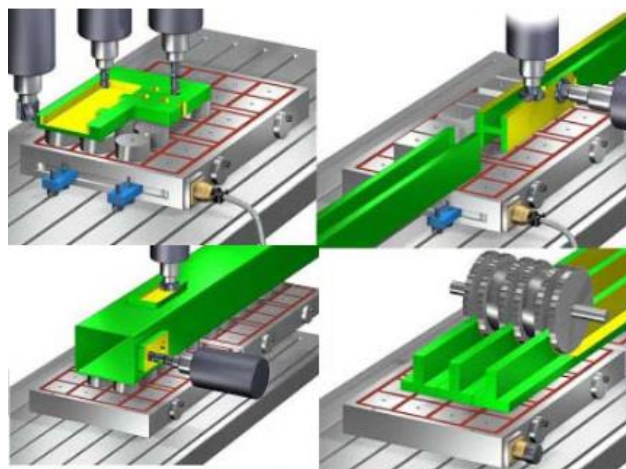


ILUSTRACIÓN 32: EJEMPLO DE PLATO MAGNÉTICO

- Sujeción por vacío: Al igual que el caso anterior, este tipo de sujeción permite garantizar una sujeción de calidad de la pieza mientras que todo el exterior de la pieza queda libre para su mecanizado.



ILUSTRACIÓN 33: EJEMPLO DE SUJECIÓN POR VACÍO

4.3. Máquinas herramientas

Este proyecto está enfocado a la fabricación mediante técnicas de impresión 3D de utillajes empleados en máquinas-herramientas. En este apartado se profundiza precisamente sobre dichas máquinas, especialmente en el torno convencional y fresadora. Así, se presentan sus principales características, partes y operaciones además del resto de máquinas empleadas en el arranque de material.

4.3.1. Torno convencional

Se trata de una máquina-herramienta que permite obtener y trabajar superficies cilíndricas. El fundamento detrás de esta máquina se basa en una combinación de movimientos: movimiento de corte de rotación (pieza) y un movimiento de avance, rectilíneo y transversal o longitudinal (herramienta empleada) (D. Fraiz Cosano, 2021).

En cuanto a las partes del torno convencional se pueden distinguir los siguientes elementos:

EXTRACTO DE LA NORMA UNE 15411

- | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1.- Cabezal. | 6.- Carro transversal. | 11.- Contrapunto. | 16.- Cremallera. |
| 2.- Eje principal. | 7.- Plataforma giratoria. | 12.- Eje del contracabezal. | 17.- Bancada. |
| 3.- Plato. | 8.- Portaherramientas. | 13.- Contracabezal. | 18.- Carro Principal. |
| 4.- Punto. | 9.- Carro Orientable. | 14.- Eje de cilindrar. | 19.- Bandeja. |
| 5.- Garra del plato.
avances | 10.- Guía de la bancada. | 15.- Eje de roscar. | 20.- Caja de cambio para
avances |

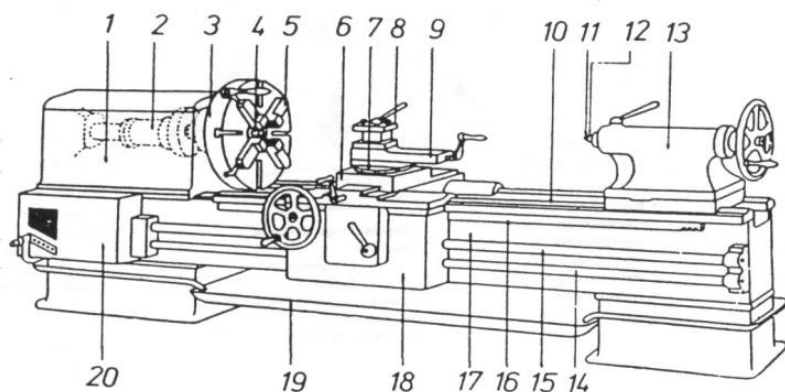


ILUSTRACIÓN 34: PARTES DE UN TORNO CONVENCIONAL

Uno de los elementos más importantes es la estructura o bancada. Se define como el soporte o base sobre el que están asentados todos los elementos y dispositivos de la máquina herramienta. En función del material que apliquemos para la estructura obtendremos unas características determinadas. Así, podemos distinguir los siguientes tipos principales (Maza Durand, 2021):

- *Fundición*: Este tipo tiene buen amortiguamiento o capacidad de absorber vibraciones. Presenta además un tiempo de fabricación y consumo de energía elevado. Por otro lado, permite obtener formas complicadas.
- *Hormigón*: Presenta también buen amortiguamiento, aunque con tendencia a las grietas bajo determinadas condiciones. La humedad puede ser determinante, provocando cambios dimensionales.
- *Acero soldado*: Presenta bajo amortiguamiento ya que el cordón de soldadura actúa como barrera. Por ello presenta elevada rigidez además de costes y tiempos de fabricación elevados. Se le puede realizar un tratamiento para reducir tanto las tensiones residuales como la corrosión.
- *Hormigón-epoxi*: No solo presenta elevado amortiguamiento si no que presenta tiempos y costes de fabricación reducidos. Presenta una gran estabilidad dimensional además de resistencia al agua y a los fluidos de corte.

Cabe mencionar que el torno convencional no es el único presente en el mercado, existen además otros tornos, denominados especiales, que no utilizan dicha configuración. Estos tornos son el torno vertical, revólver, copiador, automático multihusillo y automático de levas.

En cuanto a las operaciones que puede llevar a cabo esta máquina herramienta podemos clasificarlas en función de si se hacen sobre el exterior o interior de la pieza. De esta forma distinguimos:

Operaciones de corte exterior (Maza Durand, 2021):

- *Refrentado*: Con esta operación se busca reducir de manera longitudinal la barra de la que parte nuestra pieza a fabricar.
- *Cilindrado exterior*: Consiste en reducir el diámetro externo de la barra de material. El acabado dependerá de la velocidad y tipo de herramienta.

- *Perfilado*: Consiste en crear superficies curvas de manera longitudinal.
- *Copiado*: Es una de las operaciones más habituales, que tiene como objetivo eliminar los filos exteriores de la pieza para evitar accidentes de corte principalmente.
- *Ranurado*: Consiste en el mecanizado de ranuras de profundidad y anchura variada en función de las especificaciones de la pieza.
- *Ranurado para entallas y desahogo*: Se emplea para ejes de gran precisión, cuando la muela no puede tocar el diámetro.
- *Roscado exterior*: Esta operación permite generar la superficie de una rosca normalizada.

Operaciones de corte interior:

- *Copiado*.
- *Cilindrado interior*.
- *Ranurado para entalla*.
- *Ranurado para desahogo rosca*.
- *Roscado interior*.

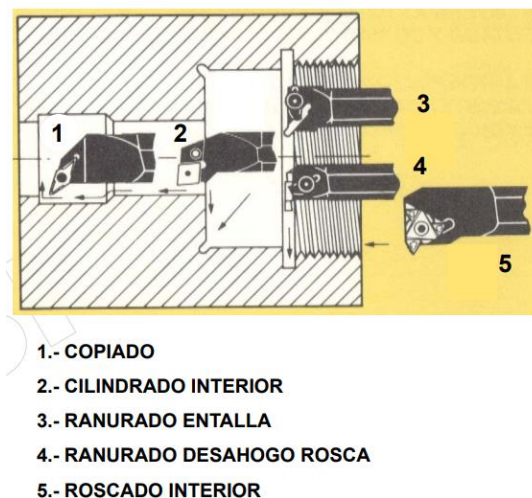
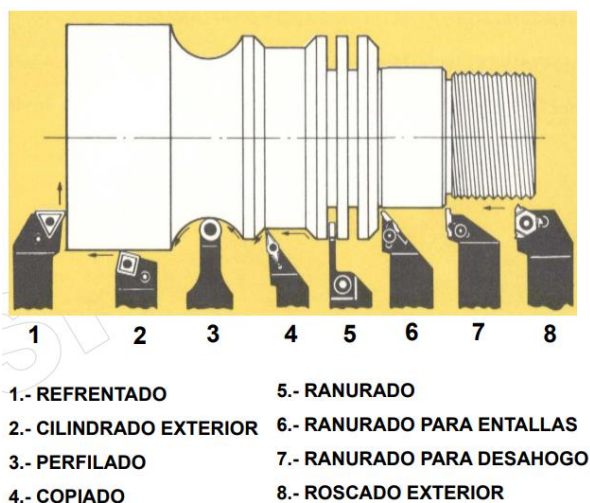


ILUSTRACIÓN 35: OPERACIONES EN TORNO CONVENCIONAL

Dentro de los parámetros de funcionamiento del torno los más importantes son (Muñoz Montenegro et al., 2019):

- *Velocidad de corte:* Velocidad lineal de movimiento de la herramienta. Debe de estar comprendida entre el rango de velocidades de la máquina y depende de factores como la profundidad de los cortes o dureza del material.
- *Velocidad de avance:* Hace referencia a la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta. Se define según la herramienta específica dentro de un determinado rango de avances por revolución.
- *Profundidad de corte:* Distancia entre la superficie de la pieza antes y después del mecanizado.

En cuanto a la herramienta de corte, está compuesta por tres partes principales: el material del filo de corte, la sujeción del filo y la geometría del filo de corte. Las herramientas de corte están clasificadas según la norma ISO en función de las áreas de materiales a mecanizar y el material de corte, considerando su resistencia al desgaste y tenacidad (D. Fraiz Cosano, 2021).

4.3.2. Fresadora

La segunda máquina-herramienta que vamos a desarrollar es la fresadora universal. Esta máquina permite obtener superficies prismáticas mediante la combinación de dos movimientos: un movimiento de corte de rotación (relativo a la herramienta) y otro de avance, rectilíneo y longitudinal o transversal (relativo a la pieza).

Distinguimos principalmente dos tipos, la fresadora vertical y la horizontal, siendo sus partes fundamentales las siguientes:

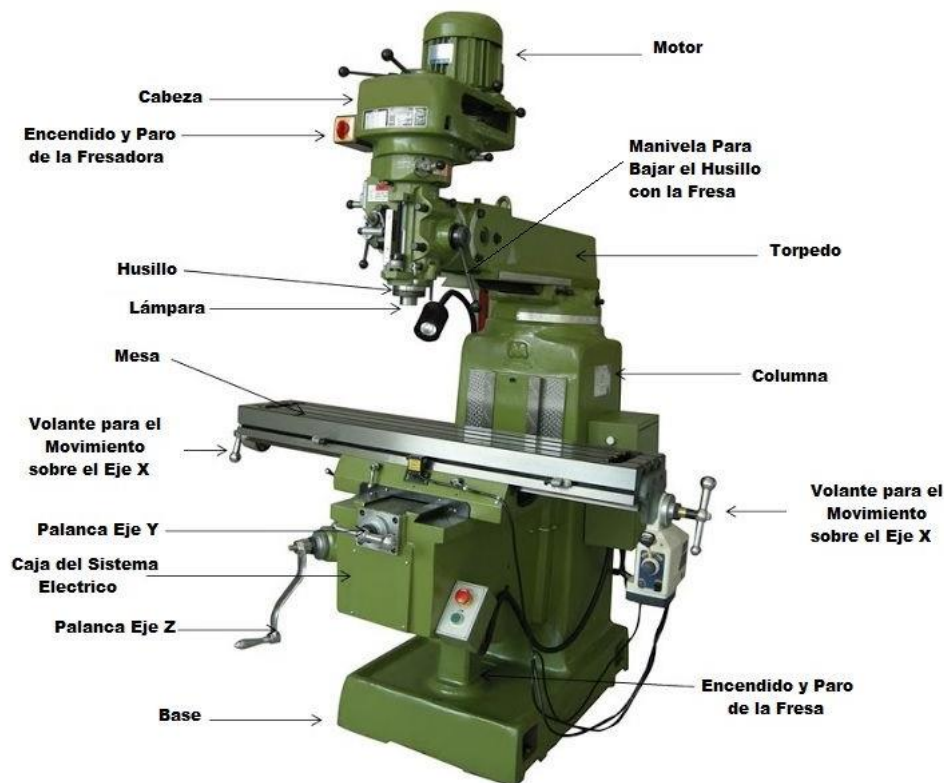


ILUSTRACIÓN 36: PARTES DE UNA FRESADORA UNIVERSAL

En cuanto a las operaciones que se pueden realizar con esta máquina-herramienta cabe destacar (Navarrete Pérez, 2021):

- *Planeado*: Consiste en la creación de una cara completamente plana.
- *Escuadrado*: Se trata de una variable del planeado que consiste en dejar escalones en la pieza mecanizada.
- *Mandrinado*: Cuando se requieren agujeros de mucha precisión, aquellos que no pueden hacerse con una broca.

- *Ranurado*: Este puede ser recto o con formas (en forma de T, semicírculo, entre otros). Este puede ser con o sin salida.
- *Roscado*.
- *Rampa*.
- *Taladrado*.

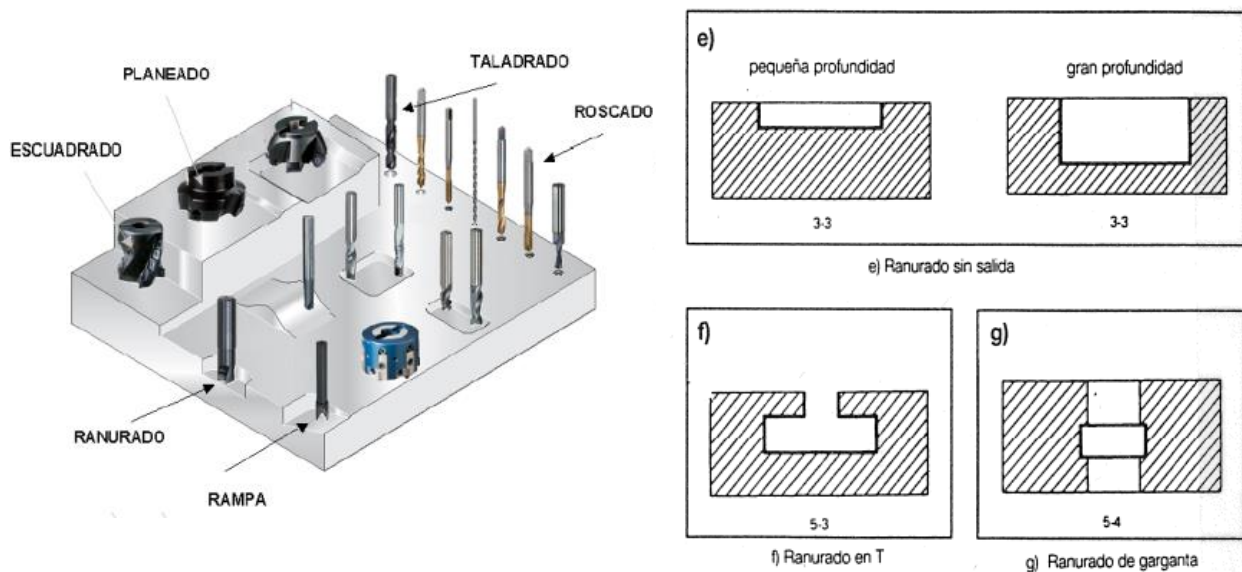


ILUSTRACIÓN 37: OPERACIONES EN FRESADORA UNIVERSAL

Al igual que en el caso del torno convencional, las herramientas de corte para la fresadora universal también quedan definidas por la norma ISO. Los materiales utilizados son muy variados en función del material de la pieza a trabajar: estos pueden ser de diamante (empleados normalmente para trabajar con aluminio), cerámicos, de metal duro (siendo el carburo de tungsteno el más empleado), materiales tenaces endurecidos o bien de acero rápido (D. Fraiz Cosano, 2021).

Dentro de esta máquina-herramienta, las herramientas de corte se puede dividir entre aquellas de corte enterizas de acero rápido o metal duro o aquellas herramientas que poseen un filo intercambiable de metal duro.

4.3.3. *Otros procesos de conformado por arranque de material.*

Además de las máquinas-herramientas ya descritas, dentro de las técnicas de conformado por arranque de material son empleadas otras como las siguientes (Pérez, 2020):

- *Sierra de corte:* Esta máquina herramienta nos permite perfilar o separar mediante corte un elemento en varias partes. El movimiento de corte puede ser de traslación o rotación mientras que la pieza se encuentra estática. En la industria está muy extendido el uso de sierras alternativas, circulares y de cinta.
- *Taladradora:* Nos permite obtener agujeros mediante la combinación de dos movimientos: uno de corte de rotación (relativo a la herramienta) y un movimiento de avance, rectilíneo y vertical (para la pieza).
- *Rectificadora:* Esta máquina-herramienta está orientada a obtener buenos acabados de superficie y precisión. Mediante una muela cilíndrica, compuesta por un aglomerante y partículas abrasivas, se arranca el polvo metálico haciéndola girar a gran velocidad.

5. Recursos a emplear

5.1. Diseño y análisis de piezas.

Todo el proceso de diseño de piezas y prototipos, sus posteriores modificaciones, así como sus análisis de comportamiento a esfuerzos se han realizado usando como herramienta el programa Solid Edge.

5.1.1. Dimensiones y medidas.

Al estar trabajando con piezas ya existentes, antes de cualquier propuesta e impresión es necesario realizar la correcta medida de las piezas originales. Estas piezas forman parte de elementos mayores y deben respetar las medidas y tolerancias para asegurar el correcto funcionamiento de estas.

Para ello, previo al diseño en 3D será necesario la realización de planos para las piezas propuestas, así como para las posteriores modificaciones que se puedan plantear.

Entre los distintos elementos de medición, además de otros elementos auxiliares, se usará un pie de rey, en este caso digital, para realizar mediciones con una precisión de hasta una centésima de milímetro.



ILUSTRACIÓN 38: PIE DE REY MIDIENDO GARRA DE TORNO

5.1.2. *Solid Edge.*

Solid Edge se define como un programa de diseño asistido por computadora, también conocido como CAD, que permite el modelado de piezas tridimensionales. Además, permite el modelado de piezas para soldadura, doblado de chapas, modelado según distintos materiales, ensamblaje de conjuntos entre otros.

Este programa es propiedad de Siemens y es desarrollado por el mismo.

No obstante, sus posibilidades van más allá, siendo muchas las herramientas incluidas dentro del software. Entre ellas, cabe destacar las siguientes herramientas que serán de gran utilidad en la realización de este trabajo (*Solid Edge | Siemens Digital Industries Software*, s. f.):

- *Ingeniería inversa:* El uso de escáneres de alta resolución permite representar y modificar piezas para adaptarlas a las nuevas demandas o condiciones de diseño sin tener que realizar una reconstrucción completa.
- *Diseño generativo:* Se entiende por diseño generativo a la optimización de geometrías y volúmenes.
- *Simulación y análisis por elementos finitos:* Esta herramienta permite validar digitalmente, sin tener que realizar un ensayo real, la pieza o prototipo planteado.
- *Fabricación e impresión en 3D:* Solid Edge cuenta también con una interfaz orientada al diseño de piezas con base en la fabricación aditiva, permitiendo adaptar el modelo a la fabricación, reorientar la pieza y validar y corregir errores antes de exportarla a un formato de impresión como es el STL.
- *Migración inteligente de archivos 3D:* Permite utilizar archivos de otros programas tipo CAD sin perder las propiedades asociadas a la pieza o prototipo.

Las piezas que imprimir serán desarrolladas primero mediante el software Solid Edge. Mediante las distintas operaciones que ofrece se pueden diseñar y recrear todas las superficies de las piezas a estudiar, así como plantear modificaciones de estas y estudiar su viabilidad.

5.1.3. *Análisis por elementos finitos.*

El análisis por elementos finitos es un método computacional que permite predecir el comportamiento de un elemento ante esfuerzos, calor, vibración, flujo de fluidos y otras consideraciones físicas propias del mundo real y las condiciones bajo las que debe funcionar dicho elemento.

Será una herramienta de gran ayuda no solo para conocer de antemano el comportamiento de nuestra pieza en base a las fuerzas propias de las máquinas a las que pertenecen, sino que también en función del material sobre el que están fabricado. Además, permite valorar la posibilidad de añadir material de refuerzo en aquellas zonas o secciones más críticas.

El procedimiento o base de este análisis parte de la división de un objeto real en un número finito de elementos, que puede comprender entre los miles y cientos de miles dependiendo de la precisión buscada o pieza a estudiar. Así, mediante ecuaciones matemáticas se analiza el comportamiento de cada uno de los elementos anteriores para, posteriormente, arrojar conclusiones sobre el comportamiento en común de todos ellos (Fernández López, 2018).

Permite conocer la deformada final de los prototipos, las secciones más cargadas, así como los posibles puntos de ruptura.



ILUSTRACIÓN 39: EJEMPLO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

5.1.4. *Diseño generativo u optimización topológica.*

El diseño generativo es una herramienta que, seleccionado el material con el que trabajar, dimensiones, cargas, restricciones e incluso el peso final buscado, permite de forma automática encontrar la solución geométrica en función de las condiciones demandadas. Así, se presenta como una herramienta con importantes funcionalidades, especialmente cuando se combina con tecnologías de impresión 3D.

Dicho lo anterior, una de sus claves es la reducción en peso o del volumen sobrante, buscando componentes más ligeros, evitando también el derroche de materiales y sin comprometer la integridad estructural de la pieza. En otras palabras, este software busca la relación óptima entre peso y resistencia para nuestro prototipo, adaptándose también al proceso de fabricación a seguir (Aramburu Santa Cruz, 2019).

Sin embargo, los diseños propuestos con esta herramienta no son adecuado para todos los procesos de fabricación, especialmente los tradicionales, ya que lleva asociado la aparición de volúmenes y formas de mayor complejidad para poder garantizar esa reducción en peso. Por ello, es una herramienta de enorme compatibilidad con la fabricación aditiva, ya que la resolución de estas impresoras permite afrontar este incremento en la complejidad de las formas del prototipo.



ILUSTRACIÓN 40: EJEMPLO DE DISEÑO GENERATIVO

5.2. Fabricación de piezas.

Como bien se ha discutido, existen distintas técnicas y procesos de fabricación basados en la fabricación aditiva, así como materiales con amplias propiedades físicas con los que se puede trabajar. A continuación, se detalla la impresora con la que se trabajará, sus propiedades y características principales además de los materiales, tanto principales como de refuerzo, con los que se confeccionarán las piezas.

5.2.1. Impresora Mark Two.

El funcionamiento y las posibilidades de esta impresora se basan en la impresión mediante material compuesto. Esto consiste en la combinación de dos materiales con características distintas formado así un nuevo material con la combinación de ambas, obteniendo buenos resultados especialmente en términos de resistencia y peso en comparación con otros materiales convencionales.

La impresora Mark Two consigue la fabricación de piezas en base al proceso de reforzamiento de fibra continua (CFR). Así, mediante un cabezal doble puede trabajar de forma simultánea con materiales plásticos y con fibra continua. A pesar de su tamaño más propio de una impresora de escritorio, los resultados obtenidos son comparables con los de impresoras industriales (*Markforged Industrial 3D Printing*, s. f.).

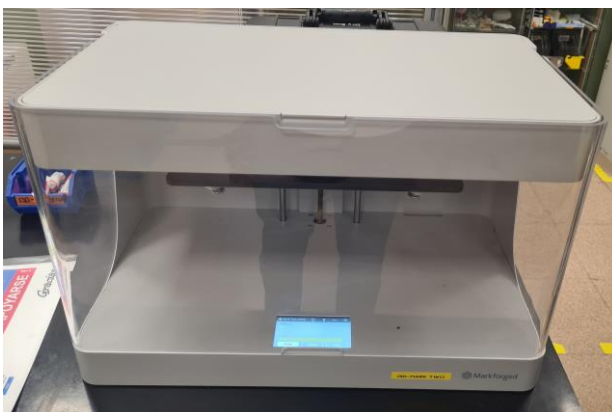


ILUSTRACIÓN 42: IMPRESORA MARK TWO



ILUSTRACIÓN 41: IMPRESORA FABRICANDO UNA PIEZA

Cuenta con un chasis monobloque de aluminio que garantiza una gran precisión y fiabilidad tras miles de horas de impresión, obteniendo piezas reforzadas con fibra continua, buen acabado y de buen aspecto. Por otro lado, cuenta con un software que permite subir los diseños a imprimir, estudiar y establecer todos los parámetros de diseño como relleno, altura de capa o matriz interna, así como realizar una estimación de tiempo de impresión y precio o corregir posibles errores en la impresión (Mударra Acebedo, 2021).

Las especificaciones técnicas aportadas por el fabricante relativas a la impresora se incluyen en el Anexo I.

5.2.2. *Materiales de impresión.*

Una de las principales ventajas competitivas de esta impresora es los materiales y la combinación de materiales con los que puede trabajar.

El material base que caracteriza a esta impresora es el Onyx (aunque puede utilizar otros como el Nylon). Se trata de un filamento de nylon reforzado con microfibras de carbono. Sin duda en Onyx se presenta con un material que garantiza una elevada fuerza, dureza y resistencia a esfuerzos tanto físicos como químicos además de un acabado de alta calidad.



ILUSTRACIÓN 43: EJEMPLO PIEZA IMPRESA CON MATERIAL ONYX

Sin embargo, la capacidad de esta impresora no queda limitada a este material, sino que permite además combinar este material con fibras continuas. En este proyecto, en aquellas piezas y más concretamente, en aquellas secciones críticas donde sea necesario un material de refuerzo, se hará uso de fibras de vidrio y de carbono.

La fibra de carbono se presenta como un material de altas prestaciones de alto interés en campos como el aeroespacial, automotriz o de ingeniería entre otros. Este material no suele emplearse solo, sino que se combina con otros dando lugar a materiales reforzados.

Se consigue aumentar de forma significativa, la rigidez y resistencia de la pieza, pero manteniendo un peso reducido en comparación con materiales tradicionales, especialmente los metálicos.

Cada una de estas fibras se forma a partir de la unión de miles de filamentos de carbono de entre 5 y 10 micras de diámetro. Se considera una fibra sintética ya que se fabrica a partir del poliacrilonitrilo (Tapia Cabrera, 2020).

En cuanto a la fibra de vidrio, la base de este material son numerosos filamentos cerámicos extremadamente finos de SiO_2 (dióxido de silicio). Su principal uso es el de conformar materiales compuestos usando un material base y la fibra de vidrio como material de refuerzo, aunque tiene otras aplicaciones notables. Suele compararse con los compuestos reforzados con fibra de carbono, teniendo un comportamiento similar a este, aunque con algunas diferencias, siendo la fibra de vidrio menos fuerte o rígida, aunque menos quebradiza y más económica (Paredes Salinas et al., 2017).



ILUSTRACIÓN 45: FIBRA DE VIDRIO

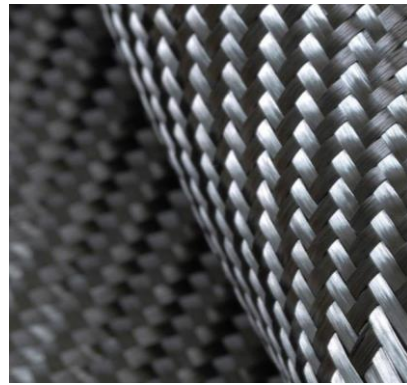


ILUSTRACIÓN 44: FIBRA DE CARBONO

La unión de un material base con un material de refuerzo, tal y como ya se ha mencionado, recibe el nombre de material compuesto. Esta unión, que puede ser química o no química, tiene como objetivo formar un compuesto con propiedades mejores que las que podrían obtenerse con estos materiales por sí solos.

A modo de contexto y sin profundizar en exceso en el mundo de los materiales compuestos, se puede hacer una clasificación de estos según distintos criterios.

Así, en función del tipo del tipo de matriz distinguimos («*Materiales compuestos*», 2020):

- *Materiales compuestos de matriz metálica (MMC).*
- *Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC).*
- *Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC).*

Por otro lado, en función de la forma del material de refuerzo encontramos:

- *Compuestos reforzados por partículas.*
- *Compuestos reforzados por fibras.*
- *Compuestos estructurales.*

Además, según el comportamiento térmico de los polímeros empleados («*Tipos de Polímeros*», 2018):

- *Termoplásticos:* Aquellos que a una determinada temperatura se convierte en fluidos, lo cual permite moldearlos según la forma buscada.
- *Elastómeros:* Aquellos polímeros con una alta flexibilidad o libertad de movimiento de sus cadenas a nivel molecular.
- *Termoestables:* Estos polímeros no pueden ser remodelados mediante el aumento de temperatura ya que al elevarla se promueve la descomposición química del mismo.

Por último, las propiedades que suelen caracterizar a los materiales compuestos son («*Polímeros - Concepto, tipos, propiedades y características*», s. f.):

- *Baja densidad:* También entendido como materiales con una buena resistencia por unidades de peso, característica que no es propia de los materiales metálicos.
- *Alta resistencia.*
- *Amplia variedad de formas.*
- *Alta resistencia dieléctrica:* Los materiales compuestos son por naturaleza aislantes eléctricos.
- *Resistencia a la corrosión:* En función de los materiales empleados se puede maximizar la resistencia ante cualquier elemento corrosivo.
- *Comportamiento a fatiga:* Suele ser bueno debido principalmente al ser materiales que no poseen una estructura ordenada como la de los metales.

- *Gran capacidad de consolidación de partes.*
- *Reducción de los costes de mantenimiento.*

A partir de todo lo anterior, se puede concluir que la fabricación de los prototipos se basa en un material compuesto de matriz polimérica, usando un polímero termoplástico y un material de refuerzo por fibras buscando una buena resistencia por unidad de peso, un buen comportamiento a fatiga y con especial atención a los tiempos de fabricación y precio final de los prototipos obtenidos.

Las especificaciones técnicas y propiedades aportadas por el fabricante relativas a los materiales de impresión se incluyen en el Anexo I.

Las propiedades más relevantes de los materiales disponibles en este proyecto se recogen en la siguiente tabla:

TABLA 2: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE IMPRESIÓN

Material	Nylon	Onyx	Fibra de vidrio	Fibra de carbono
Módulo de elasticidad (GPa)	1.7	2.4	21	60
Límite elástico (MPa)	51	40	590	800
Tensión de rotura (MPa)	36	37	590	800
Elongación (%)	150	25	3.8	1.5
Resistencia a flexión (MPa)	50	71	200	540
Temperatura deflexión por calor (°C)	41	145	105	105
Densidad (g/cm ³)	1.1	1.2	1.5	1.2
Precio repuesto (€/cm ³)	0.20	0.23	1.52	3.33

El precio de los materiales se calcula a partir del precio fijado por el fabricante para el repuesto entre el volumen de material por repuesto.

5.3. Ensayo de piezas.

Como parte final y a modo de obtener resultados y conclusiones de los prototipos diseñados, se realizarán ensayos sobre las máquinas sustituyendo los utillajes de sujeción originales por los prototipos finales obtenidos. Se trata de comprobar que estos son capaces de satisfacer todas las características que se esperan de estos utillajes y comprobar que el proceso de fabricación y la calidad final de las piezas no se ve comprometido.

Como ya se ha comentado, las máquinas-herramientas que se emplearán para los ensayos son tanto un torno convencional como una fresadora universal. Los conjuntos de sujeción que incluyen estas máquinas-herramientas son una mordaza hidráulica para el caso de la fresadora, y un plato de 3 garras para el caso del torno. Las piezas a diseñar y a analizar son las garras que componen los anteriores conjuntos de sujeción.

A continuación, se incluyen las principales especificaciones técnicas de estas máquinas-herramientas, así como de los conjuntos de sujeción.

También se incluye en el Anexo II la documentación original de las máquinas-herramientas y de los conjuntos de sujeción.

Fresadora universal

Se incluyen las siguientes características:

- Datos fresadora universal:

TABLA 3: DATOS FRESADORA UNIVERSAL EMPLEADA

Fresadora universal			
Marca	FEXAC	Modelo	1016x240mm
Modelo	Modelo UE	Peso neto	1250
Número de velocidades	12	Velocidad máxima y mínima	40-1250 rpm

- Datos mordaza hidráulica:

TABLA 4: DATOS MORDAZA HIDRÁULICA EMPLEADA

Mordaza hidráulica			
Marca	Crucelegui	Capacidad de apertura	150mm
Modelo	H3-150-NC	Peso	16Kg
Apriete máximo	4000Kg		

- Imágenes de la fresadora y mordaza:



ILUSTRACIÓN 47: FRESADORA Y MORDAZA EMPLEADA



ILUSTRACIÓN 46: MORDAZA EMPLEADA

Torno paralelo

Se incluyen las siguientes características:

- Datos torno paralelo:

TABLA 5: DATOS TORNO PARALELO EMPLEADO

Torno paralelo de precisión			
Marca	Optimum – Machinen	Número de revoluciones	25 – 2000 rpm
Modelo	D 460x1000	Número de velocidades	12
Código	340 2100	Peso neto	1720Kg

- Datos plato de garras:

TABLA 6: DATOS PLATO DE GARRAS EMPLEADO

Plato de garras			
Marca	Röhm	Diámetro	250mm
Modelo	ZS – centric clamping	Par máximo	150 Nm
Número de garras	3	Fuerza de sujeción total	63 kN

- Imágenes del torno y plato:

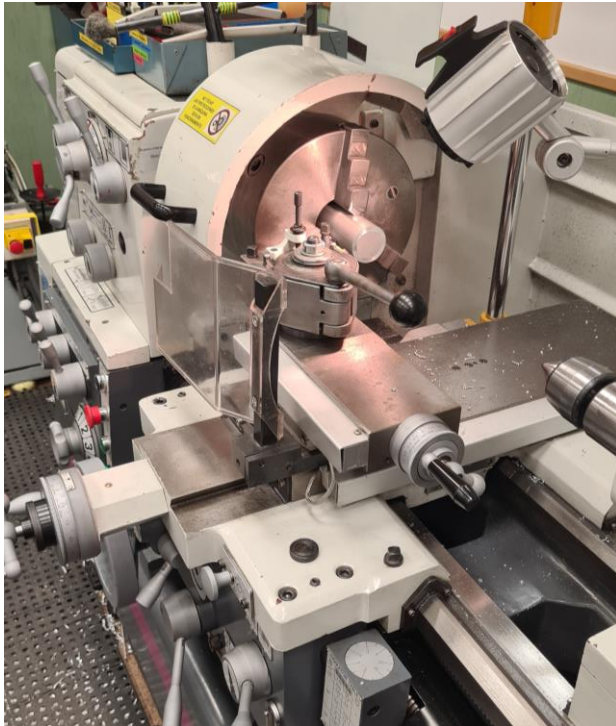


ILUSTRACIÓN 49: PLATO Y TORNO EMPLEADOS



ILUSTRACIÓN 48: TORNO CONVENCIONAL EMPLEADO

6. Metodología de trabajo

6.1. Modelado 3D de la pieza

El punto de partida de este trabajo comienza con el modelado en 3D. Para ello, y a partir de las piezas originales, es necesario tomar las medidas de dichas piezas, teniendo en cuenta que estas forman parte de un conjunto mayor, tanto de la máquina-herramienta de torneado y fresado. Por lo tanto, será necesario tomar todas las medidas oportunas con su correspondiente precisión y considerando los posibles errores de medida, elaborar los planos de trabajo y realizar un primer modelado, en este caso a través de la herramienta CAD de Solid Edge.

6.1.1. Descripción y modelado 3D de las garras de mordaza para fresadora.

En primer lugar, hay que recordar que se trabajará una mordaza hidráulica de tipo manual, que forma parte del conjunto de la fresadora. El funcionamiento de esta es sencillo, la pieza a trabajar se sitúa entre las dos garras y, haciendo girar la manivela, se consigue garantizar la sujeción idónea de la pieza. Estas garras quedan unidas mediante dos tornillos al resto de la mordaza. Por último, la mordaza queda unida mediante tornillos a la mesa de la fresadora.

Son precisamente las dos garras, tanto la de la boca móvil como la de la boca fija, los objetos de análisis de este trabajo. Estas garras son principal elemento a la hora de garantizar la correcta sujeción de la pieza a mecanizar y, por tanto, el elemento encargado de soportar la fuerza de sujeción necesaria para ello.

Estas garras tienen unas dimensiones de 115x41x19mm cada una. Además, cuenta con dos agujeros de diámetro interior 9 y diámetro exterior 15,6mm donde van alojados los dos tornillos que unen las garras con el resto del utillaje. Como herramienta para obtener las dimensiones de la pieza se ha empleado un pie de rey de precisión 0,01mm.

También se incluye en el Anexo III el plano de la garra de mordaza.

A continuación, se incluyen imágenes de las dos garras de la mordaza en cuestión.

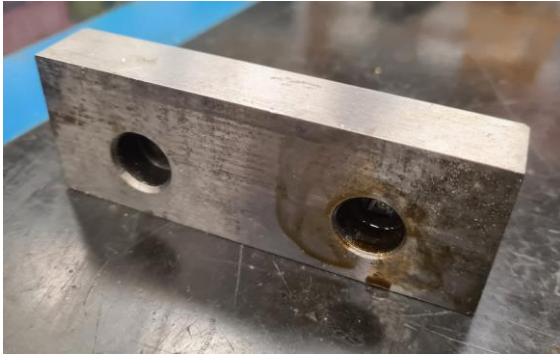


ILUSTRACIÓN 51: GARRA DE MORDAZA 1

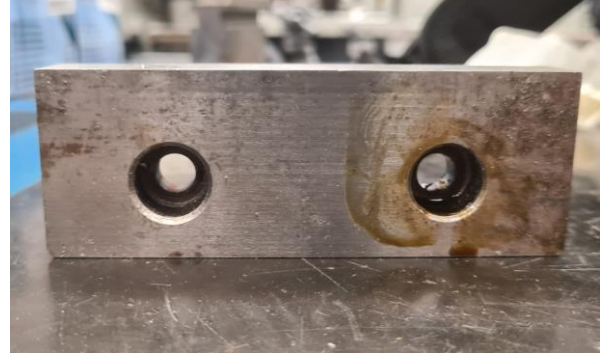


ILUSTRACIÓN 50: GARRA DE MORDAZA 2

6.1.2. Descripción y modelado 3D de garras de un plato de garras para torneado.

El principal elemento de sujeción en una operación de torneado es el plato de garras. Estos pueden ser de tres o cuatro mordazas o garras que se abren o cierran de forma simultánea por medio de una llave de ajuste, aunque también existen platos con garras independientes. Durante la operación de torneado, el plato gira a gran velocidad asegurando el agarre de la pieza mientras actúa el elemento de corte, arrancando material según la geometría buscada. Aunque existen distintos tipos de platos, el análisis se realizará sobre un plato de garras universal como el que se muestra en la siguiente imagen.

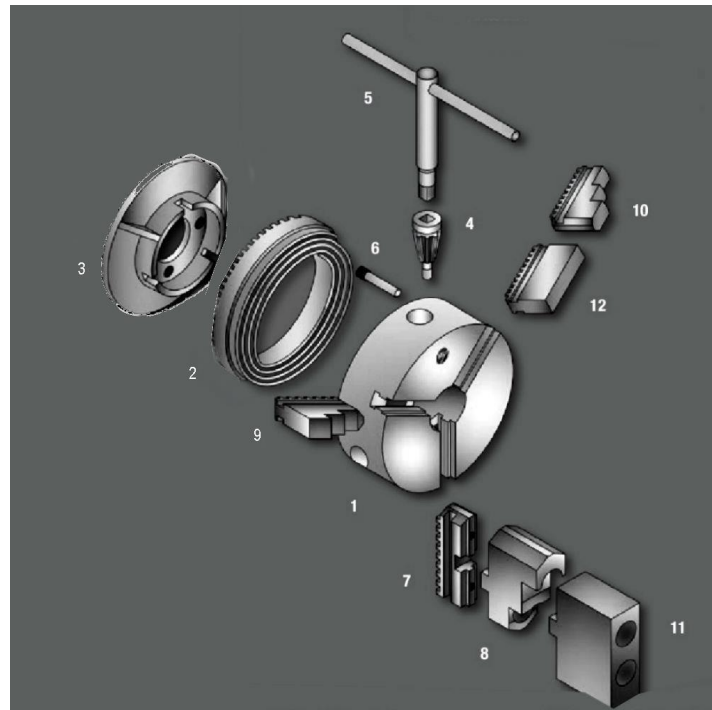


ILUSTRACIÓN 52: PARTES DE UN PLATO DE GARRAS

Dentro del plato de garras universal, este trabajo se centra en el análisis de las garras que componen este plato, es decir, de los elementos 7 al 12 que aparecen en la imagen anterior. Estas garras son el principal elemento en cuanto al correcto agarre de la pieza y el encargado de aportar la fuerza de sujeción durante el proceso de torneado.

Estas garras pueden ser de distintos tipos. Así, podemos encontrar garras blandas (elemento 12) las cuales se mecanizan para adaptar su geometría según a la superficie de contacto con la pieza a trabajar. Por otro lado, tenemos garras duras (elementos 9, 10 y conjunto 7-8-11) las cuales permiten trabajar con distintos diámetros sin tener que mecanizarlas. Dentro de estas últimas podemos encontrar garras que permiten trabajar con diámetros externos y garras que permiten también trabajar con diámetros internos si la pieza es lo suficientemente grande. Así, apoyándonos de nuevo en la imagen anterior, el elemento 9 permitiría trabajar únicamente sujetando la pieza de forma externa mientras que el elemento 10 permite agarrar la pieza tanto con el diámetro externo como con el interno si se tratase, por ejemplo, de una pieza cilíndrica hueca.

Por el tipo de torno y plato de garras con el que se trabaja, estas garras tienen unas dimensiones generales de 105x69x27 con 9 dientes cada una. Estos dientes permiten unir la garra con el resto del plato y, mediante la llave, ajustar de forma simultánea la apertura del plato para adaptarlo al diámetro de la pieza a trabajar.

También se incluye en el Anexo III el plano de la garra para plato.

A continuación, se incluyen imágenes de las garras del plato y su posición dentro del mismo.



ILUSTRACIÓN 53: GARRAS DE PLATO (1)

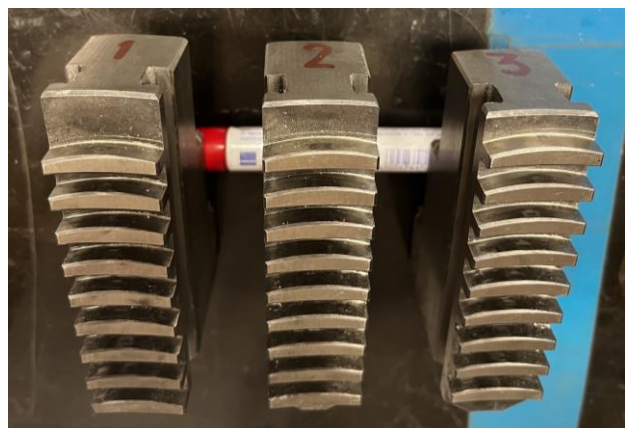


ILUSTRACIÓN 54: GARRAS DE PLATO (2)

6.1.3. Otras consideraciones en el modelado de piezas.

Como consideración adicional es importante recalcar la distorsión angular y su impacto en el modelo 3D final. Cuando representamos una superficie curva, realmente obtenemos una simplificación de dicha curva a partir un número de líneas rectas. Así, cuanto más estricta sea la distorsión angular que elijamos obtendremos una representación más fiel del objeto a representar el 3D. De esta forma, dentro del propio programa de Solid Edge, todas las piezas diseñadas tendrán una distorsión angular de tres grados.

En cuanto a las garras del plato de garras, al estar reguladas mediante un rail en forma de espiral donde quedan alojados los dientes de estas, para que las distancias al centro del plato y el agarre quede equilibrado entre cada una de las garras del plato estas tienen situados los dientes a distancias distintas.

Esta consideración supone una misma estructura para cada una de las garras, pero una posición distinta de los dientes, aunque manteniendo el número y forma de estos. Inicialmente se procede a imprimir una de ellas, pero a la hora de realizar ensayos será necesario contemplar las tres versiones de la garra.

En el Anexo III se incluye los planos de cada una de ellas, indicando las variaciones que aparecen en los dientes.

6.2. Impresión de prototipos.

Este apartado se centra en todos los pasos, especificaciones y parámetros que deben considerarse entre el modelo 3D y la impresión final de la pieza. Aunque la impresión de las piezas depende en gran medida de la impresora y el software que acompaña a la misma, se realizará un análisis de los principales parámetros a considerar en toda impresión basada en aditiva y como estos influyen en el resultado obtenido.

6.2.1. Parámetros de diseño en impresión de prototipos.

Los principales parámetros de diseño a considerar en todo proceso de fabricación aditiva son los siguientes:

A. Altura de capa.

Probablemente la altura de capa sea el parámetro más importante en toda impresión 3D. La altura de capa indica qué tamaño queremos darle a cada una de las capas que va a componer nuestra pieza. Este parámetro determina dos factores fundamentales en nuestra pieza final como lo son la calidad o acabado de la pieza y el tiempo de impresión. Estos dos factores presentan una relación inversa entre sí, por lo que a menor grosor de la capa de impresión (y por tanto mayor calidad) mayor será el tiempo de impresión. En resumen, la velocidad de impresión y el acabado de la pieza quedan relacionados de forma inversa entre sí por la altura de capa (Caminero et al., 2019).

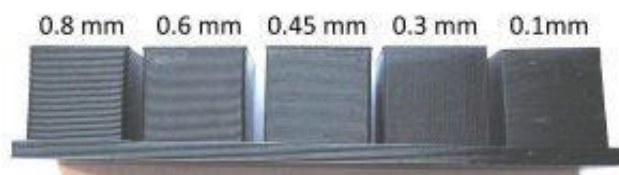


ILUSTRACIÓN 55: IMPACTO DE LA ALTURA DE CAPA

Volviendo a la impresora Mark Two, la altura de capa queda condicionada según el material base y de refuerzo que se emplee. Así, usando como material base el Onyx la altura de capa mínima queda limitada a 0.1 milímetros mientras que de usar material de refuerzo esta queda restringida a 0.125 en el caso de la fibra de carbono y a 0.1 en el caso de la fibra de vidrio. En el compromiso entre tiempo y calidad, para las piezas que se están analizando, inicialmente se prioriza la calidad, por lo que se trabajará con la mínima altura de capa para cada uno de los casos. No obstante, y con el objetivo de agilizar la obtención de prototipos, se puede priorizar el tiempo de impresión y volver a la calidad cuando se tenga un diseño definitivo.

B. Orientación.

Otro gran condicionante en toda impresión es la orientación que le demos a la pieza. Uno de los factores principales que limitan las dimensiones finales de la pieza a imprimir, y que puede implicar que sea necesario descomponer la pieza en partes más pequeñas, son las dimensiones del plato de impresión. De esta forma, la orientación de la pieza trata de, respetando las dimensiones máximas que admite la impresora, buscar la posición que permite fabricarla maximizando la calidad.

La relación entre orientación y calidad viene determinada por todo cambio brusco en la estructura de la pieza, especialmente aquellos cambios de secciones y volúmenes pequeños a secciones de mayor superficie y volumen. Afecta, por tanto, a la integridad de la estructura y también al aspecto superficial de la pieza. Así, en un principio se busca apoyar la pieza a la bandeja de impresión por la cara más extensa y que minimice secciones en voladizo o cualquier tipo de saliente donde la capa siguiente no pueda apoyarse en la capa anterior (Idrach Antonucci, 2020).

En aquellos casos donde no se puedan evitar estas situaciones, será necesario material de soporte, el cual permite hacer frente a los cambios bruscos de sección, aunque suele implicar la necesidad de añadir tras la impresión una fase de post-procesado para retirar el material sobrante. Aunque el material de apoyo permite trabajar con estas geometrías complejas este implica un acabado superficial de menor calidad y un aumento en el tiempo de fabricación debido al post-procesado necesario tras la impresión.

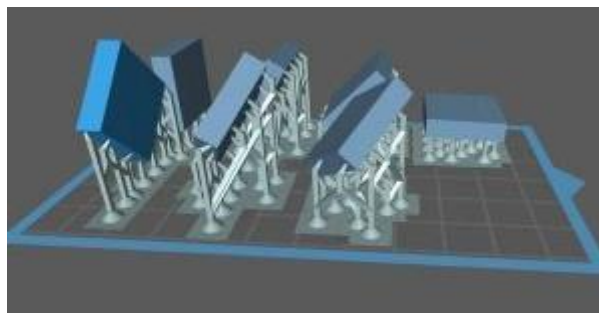


ILUSTRACIÓN 56: MATERIAL DE SOPORTE SEGÚN ORIENTACIÓN

La propia interfaz donde se cargar las piezas de Markforged (eiger.io) permite seleccionar cualquier tipo de orientación que deseemos. Así, el programa nos informa de forma automática de las geometrías que no cumplen con los límites de la bandeja de impresión. Además, el programa calcula de forma automática el material de apoyo que será necesario en la impresión, el cual incluye en los cálculos de tiempo, precio y material empleado que nos ofrece de forma previa a la impresión. Esta interfaz permite ver cada una de las sucesivas capas, distinguiendo entre material base, material de refuerzo y material de soporte empleado (*Markforged Industrial 3D Printing*, s. f.).

C. Densidad del infill o relleno.

Este parámetro determina cómo está constituida nuestra pieza por dentro, es decir, como rellenamos nuestra pieza. Este parámetro tiene implicaciones directas en factores tan importantes como el peso, velocidad de impresión, resistencia, precio e incluso otros como la flotabilidad de la pieza.

La densidad del infill o relleno implica cuánto material ponemos dentro de nuestra pieza, normalmente suele estar expresado en porcentajes. Entre sus implicaciones podemos afirmar que, a mayor densidad, mayor peso, mayor resistencia mecánica, mayor tiempo de fabricación y mayor coste total de la pieza. Por todo lo anterior, la densidad del infill es un aspecto de suma importancia que debe ser seleccionado en función de la finalidad de la pieza y tiempos de fabricación disponibles principalmente.

En cuanto a los valores, para piezas de exhibición se puede emplear una densidad del 15% o menor, para piezas funcionales estándar se recomienda entre un 15% y un 25%, mientras que para piezas mecánicas se busca maximizar la cantidad de material con densidades entre el 25% y 40% para un uso mecánico leve y superiores al 50% para un uso mecánico exigente o necesidad de resistencia al impacto (Camarillo, 2021).

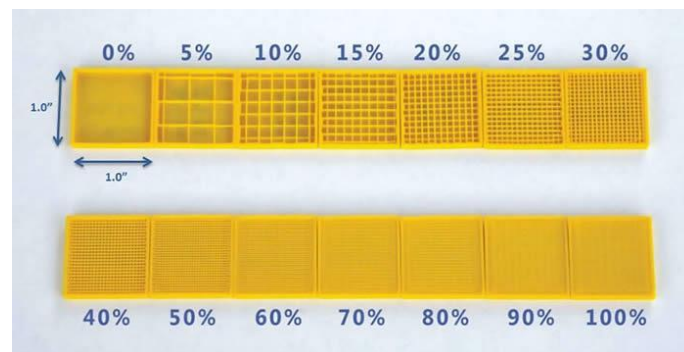


ILUSTRACIÓN 57: INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE RELLENO

En nuestro caso, la densidad puede ser seleccionada dentro del menú de impresión, aunque el programa siempre ofrece una recomendación indicando el rango de densidad más apropiado para la pieza y material seleccionado. En primera instancia, para la fabricación de prototipos se seleccionará un valor situado en dicho rango y, en función del posterior análisis de fuerzas y ensayos, se podrá aumentar en caso de ser necesario.

D. Patrón de infill o relleno.

Por otro lado, el patrón de infill o relleno responde a con qué geometría vamos a rellenar nuestra pieza respetando la densidad seleccionada, los hay de tipo triangular, cuadrado, panal, líneas rectas, hexagonales entre otros. El patrón seleccionado tiene implicaciones en la resistencia de la pieza y en el tiempo necesario de impresión.

Algunas de las características de los patrones más empleados son («Entendiendo el relleno», s. f.):

- Líneas: Este patrón traza líneas en una única dirección. Aunque no ofrecen tanta resistencia como otros, consume poco material con tiempos de impresión reducidos.
- Red o grid: Similar al patrón a base de líneas, pero este se traza en dos direcciones. Este patrón ofrece mayor resistencia en dos dimensiones, aunque con mayor tipo de impresión.
- Triangular: Esta forma triángulos en tres direcciones dentro del plano XY. Dentro de los patrones 2D este ofrece mayor resistencia que los anteriores. Junto con el patrón grid es uno de los más empleados por su buena relación resistencia-tiempo de impresión.
- Panel de abeja: También llamado hexagonal, este patrón forma hexágonos en el plano XY.
- Tri-hexagonal: Este patrón se presenta como el relleno 2D más resistente. Este crea una malla de hexágonos en el plano XY con triángulos incrustados.
- Cúbico: Se trata de un patrón 3D compuesto de cubos ofreciendo una buena resistencia en todas las direcciones. Algunas de las variaciones son la subdivisión cúbica, el cual utiliza cubos de distintos tamaños para equilibrar la fuerza con el tiempo de impresión y el precio o el octeto que emplea pirámides de base cuadrada.
- Giroides: Este patrón 3D crea líneas onduladas de direcciones alternas. Aunque complica la impresión del prototipo supone una excelente resistencia en todas las direcciones y al corte.

Algunos de los patrones descritos se incluyen en la siguiente imagen:

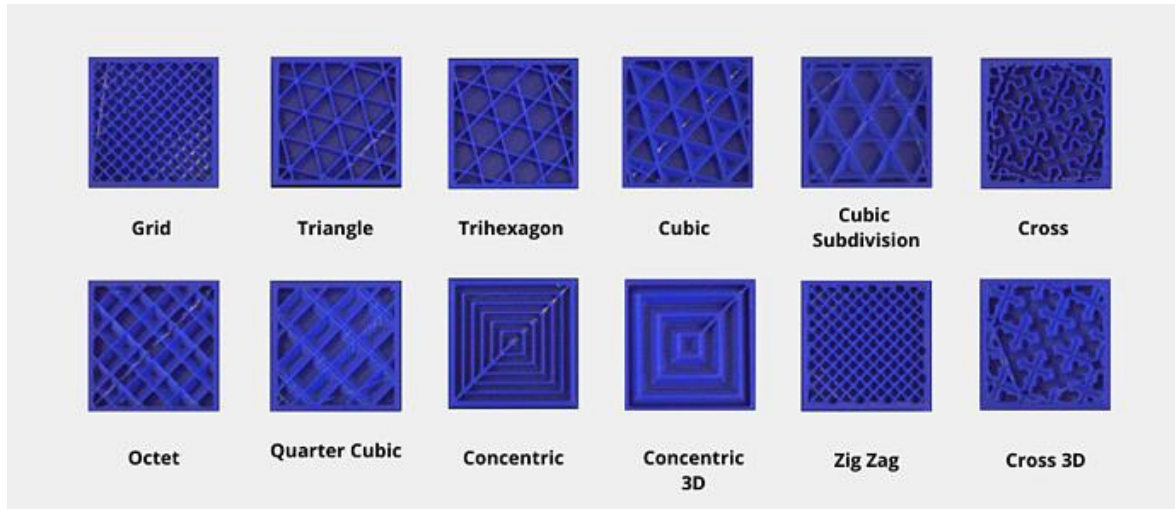


ILUSTRACIÓN 58: TIPOS DE PATRONES DE RELLENO

Para la fabricación de prototipos tenemos disponibles algunos de los patrones anteriores como el triangular, rectangular, hexagonal o giroides. Para la elaboración de los primeros prototipos se seleccionará un patrón triangular, al ser el patrón en dos dimensiones con mejor relación entre resistencia y tipo de impresión. De ser necesario, este se modificará en versiones siguientes.

E. Grosor de las capas externas.

Una vez determinado cómo serán nuestras piezas a nivel interno falta concretar el acabado externo. Para ello, es necesario concretar cuantas capas (con densidad de material del 100%) vamos a colocar tanto para el suelo y techo de la pieza como para las paredes de esta.

Así, es recomendable usar al menos 2 capas para garantizar un buen acabado de la pieza y evitar que dicha cara pueda quedar hundida o sea menos resistente. En aquellas caras donde nuestra pieza esté en contacto directo con la pieza a mecanizar o con el resto del conjunto de sujeción será conveniente aumentar este número de capas (Adam, 2017).

Aunque de nuevo el software, en función de los parámetros ya establecidos y la pieza a fabricar, nos ofrece una recomendación, el criterio a seguir es de emplear 2 o 3 capas de forma general y 4 capas para aquellas secciones de contacto directo con otros elementos y de transmisión de fuerzas. Estas zonas son tanto las más caras, en cuanto a consumo de material, como las más lentas de imprimir, ya que la densidad del material es del 100%.

F. Material de refuerzo.

Como bien se ha mencionado con anterioridad, al trabajar con esta impresora existe la posibilidad de emplear material de refuerzo, concretamente fibra de carbono o de vidrio, en aquellas capas donde sea conveniente.

Aunque para la elaboración de un primer prototipo no se empleará material de refuerzo, de conocer las fuerzas y tensiones a las que queda sometida la pieza se presentarán varias opciones para reforzar aquellas zonas más débiles o críticas. Por un lado, una opción válida sería emplear una densidad de infill mayor, aunque esto implica cambios tanto en las zonas críticas como el resto de las zonas que no requieren una mayor resistencia. Por otro, el uso de material de refuerzo permite modificar únicamente aquellas secciones más débiles sin cambiar el resto (Rodríguez Hernández, 2021). En función de la pieza y de las fuerzas de trabajo será necesario que opción de refuerzo es más conveniente en términos de precio, peso y tiempo de impresión.

Volviendo al software de impresión, en lo relativo al material de refuerzo, podemos seleccionar tanto las capas donde aplicar el refuerzo, el patrón de relleno, densidad, el uso de anillos concéntricos de fibra o los ángulos en los que se coloca dicha fibra de refuerzo.

6.2.2. Propuestas iniciales de impresión.

Una vez realizado el modelado 3D de las piezas y una vez establecidas todas las variables de diseño antes mencionadas, se puede avanzar hacia la impresión de un primer prototipo. Es importante recalcar que en estas primeras impresiones no se están considerando los esfuerzos a los que están sometidas, por lo que antes de considerar un modelo definitivo habrá que realizar un análisis y estudio de las mismas. Estos primeros prototipos sirven para comprobar que las medidas realizadas en primera instancia son correctas, que las piezas impresas encajan dentro de sus respectivos conjuntos y para detectar defectos o modificaciones que deban ser consideradas en futuras impresiones.

A. Propuesta para mordaza.

La primera propuesta de garra para mordaza a imprimir es la siguiente:

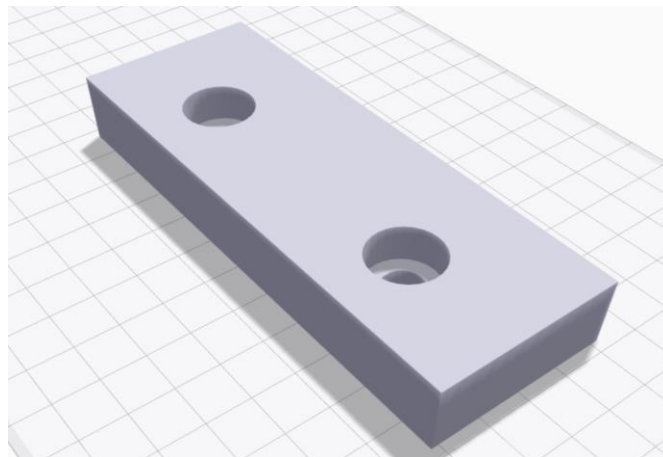


ILUSTRACIÓN 59: PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA MORDAZA

TABLA 7: DATOS PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA MORDAZA

Detalles de la pieza		Parámetros de la pieza	
Dimensiones	115.0mm x 41.2mm x 19.1mm	Altura de capa	0.1mm
Tiempo de impresión	6h 26m	Patrón de relleno	Triangular
Peso total	47.38g	Densidad de relleno	37%
Volumen de plástico	40.15 cm ³	Capas suelo y techo	4
Coste de material	9.54 USD	Capas paredes	2
Material base	Onyx	Material de refuerzo	Ninguno

B. Garra para plato.

La primera propuesta de garra para plato a imprimir es la siguiente:

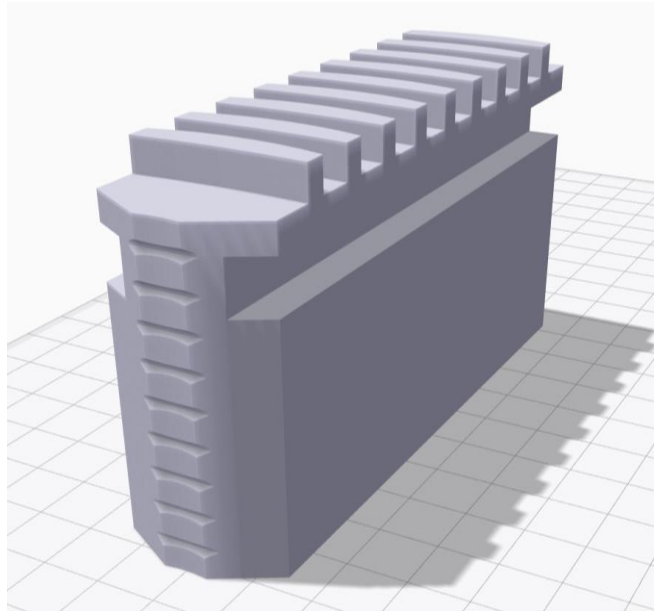


ILUSTRACIÓN 60: PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA PLATO DE GARRAS

TABLA 8: DATOS PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA PLATO DE GARRAS

Detalles de la pieza		Parámetros de la pieza	
Dimensiones	105mm x 27mm x 69mm	Altura de capa	0.1mm
Tiempo de impresión	16h 1m	Patrón de relleno	Triangular
Peso total	103.04g	Densidad de relleno	40%
Volumen de plástico	92.42 cm ³	Capas suelo y techo	4
Coste de material	21.95 USD	Capas paredes	3
Material base	Onyx	Material de refuerzo	Ninguno

Es conveniente recordar que la garra impresa se corresponde con la garra relativa a la posición 3 del plato (lo que condiciona la posición de los dientes), por lo que únicamente puede emplearse en dicha posición. Para las otras dos garras que componen el plato el diseño cambia y será necesario imprimir dichas piezas más adelante.

6.2.3. Resultados de impresión.

Una vez obtenidos los primeros prototipos es necesario realizar una serie de comprobaciones. En primer lugar, habrá que realizar una fase de post-procesado en aquellas piezas donde sea necesario para eliminar, por ejemplo, el material de soporte necesario. En segundo lugar, será necesario comprobar que la pieza impresa se corresponde con el modelo 3D realizado y, en último lugar, comprobar la funcionalidad de estas piezas sustituyéndolas por las originales en sus respectivos conjuntos de sujeción.

En caso de que todo sea correcto se podrá proceder al análisis de fuerzas y a la modificación de las piezas y parámetros originales en función de las necesidades de resistencia o funcionalidad buscadas. En caso de que no, será necesario repetir el proceso hasta ahora, realizando las modificaciones pertinentes en el modelo 3D y en la propuesta previa a la impresión.

A. Resultados de impresión de garra para mordaza.

El primer prototipo de mordaza resulta acorde con la propuesta planteada. Con la orientación de la pieza antes mostrada, la impresión no requiere ningún tipo de material de soporte, por lo que no es necesario ningún post-procesado de la misma y, además, el acabado superficial es de gran calidad en todas las caras de la pieza.



ILUSTRACIÓN 61: RESULTADO DE IMPRESIÓN DE GARRA PARA MORDAZA

Se realiza a continuación una comprobación de las medidas usando los mismos elementos empleados en la pieza original. Se observa que se corresponde con la pieza original. En cualquier caso, la comprobación más importante se realiza sobre la mordaza completa, sustituyendo una de sus garras originales por la recién impresa. En la siguiente imagen se puede comprobar que la garra encaja correctamente dentro del conjunto y queda unida al él mediante los dos tornillos.

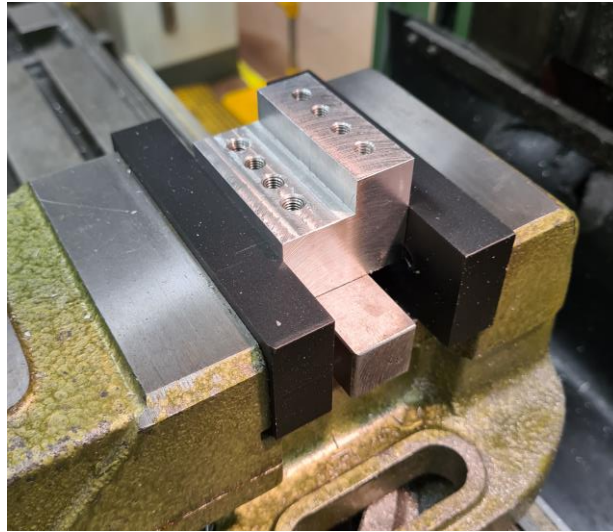


ILUSTRACIÓN 62: GARRA PARA MORDAZA SUJETANDO UNA PIEZA

Así, se puede concluir que el acabado y dimensiones son los buscados, por lo que podemos avanzar, tomando como base este prototipo, hacia un análisis de fuerzas para garantizar su capacidad de aportar la fuerza de sujeción necesaria durante la operación de fresado.

B. Resultados de impresión de garra para plato.

En el caso de la garra para plato de garras hablamos de una pieza de mayor complejidad. El amarre de esta pieza con el resto del conjunto no se realiza por medio de dos tornillos sino a través de los dientes que deben permitir no solo garantizar el apriete de la pieza durante el torneado, sino ajustar la apertura de forma simultánea con las otras dos garras que componen el plato.



ILUSTRACIÓN 63: RESULTADO IMPRESIÓN GARRA PARA TORNO



ILUSTRACIÓN 64: GARRA PARA TORNO Y MATERIAL DE SOPORTE

Inicialmente, al igual que con la garra de mordaza, se puede apreciar que el acabado superficial es de gran calidad. No obstante, en este caso si es necesario eliminar el material de soporte, el cual ha sido colocado en los dos railes que hacen encajar la garra con el plato, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

Al igual que con la garra de mordaza, fue necesario comprobar las dimensiones de la pieza impresa y contrastarlas con las de la original. De nuevo, la prueba definitiva es montar la garra en el plato original y verificar que mantiene la funcionalidad de la pieza original y su capacidad de sujeción de piezas para mecanizar.



ILUSTRACIÓN 65: DETALLE DE LA GARRA ENCAJADA EN EL PLATO



ILUSTRACIÓN 66: GARRA PARA TORNO SUJETANDO UNA PIEZA



ILUSTRACIÓN 67: COMPROBACIÓN DE QUE LAS GARRAS ENCAJAN ENTRE SÍ

Así, se puede concluir que el acabado y dimensiones son los buscados, por lo que podemos avanzar, tomando como base este prototipo, hacia un análisis de fuerzas para garantizar su capacidad de aportar la fuerza de sujeción necesaria durante la operación de torneado.

6.3. Análisis de las fuerzas de sujeción.

El objetivo de este apartado es conocer los esfuerzos a los que están sometidas nuestras piezas a analizar. Para ello se recurrirá tanto a los datos proporcionados por el fabricante apoyado en un análisis matemático. El propósito de conocer el valor de las fuerzas de sujeción es el de poder realizar un análisis por elementos finitos y poder conocer las tensiones a las que se encuentran sometida la pieza en cada uno de sus puntos. Con esta información, podemos conocer de forma previa a la impresión de la pieza si soportará las cargas de trabajo y, en caso de que no las soporte, podremos conocer las secciones donde añadir el material de refuerzo.

El análisis de las fuerzas de sujeción se realizará de manera independiente para cada una de las dos piezas a analizar.

6.3.1. Análisis de fuerzas de sujeción para garra de mordaza.

En el caso de la mordaza empleada en las operaciones de fresado, la fuerza de sujeción viene limitada por la propia capacidad de la mordaza de ejercer dicha fuerza. Es decir, no son las garras que componen la mordaza los elementos que limitan la máxima fuerza de sujeción y, por tanto, las condiciones más extremas de funcionamiento. Por ello, el objetivo es garantizar, para la mordaza descrita, las mismas condiciones de funcionamiento, incluyendo sus casos más extremos, empleando las garras fabricadas en aditiva.

La mordaza empleada es una mordaza hidráulica de la marca Crucelegui y modelo H3-150 NC. De los datos aportados por el fabricante se conoce que, usando los accesorios originales, la fuerza de apriete máxima que puede proporcionar es de 4000Kg. Se estudia a continuación la situación de las garras en el caso más extremo.

A partir de esta información:

Fuerza de apriete soportada por cada garra: $4000 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 39.240 \text{ N}$

Conociendo dicha fuerza y el área de cada mordaza se obtiene la presión sufrida por la cara en contacto con la pieza de trabajo.

Área de la cara en contacto con la pieza: $115 \times 2 \times \pi \times 7,8^2 = 4333,731 \text{ mm}^2$

Por tanto, la presión sufrida por la cara:

$$\frac{39240 \text{ N}}{433,731 \text{ mm}^2 / 10^6} = 9.008.820,793 \text{ Pa} = 9.008,82 \text{ KPa}$$

6.3.2. Fuerzas de sujeción en el plato de garras de un torno paralelo.

La función del plato de garras es absorber las fuerzas y momentos generados durante la operación de mecanizado. La fuerza total absorbida por el plato se obtiene de la suma aritmética de las fuerzas radiales que las garras ejercen sobre la pieza a mecanizar.

Antes de aplicar revoluciones al plato de garras, es decir, cuando el plato está detenido aparece la primera fuerza. Esta fuerza es la fuerza de sujeción inicial, la cual es regulada por el operario a través de la llave de apriete del plato (Rodríguez, 2021).

Después de aplicar revoluciones al plato de garras, debido a las masas propias de la pieza y del plato aparece una fuerza centrífuga. En función de cómo sea el agarre, que podría ser tanto exterior como interior, esta fuerza centrífuga adicional se suma o resta a la fuerza de sujeción inicial antes descrita.

Por tanto, la fuerza de sujeción para una operación de torneado varía según la fuerza centrífuga que aparece, la cual varía a su vez según el número de revoluciones aplicadas.

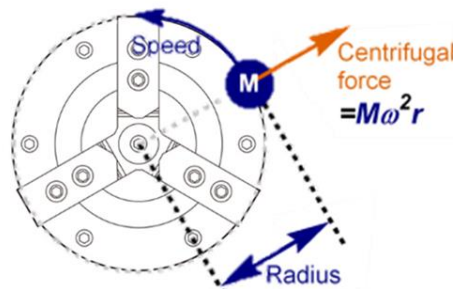


ILUSTRACIÓN 68: FUERZA CENTRÍFUGA EN PLATO DE GARRAS

Basándonos en lo anterior, la fuerza de sujeción durante el mecanizado será de la forma:

$$F_{suj} = F_{suj,0} \pm F_c$$

$$F_c = M \times w^2 \times r$$

Con M la masa, w la velocidad angular y r el radio del plato.

Además, se razona que la fuerza centrífuga será negativa si el agarre es exterior (desde las caras exteriores de la pieza) y positiva si el agarre es interior (desde las caras interiores de la pieza).

Por consiguiente, es necesario determinar la fuerza de sujeción inicial.

Por otro lado, en toda operación de torneado aparecen tres fuerzas; una fuerza de corte principal F_s , una fuerza de avance F_v y una fuerza pasiva F_p . Durante el mecanizado, las fuerzas de avance y pasiva son absorbidas por las caras de las garras en contacto con la pieza a mecanizar. En cuanto a la fuerza de corte principal, esta crea un momento que debe ser absorbido por el plato (Rodríguez, 2021).

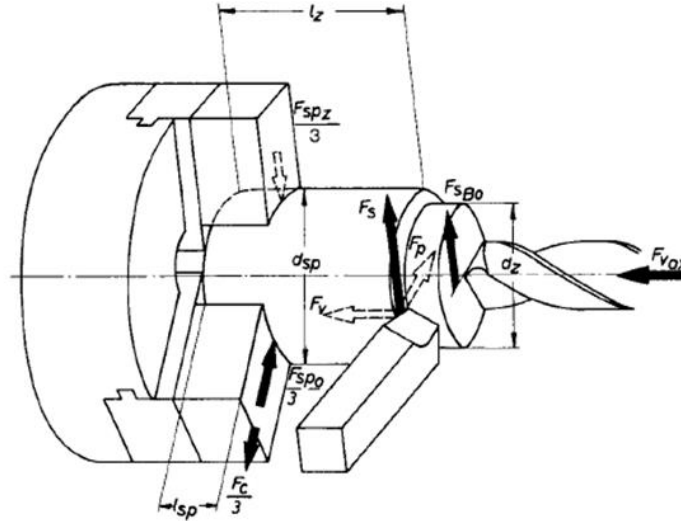


ILUSTRACIÓN 69: FUERZAS EN UN PLATO DE GARRAS DURANTE EL MECANIZADO

Con todo esto, se puede determinar la fuerza de apriete requerida, condicionado por el momento producido por la fuerza de corte principal, con el plato estacionario.

$$F_{spz} = \frac{F_s \times S_z}{\mu} \times \frac{d_z}{d_{sp}}$$

$$F_s = s \times t \times k_c$$

Con F_s la fuerza de corte principal, d_z diámetro del mecanizado, d_{sp} diámetro de la pieza donde está sostenida, S_z factor de seguridad, μ coeficiente de fricción entre garra y pieza, s avance, t profundidad de corte y k_c fuerza de corte específica.

No suele ser necesario incluir en la fórmula anterior las fuerzas pasivas y de avance, aunque en aquellos casos más extremos, se contempla dentro del factor de seguridad.

Finalmente, podemos llegar a la siguiente expresión que determina la fuerza de sujeción inicial (Rodríguez, 2021):

$$F_{sp0} = S_{sp} \times (F_{spz} \pm F_c)$$

Con S_{sp} el factor de seguridad para el agarre inicial y F_c la fuerza centrífuga total de las garras del plato

Con todo lo anterior, se podría calcular la fuerza de sujeción necesaria para cualquier situación en función de todos los parámetros de operación posibles, respetando siempre los límites y especificaciones del propio torno convencional.

Al igual que en el caso de la mordaza en fresado, al estar analizando un elemento de un conjunto más grande, el objetivo es determinar los esfuerzos que las garras diseñadas deben aguantar para garantizar las mismas condiciones que de funcionamiento del plato de garras estudiado con sus accesorios originales.

Dicho plato puede proporcionar una fuerza de sujeción total de 63kN. Dicha fuerza se transmite del plato de garras a la pieza a mecanizar a través de las garras. Además, al trabajar con un plato de tres garras, la fuerza queda distribuida entre las tres. Por tanto, cada garra debe de ser capaz de proporcionar 21kN de fuerza, lo cual se traduciría en la fuerza de sujeción máxima aportada por el fabricante.

6.4. Análisis por elementos finitos

En este apartado se pretende someter las piezas diseñadas a un análisis computacional basado en los elementos finitos. El objetivo de este análisis es, partiendo de las fuerzas conocidas y las condiciones de funcionamiento de las piezas a estudiar, conocer el comportamiento global de la pieza, conocer las tensiones y deformaciones que aparecen en condiciones normales de trabajo, detectar los puntos o secciones críticas y obtener una referencia a la hora de imprimir nuevas versiones de las piezas con material de refuerzo.

Para realizar este análisis es necesario conocer las propiedades del material, incluyendo la densidad de relleno y el patrón empleado, la situación de las fuerzas y su magnitud y el papel del resto de secciones de la pieza o condiciones de contorno, es decir, si se tratan de puntos fijos, secciones libres o secciones con movimientos restringidos.

El análisis de las piezas se realiza en dos bloques; uno para la garra de la mordaza en fresado y otro para la garra del plato para operaciones de torneado.

6.4.1. Análisis por elementos finitos para garra de mordaza.

Para este análisis se han incluido las siguientes consideraciones:

- La fuerza de sujeción se aplica sobre la cara donde los agujeros tienen mayor diámetro. La presión aplicada sobre esta cara es la calculada en el apartado anterior.
- Se consideran como caras fijas la cara donde los agujeros tienen mayor diámetro y las dos caras en contacto con la cabeza de los tornillos, los cuales unen las garras al resto de la mordaza.
- Las propiedades del material son las especificadas por el fabricante, siendo el material Onyx sin ningún tipo de refuerzo.
- El resto de las propiedades a incluir en la simulación son las mismas valoradas en la primera impresión de la pieza.

Por todo lo anterior, se obtienen los siguientes resultados:

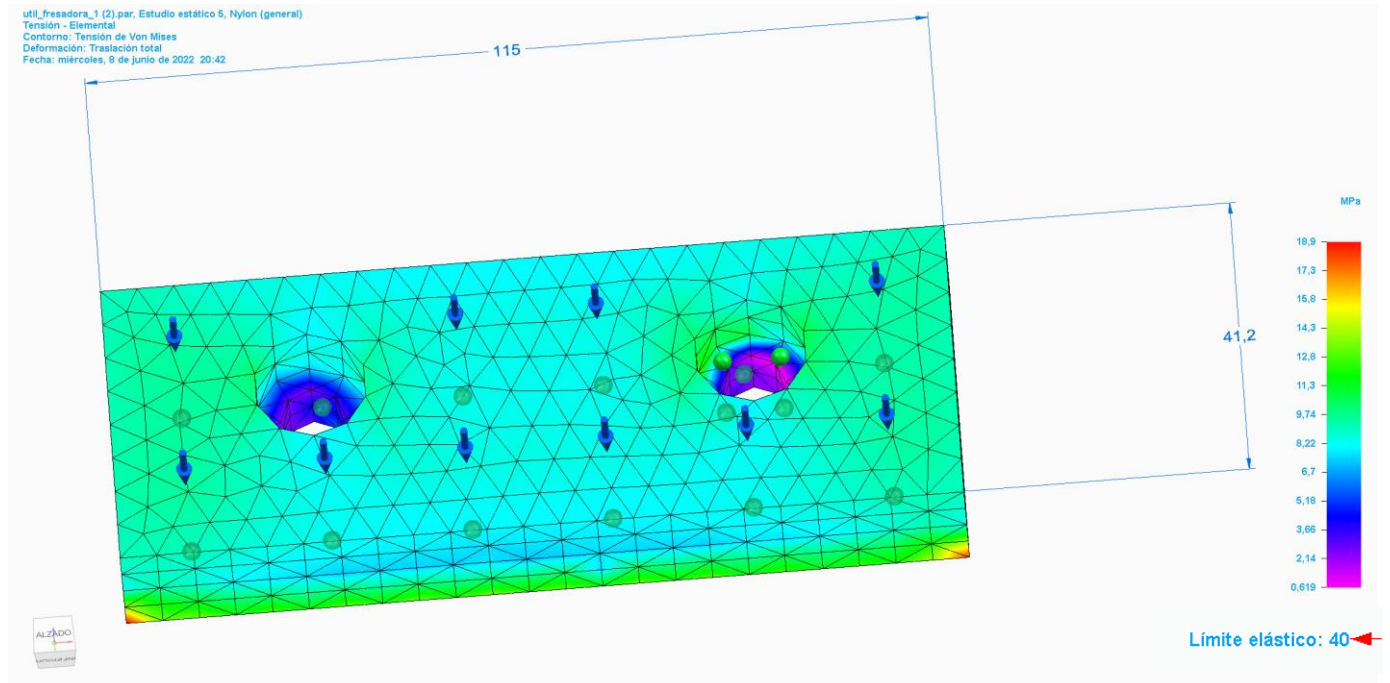


ILUSTRACIÓN 70: RESULTADOS DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE GARRA PARA MORDAZA (1)

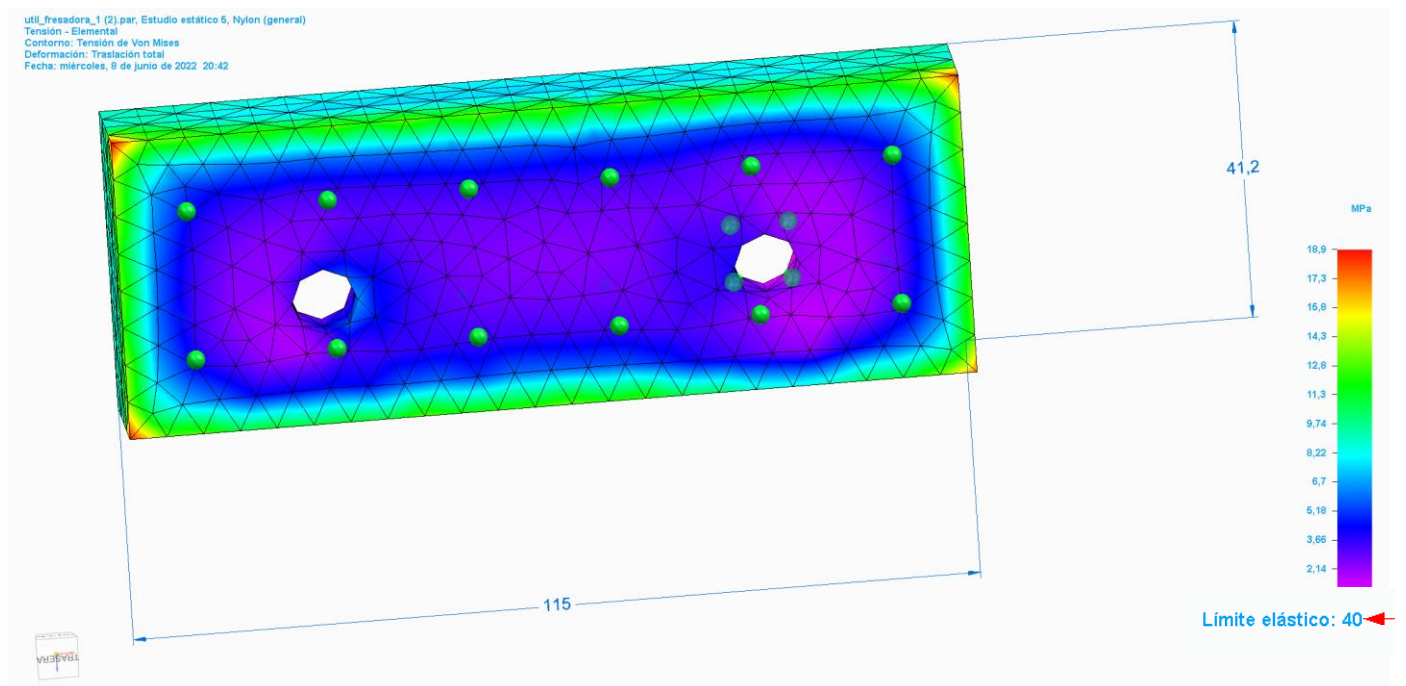


ILUSTRACIÓN 71: RESULTADO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE GARRA PARA MORDAZA (2)

La primera conclusión que podemos obtener es que la pieza, tal y como ha sido diseñada e impresa en primera instancia, es capaz de soportar los esfuerzos exigidos por la mordaza durante una operación de trabajo para el caso límite definido por el fabricante.

También cabe destacar la sección más crítica de la pieza. Dicha sección donde las tensiones son mayores se corresponde con la cara opuesta a la aplicación de la fuerza, es decir, con la cara en contacto con el resto de la mordaza. Los puntos críticos se concentran en el contorno de esta cara alcanzando un máximo de aproximadamente 18,9MPa en las esquinas de dicha cara.

Posteriormente, y antes de obtener conclusiones definitivas sobre la pieza, se realizarán ensayos reales sobre los prototipos ya impresos. En cualquier caso, de aplicar material de refuerzo, tendría que aplicarse sobre la zona antes descrita.

6.4.2. Análisis por elementos finitos para garra de plato.

Para este análisis se han incluido las siguientes consideraciones:

- La fuerza de sujeción se aplica sobre la cara principal, la cual cuenta con una sección más reducida que el grueso de la pieza y cuenta con una ligera curvatura para un mejor agarre de la pieza a mecanizar.
- Se consideran como caras fijas ambos lados de las caras de los dientes que componen las garras.
- Se consideran como secciones que deslizan a lo largo de la superficie las caras de los canales donde va insertada la pieza, y las paredes de la parte superior de la pieza (aquellas secciones que incluyen las dos caras de menor sección de los dientes de la garra).
- Las propiedades del material son las especificadas por el fabricante, siendo el material Onyx sin ningún tipo de refuerzo.
- El resto de las propiedades a incluir en la simulación son las mismas valoradas en la primera impresión de la pieza.

Por todo lo anterior, se obtienen los siguientes resultados:

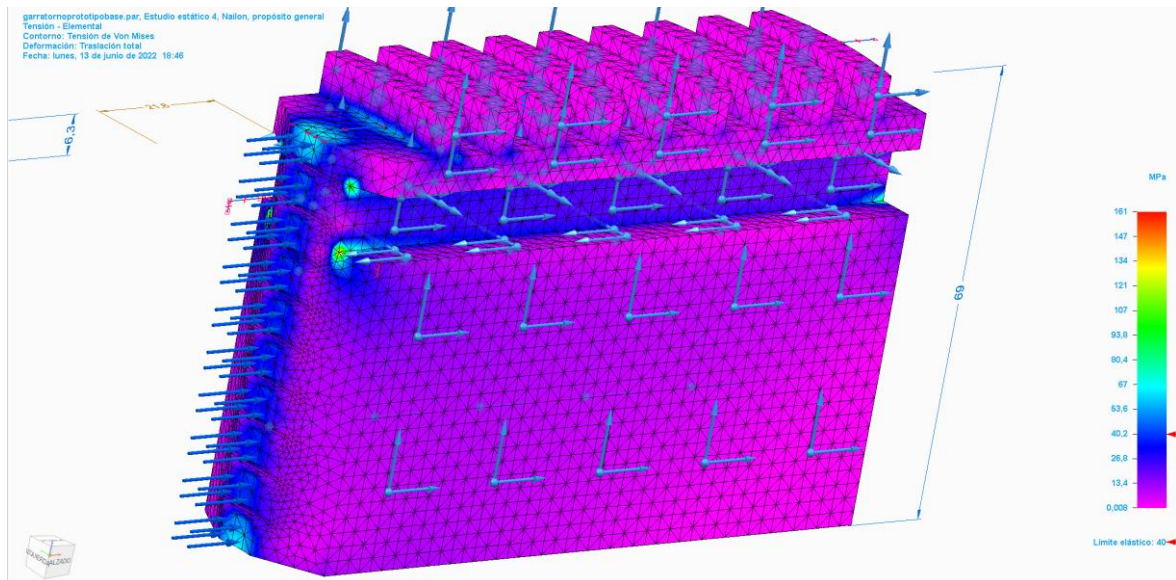


ILUSTRACIÓN 72: RESULTADOS DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE GARRA PARA PLATO (1)

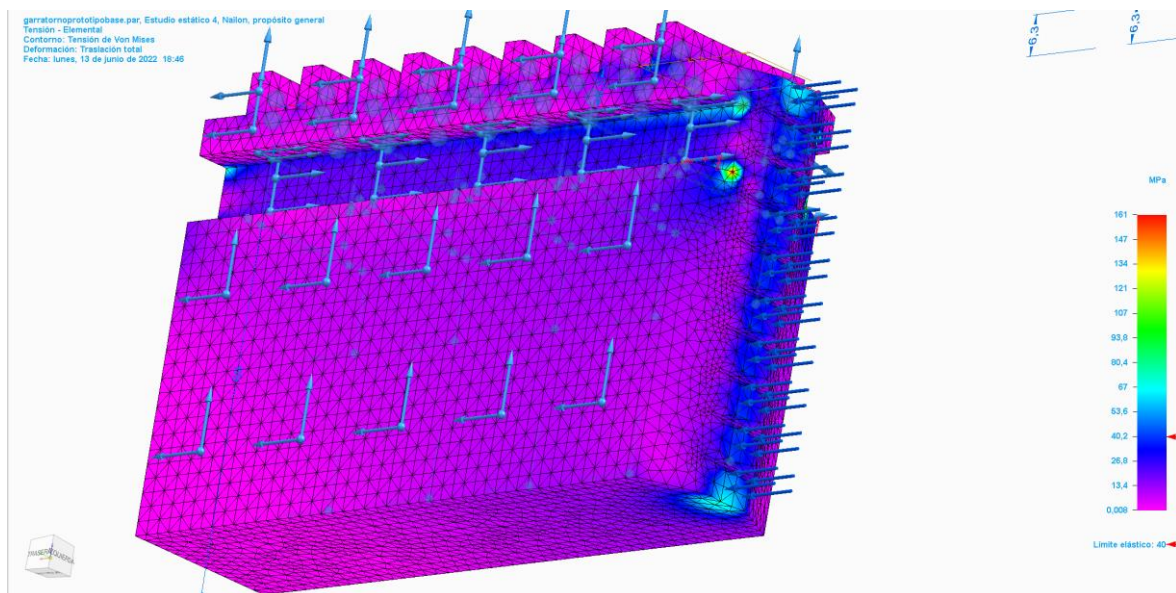


ILUSTRACIÓN 73: RESULTADOS DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE GARRA PARA PLATO (2)

A diferencia de la garra para mordaza, en este caso si se supera el límite elástico del material en algunas zonas de las piezas. Los puntos más llamativos son aquellos donde se produce una concentración de tensiones, los cuales se corresponden con los puntos en la intersección del canal con la cara principal en ambos lados de la pieza. Una posible solución para dichos puntos sería buscar un redondeo adecuado para dispersar las tensiones y evitar puntos de concentración de tensiones elevadas.

Aunque este sería el resultado para una situación límite de funcionamiento, se aprecia que en la superficie de la garra con la pieza a mecanizar las tensiones son muy cercanas al límite elástico del material, superándose en la parte inferior y superior de la cara. Por tanto, bajo estas condiciones se produciría una ligera deformación de la pieza, concentrada en la zona de aplicación de la fuerza de sujeción.

Del mismo modo, las tensiones también son elevadas en angulas zonas de las caras de los canales y en la base de los dientes, especialmente en el primero de ellos.

Aunque en condiciones normales la pieza no sufriría deformaciones de importancia y podría ser válida, para este garantizar el funcionamiento en este caso límite sería conveniente añadir material de refuerzo en las secciones críticas antes comentadas. De esta forma sólo se refuerzan las zonas que lo necesiten y aquellas zonas donde las tensiones quedan por debajo del máximo se mantiene las características iniciales del prototipo.

Posteriormente, y a modo de comprobación de la funcionalidad del primer prototipo impreso, se realizarán operaciones de torneado en condiciones normales de funcionamiento y de ser necesario se propondrán modificaciones en base a las conclusiones de los ensayos.

6.5. Diseño generativo.

Tanto el análisis por elementos finitos como el análisis o diseño generativo parten del mismo punto, es decir, de conocer las fuerzas de trabajo o fuerzas máximas que deben soportar las piezas a analizar y las condiciones de contorno que deben considerarse para realizar un análisis acorde con la realidad.

Sin embargo, el objetivo del diseño generativo es otro. El objetivo del diseño generativo es conocer si es posible reducir el volumen de material de nuestra pieza, restando de aquellas partes donde no sea necesario para garantizar el funcionamiento bajo cargas de la pieza. Es decir, se trata de identificar aquellas zonas que no aportan a la integridad estructural de la pieza y, de existir esas zonas, optimizar el diseño de la pieza.

Esta optimización permite reducir el material empleado y, por tanto, el tiempo e incluso el precio de impresión, además del peso final de la pieza. La gran desventaja del diseño generativo como ya se ha comentado con anterioridad, es tiende a crear geometrías complejas para lograr esa reducción en peso. Sin embargo, la capacidad de poder trabajar con geometrías complejas es uno de los puntos fuertes de la fabricación aditiva.

Por todo lo anterior, el objetivo de este apartado es conocer si es posible reducir la cantidad de material empleado, siendo la variable de diseño el porcentaje en peso a reducir. De ser posible se valorará la posibilidad de contemplar dichos diseños en futuras impresiones.

El análisis de las piezas se realiza en dos bloques; uno para la garra de la mordaza en fresado y otro para la garra del plato para operaciones de torneado.

6.5.1. *Diseño generativo de garra para mordaza.*

Para este análisis se han incluido las siguientes consideraciones:

- Todas las consideraciones contempladas en el análisis por elementos finitos en cuanto a material, fuerzas, zonas de aplicación y resto de condiciones de contorno.
- Es necesario en este análisis seleccionar aquellas regiones que deben ser preservadas en el análisis, es decir, aquellas superficies que no queremos que se vean modificadas.
- Las regiones que preservar serán en este caso los agujeros donde se alojan los tornillos, tanto el diámetro interior y exterior como la zona de apoyo de estos.
- Se toma como variable de diseño la reducción en peso, realizándose un análisis para reducir la masa en un 15% y en un 40%.

Resultados obtenidos para una reducción en masa del 15%:

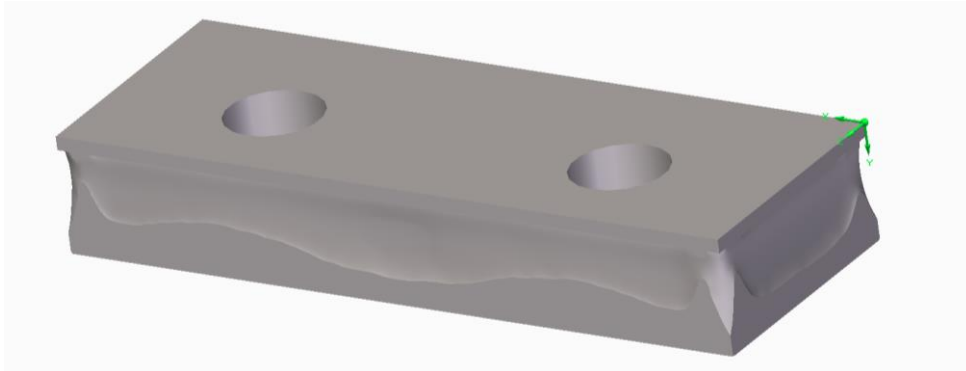


ILUSTRACIÓN 74: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA MORDAZA (1)

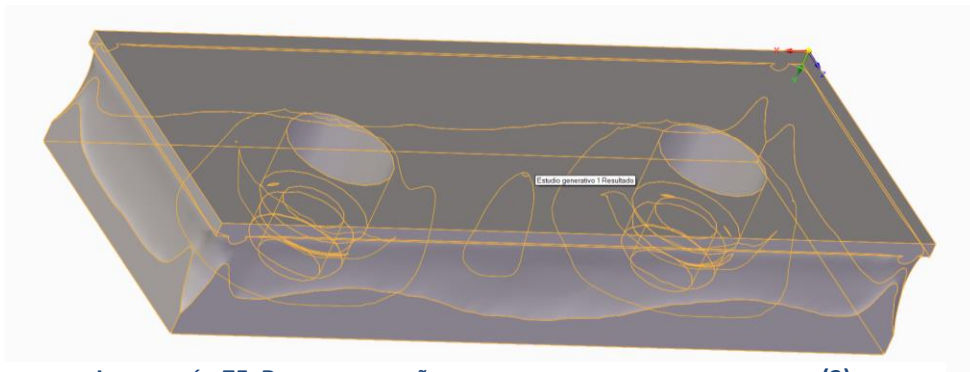


ILUSTRACIÓN 75: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA MORDAZA (2)

Resultados obtenidos para una reducción en masa del 40%:

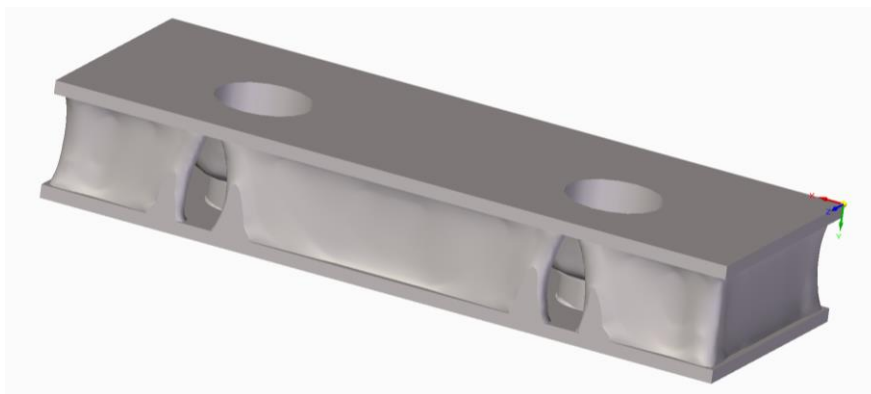


ILUSTRACIÓN 77: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA MORDAZA (3)

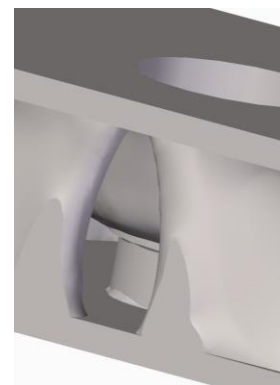


ILUSTRACIÓN 76: DETALLE REDUCCIÓN EN MASA POR DISEÑO GENERATIVO

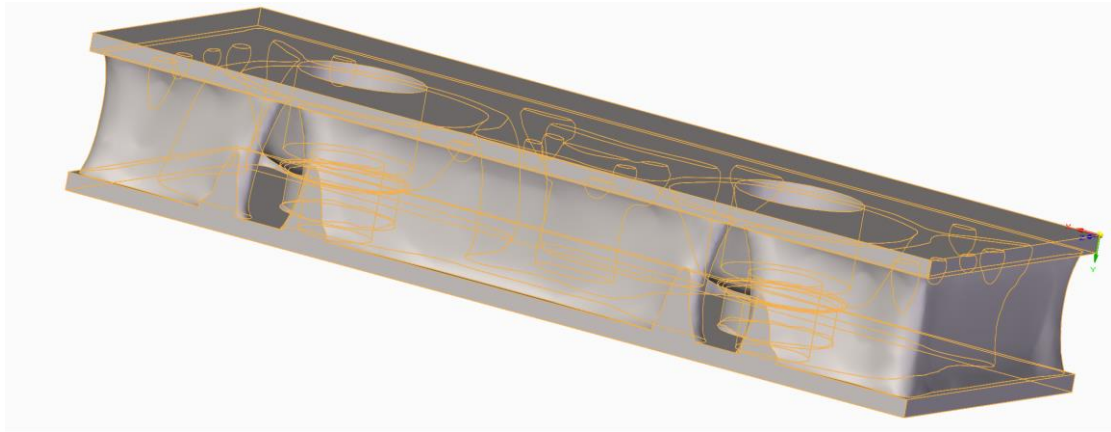


ILUSTRACIÓN 78: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA MORDAZA (4)

Los resultados anteriores nos muestran la geometría final de nuestra pieza tras la reducción de peso exigida como variable de diseño. Se puede observar que además de las caras seleccionadas a preservar, preserva la cara delantera como trasera.

Un diseño como el sugerido por el programa sería completamente descartado si se realizara partiendo de un proceso de fabricación convencional.

Aunque la impresora empleada permite crear dicha geometría y reducir tanto el peso como el tiempo de impresión, existen algunos inconvenientes. El principal de ellos es la dificultad de, una vez impresa la pieza, retirar el posible material de soporte que quedase dentro de la pieza, donde se observa que se reduce buena parte del material original. Por otro lado, aunque se podría afirmar que la pieza original cuenta con exceso de material, resulta conveniente mantener la forma original lo cual implica un mayor margen de seguridad frente a condiciones externas y una mayor resistencia al uso continuado de la pieza, condición que también se espera de las piezas diseñadas.

Debido a la geometría de la pieza, aunque el diseño generativo nos indica dónde se sitúa el material verdaderamente determinante en el funcionamiento de la pieza, no resulta conveniente plantear un segundo prototipo con dichas geometrías.

6.5.2. Diseño generativo de garra para mordaza.

Para este análisis se han incluido las siguientes consideraciones:

- Todas las consideraciones contempladas en el análisis por elementos finitos en cuanto a material, fuerzas, zonas de aplicación y resto de condiciones de contorno.
- Las regiones que preservar será la zona en contacto con la pieza a mecanizar (zona de aplicación de la fuerza de sujeción), las caras de los dientes que quedan en contacto con el resto del plato y que sirven para regular la apertura de las garras, y los canales que permiten alojar la garra en el plato.
- Inicialmente se contempla una reducción en peso del 5% y posteriormente un caso más extremo con una reducción del 15%.

Resultados obtenidos para una reducción en peso del 5%:

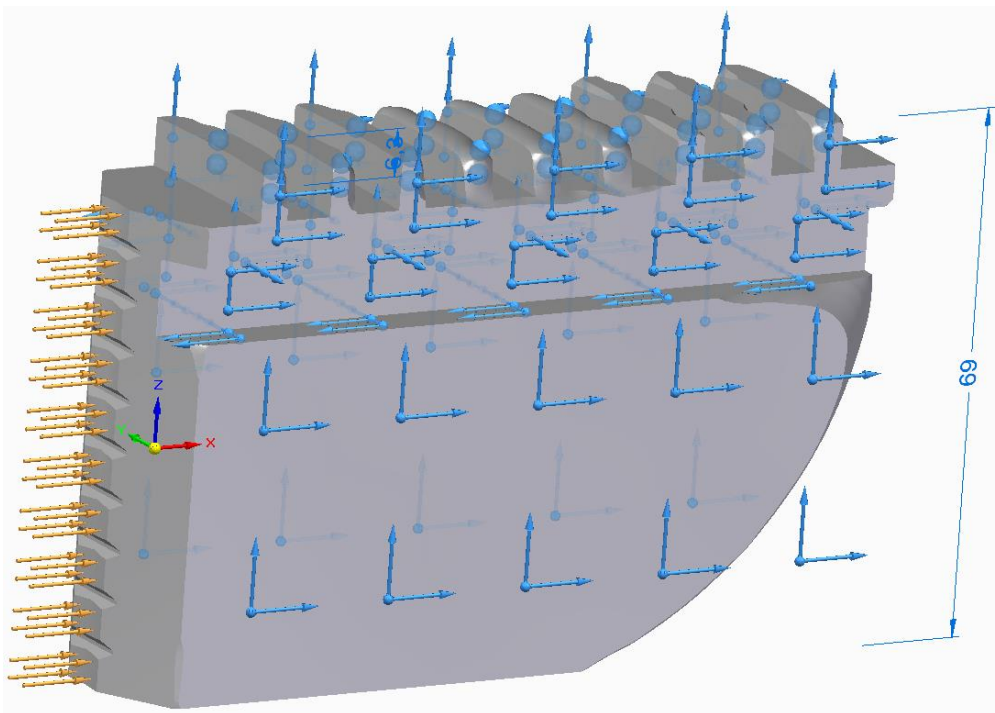


ILUSTRACIÓN 80: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA PLATO (1)

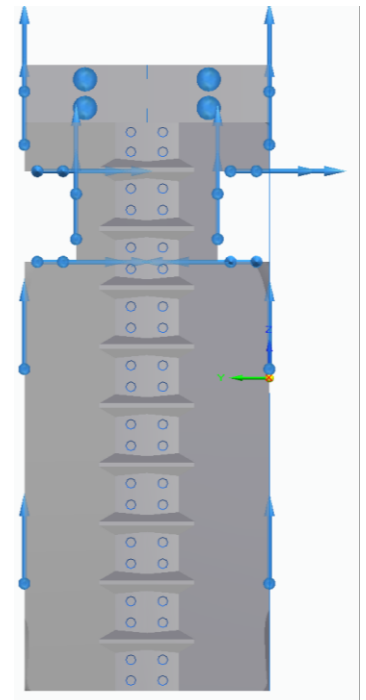


ILUSTRACIÓN 79: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA PLATO (2)

Resultados obtenidos para una reducción en peso del 15%:

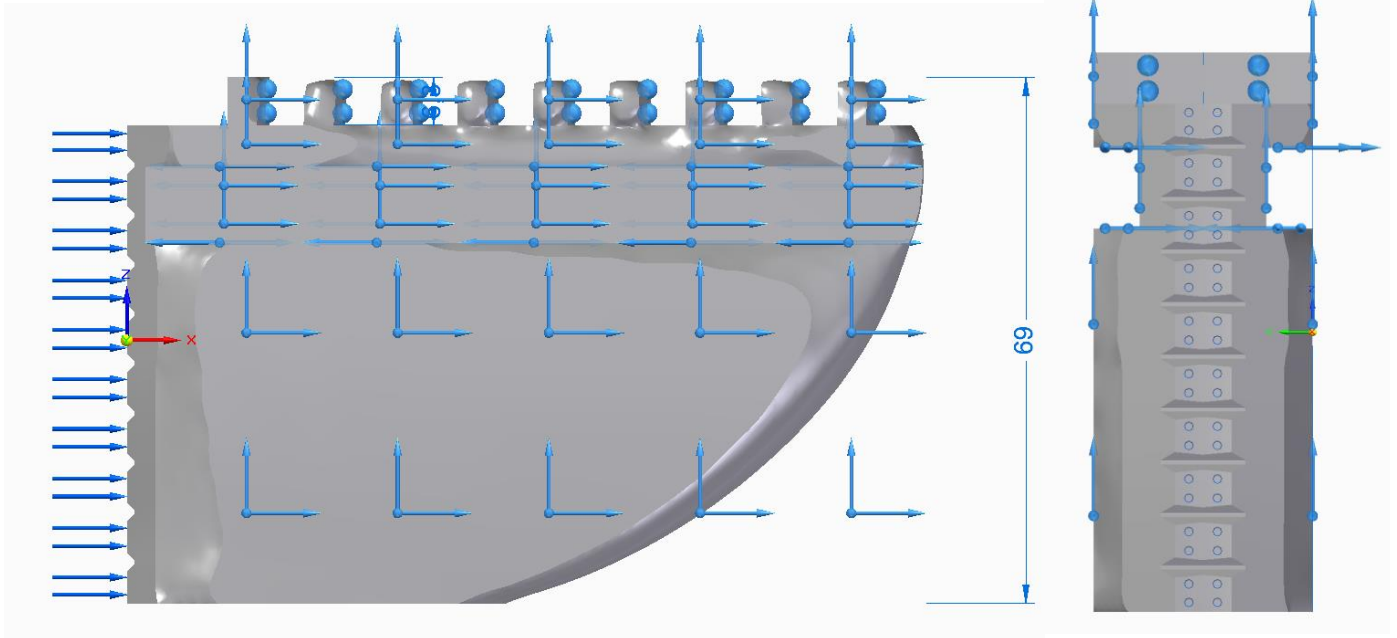


ILUSTRACIÓN 82: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA PLATO (3)

ILUSTRACIÓN 81: RESULTADO DISEÑO GENERATIVO DE GARRA PARA PLATO (4)

Aunque el análisis por elementos finitos nos indicase que es necesario reforzar algunas zonas, esto no implica que no se pueda reducir otras sin comprometer la funcionalidad de la pieza buscada.

Vemos que ambos diseños tienen dos aspectos en común. El primero de ellos es que ambos mantienen intacto la cara principal de la pieza, aquella donde se aplica la fuerza de sujeción, en parte debido a que se corresponde con la cara donde se presentan las tensiones más elevadas. El segundo, es que la reducción en masa se produce en ambos casos en la zona inferior de la cara contraria a la de aplicación de la fuerza. Esto quiere decir, que es esta parte de la pieza la que menos contribuye a dar la funcionalidad y la resistencia necesaria durante el mecanizado.

Esto se corresponde con algunos modelos ofrecidos por los fabricantes, que reducen la masa de la pieza en dicha zona además de darle una funcionalidad extra, como puede ser la posibilidad de realizar un agarre interior de la pieza.

En un proceso de fabricación convencional, cuanto más complicada sea la geometría buscada, incluso cuando supone un ahorro de material, suele implicar un aumento considerable del precio. En fabricación aditiva, aunque al complicar la geometría aumentan los tiempos de fabricación, si resulta conveniente considerar una reducción en peso ya que se traduce directamente en una reducción de los costes de fabricación.

Así, en prototipos posteriores, se mantendrá la cara principal de la garra y la zona de los dientes, pero se reducirá el volumen de la pieza de acuerdo con el análisis generativo antes expuesto. También se considerará la posibilidad de dar una funcionalidad extra a la garra.

6.6. Nuevos prototipos y modificaciones.

Una vez realizadas las primeras impresiones y un primer análisis de las piezas, se propone en este apartado posibles modificaciones para dar mayor funcionalidad a las mismas y las correcciones pertinentes basándose en los apartados anteriores.

De nuevo, en este apartado se analizan de forma separada las piezas relativas a la mordaza para fresado y al plato de garras para torneado.

6.6.1. Nuevo prototipo para garra de mordaza.

A priori, antes de realizar los ensayos reales, la garra de mordaza propuesta e impresa cumple con las condiciones de trabajo, tal y como nos corrobora la información relativa al análisis por elementos finitos. Por otro lado, el análisis o diseño generativo, nos propone soluciones de ahorro de peso excesivamente complejas como para ser consideradas.

No obstante, la mordaza de estudio plantea un inconveniente cuando se trabaja con piezas de pequeño volumen. Cuando la cara la de pieza que se apoya sobre las guías de la mordaza, si dicha sección es demasiado pequeña, puede no quedar suficientemente apoyada o caer entre las dos guías. Aunque las dos garras de la mordaza sujetarían firmemente la pieza durante la operación de torneado, podría darse el caso de que, durante el mecanizado, se empujase la pieza hacia abajo y se colase entre las dos guías, al no tener suficiente sección como para salvar la distancia entre dichas guías.

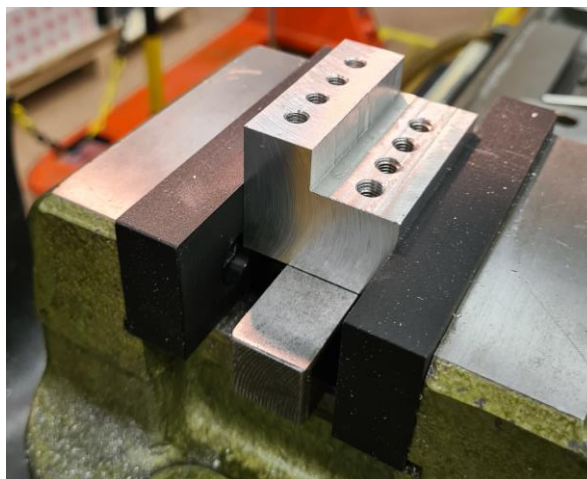


ILUSTRACIÓN 83: BARRA DE APOYO USADA PARA PIEZAS DE PEQUEÑA SECCIÓN

Dado el problema, se plantea una posible solución. La solución propuesta es incluir dentro de las garras de mordaza diseñadas una superficie o escalón que permita el apoyo de las piezas a mecanizar, incluso para aquellas de pequeña sección.

Así, las nuevas dimensiones de la pieza son de 115x41,2x34mm. Respecto al primer prototipo se incluye la superficie de apoyo, pero respetando los agujeros donde se alojan los tornillos.

Así, la propuesta de garra para mordaza a imprimir es la siguiente:

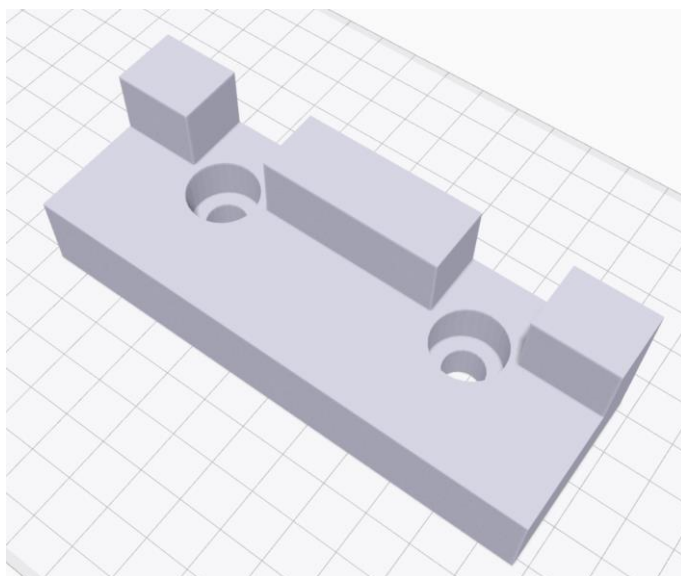


ILUSTRACIÓN 84: PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA MORDAZA

TABLA 9: ESPECIFICACIONES PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA MORDAZA

Detalles de la pieza		Parámetros de la pieza	
Dimensiones	115.0mm x 41.2mm x 34mm	Altura de capa	0.1mm
Tiempo de impresión	8h 23m	Patrón de relleno	Triangular
Peso total	58.37g	Densidad de relleno	37%
Volumen de plástico	49.47 cm ³	Capas suelo y techo	4
Coste de material	11.75 USD	Capas paredes	2
Material base	Onyx	Material de refuerzo	Ninguno

En el Anexo III se incluye el plano de la pieza descrita.

Como se ya se ha comentado, la gran ventaja de la impresión 3D es la posibilidad de adaptar las piezas a condiciones específicas de diseño y obtener dichas piezas en intervalos de tiempo cortos y si disponer de la disponibilidad o el grado de personalización de las piezas ofrecidas por el fabricante.

Este diseño supone un aumento de material del 23,2%, lo que implica un aumento del tiempo de impresión del 30,3% y un aumento del coste del 23,17%. Sin embargo, este no es el único inconveniente, ya que al reducir la superficie de agarre de las piezas y siendo la fuerza de sujeción la misma, aumenta la tensión aplicada sobre dicha cara.

Por tanto, y para asegurar de forma numérica la funcionalidad de la pieza durante el mecanizado, se realiza un nuevo análisis por elementos finitos para la pieza descrita.

A continuación, se incluyen los resultados obtenidos:

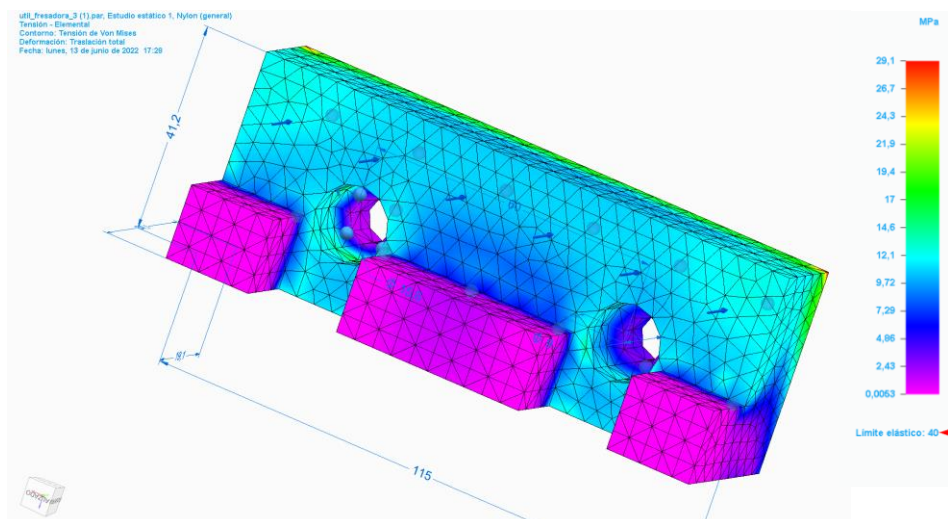


ILUSTRACIÓN 85: RESULTADO ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA MORDAZA (1)

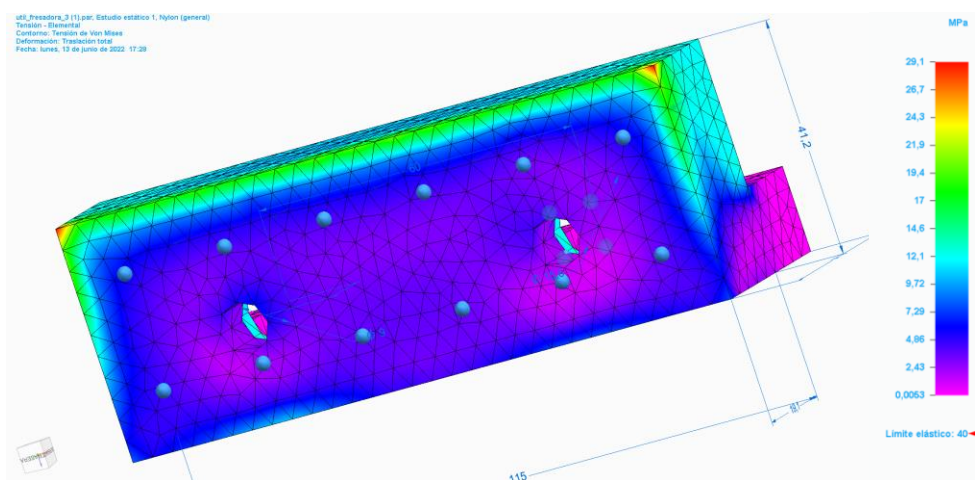


ILUSTRACIÓN 86: RESULTADO ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA MORDAZA (2)

Aunque en ningún punto se supera el límite elástico ni la tensión de rotura del material, vemos que la tensión máxima aumenta hasta 29,1 MPa, lo que supone un aumento de la tensión en los puntos críticos del 53,97% respecto al primer prototipo. Además, se aprecia que dichos puntos críticos, los cuales antes estaban situados en todas las esquinas de la cara en contacto con el resto de la mordaza, ahora se concentran en las equinas superiores de dicha cara, es decir, en las esquinas de dicha cara más alejadas de donde ahora existe ese escalón para el apoyo de la pieza a mecanizar.

Por tanto, desde el punto de vista mecánico, aunque las tensiones sufridas en la pieza son mayores, la integridad de la pieza parece estar garantizada durante el mecanizado bajo la fuerza de sujeción máxima aportada por el fabricante para el conjunto de la mordaza.

En cuanto a la impresión, además de los aumentos en peso, precio y coste ya descritos, no presenta ninguna variación respecto del caso base. En esta impresión tampoco es necesario material de soporte.

Por otro lado, para poder realizar ensayos con esta pieza se imprimirán, al igual que con el prototipo inicial, dos versiones de la pieza antes propuesta.

A modo de resumen, se puede verificar la ventaja competitiva de la fabricación aditiva en el desarrollo de prototipos. Vemos que ante un problema puntual que requiere de una funcionalidad concreta que las piezas aportadas por el fabricante no pueden proporcionar, la fabricación aditiva permite la adaptación, fabricación e implementación de dichas piezas en cortos periodos de tiempo. Por otro lado, aunque las condiciones de trabajo son más extremas, las buenas propiedades mecánicas, nos permiten seguir empleando este material sin la necesidad de refuerzo.

6.6.2. Nuevo prototipo para garra de plato.

Como ya se ha adelantado en el diseño generativo propuesto para la garra del plato de garras, se busca un prototipo que permita una reducción en peso. Además, se considerará la posibilidad de añadir la funcionalidad de trabajar con piezas mediante un agarre desde el diámetro interno de las mismas. Para ello, se replicarán las garras blandas incluidas con el plato original, las cuales permiten la funcionalidad propuesta.

El plato de garras con el que se trabaja cuenta con un diámetro dentado en espiral donde se alojan los dientes de las garras permitiendo además regular la apertura de las tres garras de forma simultánea. Tanto el primer prototipo ya impreso, como el que se propone ahora, corresponde con una de esas tres garras, en concreto la tercera. Estas garras tienen una geometría distinta en los respectivo a la posición de los dientes, lo que permite que todas las garras, al aumentar o disminuir la apertura del plato, queden equidistantes del centro de este.

Así la pieza propuesta es la siguiente:

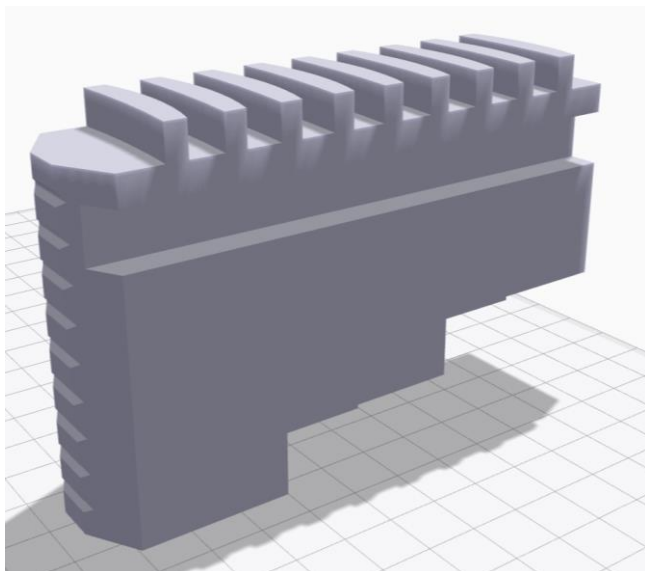


ILUSTRACIÓN 88: PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO (1)

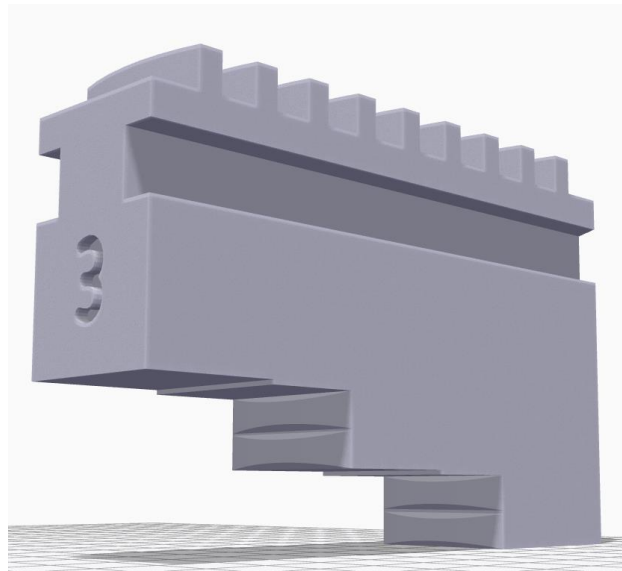


ILUSTRACIÓN 87: PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO (2)

TABLA 10: ESPECIFICACIONES PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO

Detalles de la pieza		Parámetros de la pieza	
Dimensiones	105mm x 27mm x 69mm	Altura de capa	0.1mm
Tiempo de impresión	15h 28m	Patrón de relleno	Triangular
Peso total	83.37g	Densidad de relleno	40%
Volumen de plástico	90.56 cm ³	Capas suelo y techo	4
Coste de material	21.51 USD	Capas paredes	3
Material base	Onyx	Material de refuerzo	Ninguno

Con esta propuesta no solo se consigue una reducción en peso, que sería de un 19.09%, sino que se le da la funcionalidad extra que suelen tener muchas de las garras disponibles en el mercado, que es la de poder usar una misma garra para mecanizar una pieza con un agarre tanto interno como externo.

Esta propuesta es un claro ejemplo de la ventaja competitiva, la cual se analizará más en detalle en apartados posteriores, ya que, para repuestos originales, las garras duras de este tipo tienen un precio considerablemente superior al de una garra blanda como la descrita

anteriormente. En nuestro caso, conseguimos reducir el precio final de la misma, ya que este depende principalmente de la cantidad de material y no de la complejidad de la pieza a fabricar, e incluso se consigue reducir el tiempo de impresión. También se ha incluido realizar un grabado sobre la pieza para indicar su posición correspondiente en el plato. De esta forma se valora también la enorme oferta de personalización que permite la fabricación aditiva.

Siguiendo el esquema de la garra para mordaza, se realiza un análisis por elementos finitos para esta nueva propuesta, para después compararla con los resultados obtenidos para el primer prototipo de garra para plato de torno.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

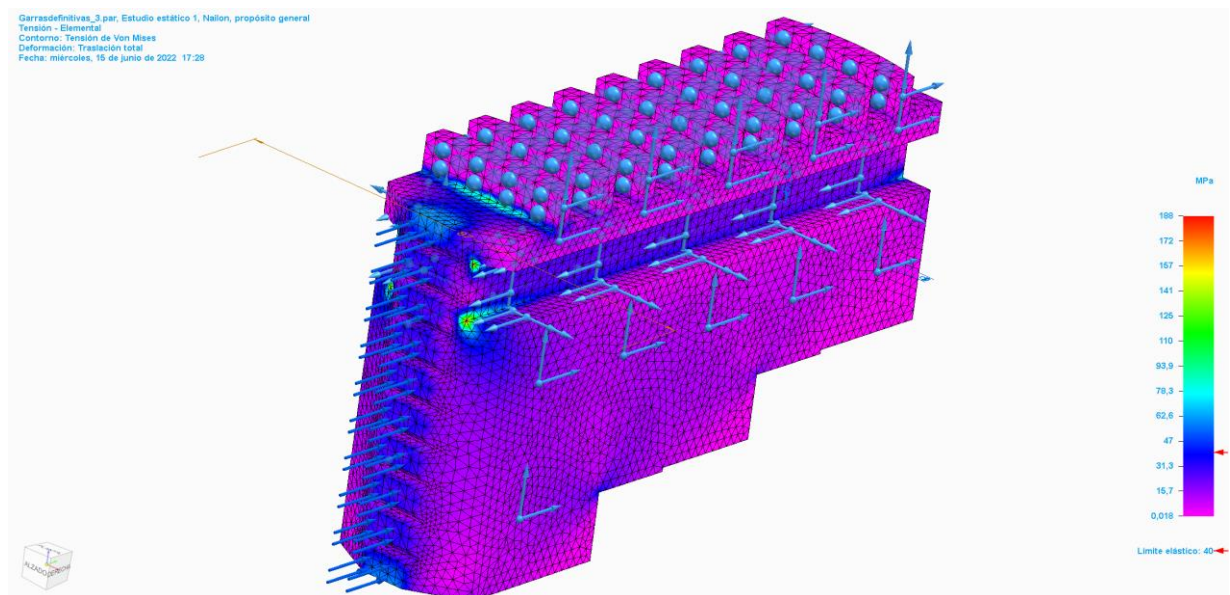


ILUSTRACIÓN 89: RESULTADO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO (1)

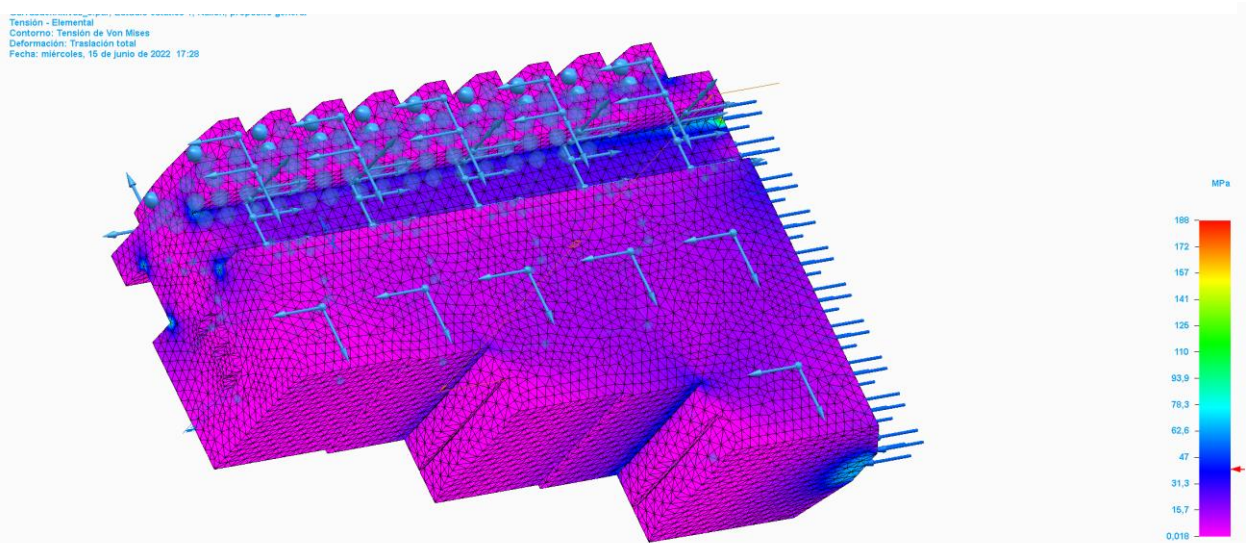


ILUSTRACIÓN 90: RESULTADO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO (2)

De los resultados anteriores se observa que bajo la carga máxima la respuesta de la pieza es muy similar a la del prototipo original, apareciendo los mismos puntos de concentración de tensión, y superándose el límite elástico en las mismas zonas antes comentadas. Esto confirma lo expuesto en el análisis o diseño generativo, lo cual nos indicaba aquellas zonas donde se podía reducir la cantidad de material sin modificar el comportamiento o integridad estructural de la pieza. De nuevo, es necesario hacer ensayos reales bajo distintas condiciones de funcionamiento para confirmar la funcionalidad de la pieza o realizar propuestas de refuerzo de esta.

Por otro lado, para poder realizar ensayos reales, será necesario contar con las otras dos garras que componen el torno. La única diferencia que estas presentan es la posición de los dientes. Cada una de estas mordazas, al igual que la antes comentada, tienen grabado en su parte trasera el número que corresponde con su posición en el plato de garras.

Para contar con estas piezas, se propone la siguiente impresión donde se pretende imprimir las otras dos garras de forma conjunta.

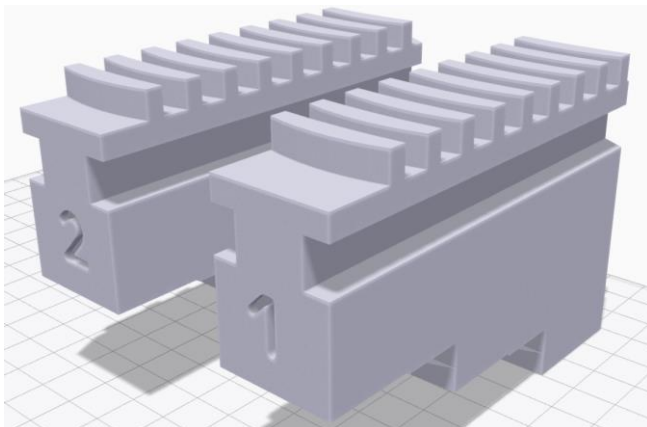


ILUSTRACIÓN 92: PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO
(GARRAS 1 Y 2) (1)

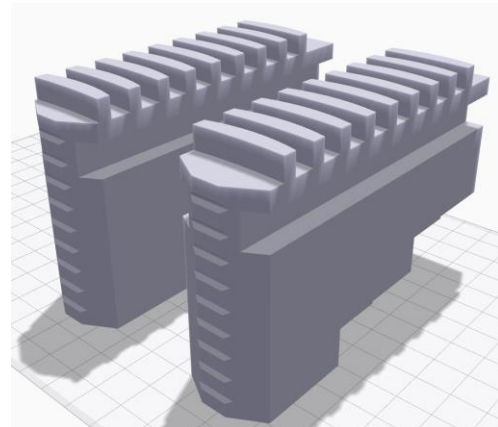


ILUSTRACIÓN 91: PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO
(GARRAS 1 Y 2) (2)

TABLA 11: ESPECIFICACIONES PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA PLATO (GARRAS 1 Y 2)

Detalles de la pieza		Parámetros de la pieza	
Dimensiones	2x105mm x 27mm x 69mm	Altura de capa	0.1mm
Tiempo de impresión	1d 6h	Patrón de relleno	Triangular
Peso total	166.62g	Densidad de relleno	40%
Volumen de plástico	180.86 cm ³	Capas suelo y techo	4
Coste de material	42.95 USD	Capas paredes	3
Material base	Onyx	Material de refuerzo	Ninguno

Una vez impresas estas piezas ya podrían realizarse los ensayos reales sobre el torno convencional. El imprimir dos piezas de forma simultánea no tiene un ahorro en precio o tiempo significativo, sin embargo, permite obtener las dos piezas, incluso se podría las tres garras a la vez, en una sola impresión, evitando tener que estar pendiente del estado de primera garra para poder hacer la segunda, o el tiempo necesario en retirar la pieza terminada y preparar y limpiar la bandeja de cara a la siguiente.

En cuanto a la impresión, el ahorro de material podría ser aún más significativo de no ser por el material de soporte. Además del material que ya aparecía en el primer prototipo, es necesario una cantidad considerable de material de soporte para poder imprimir la pieza en la posición indicada.

Aun así, el ahorro de tiempo y material hacen viable esta opción, sin embargo, la calidad superficial de la cara inferior de las piezas es menor que en comparación con el resto de las caras, debido precisamente a este material extra.

7. Resultados

Para poder responder a la pregunta acerca de si realmente estos utillajes de sujeción impresos con tecnologías de fabricación aditiva son realmente válidos para su uso en procesos de torneado o fresado es necesario realizar ensayos reales sobre las máquinas-herramientas. De esta forma, en este apartado se comentarán los resultados de los ensayos, así como un análisis final de las piezas impresas y una comparativa con las piezas originales. De ser necesaria alguna modificación se planteará la propuesta y se comentará su viabilidad.

7.1. Ensayo de piezas.

Siguiendo el esquema de apartados anteriores, los ensayos se dividen en las dos siguientes secciones:

7.1.1. Ensayo de garras para mordaza en operaciones de fresado.

Los primeros ensayos se realizarán sobre las dos propuestas de garra de mordaza ya comentadas con anterioridad, tanto la garra estándar como la garra que incluye soporte para piezas de pequeña sección.

En los ensayos se utilizará como pieza a mecanizar un cubo de aluminio 6082-T6. La mordaza se ajustará de forma que la pieza a mecanizar quede bien sujeta, igual que se haría en condiciones normales. Durante el ensayo se realizarán las siguientes operaciones:

- Una pasada de 1mm que se correspondería con condiciones normales de funcionamiento.
- Una pasada de 2mm que se correspondería con condiciones extremas de funcionamiento, ya que no es recomendable realizar pasadas de tanto espesor, para no dañar las herramientas de corte u otros elementos.

En primer lugar, se ensayó usando el primer prototipo de garra para mordaza, el cual se corresponde con la misma geometría que las garras originales. Para estas operaciones fue necesario utilizar una barra de sección cuadrada apoyada entre las dos guías para evitar que el prisma a mecanizar cayese entre estas.

Se incluyen las siguientes imágenes tomadas durante los ensayos mostrando la posición de cada uno de los elementos, la fresadora durante el mecanizado, y la pieza a mecanizar durante ambas pasadas:



ILUSTRACIÓN 96: ENSAYO PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA MORDAZA (1)



ILUSTRACIÓN 95: ENSAYO PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA MORDAZA (2)



ILUSTRACIÓN 94: ENSAYO PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA MORDAZA (3)

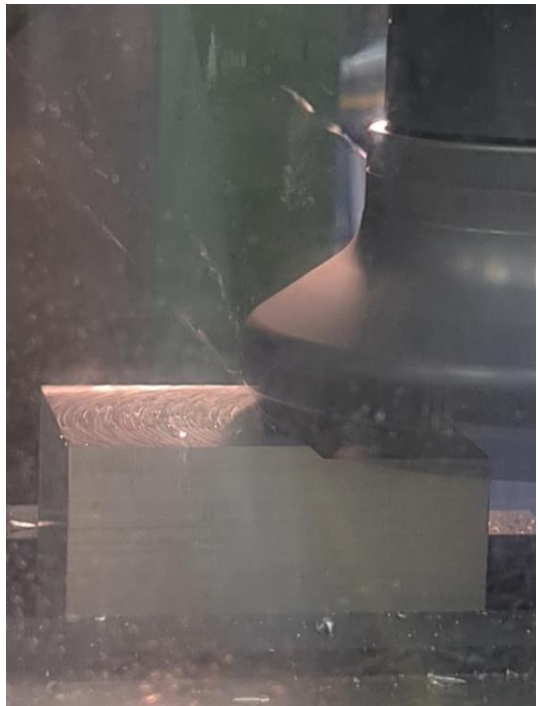


ILUSTRACIÓN 93: ENSAYO PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA MORDAZA (4)

Los ensayos realizados para ambas pasadas fueron satisfactorios, la pieza pudo mecanizarse sin ningún tipo de inconveniente, no se observaron movimientos de ningún tipo durante el mecanizado y el acabado y precisión sobre la pieza mecanizada se corresponde con los que cabría esperar con las garras originales.

Tras los ensayos se desmontan las piezas para observar posibles defectos sobre las garras impresas. Las piezas no presentaban defectos aparentes en la zona de aplicación de las fuerzas ni en los puntos críticos analizados por elementos finitos.

No obstante, si aparece un defecto claro en la zona donde queda alojado el tornillo. Este defecto se debe a un apriete excesivo de los tornillos que unen las garras con las mordazas. Dicho defecto se muestra en las siguientes imágenes:



ILUSTRACIÓN 98: ESTADO TRAS ENSAYO DE PROTOTIPO 1 DE GARRA PARA MORDAZA



ILUSTRACIÓN 97: DETALLE DE LA GARRA TRAS EL ENSAYO

Para evitar este defecto se presentan dos opciones; apretar los tornillos hasta alcanzar la fuerza necesaria para garantizar una buena unión y evitando un apriete excesivo o plantear un refuerzo con fibra de carbono para las capas situadas en dicha zona, dando una resistencia adicional que evitaría la deformación de la pieza en caso de que el operario de la máquina excediera la fuerza necesaria.

En cualquier caso, para el segundo prototipo de garra de mordaza, el cual cuenta con la superficie de apoyo para no tener que contar con la barra antes descrita, se apretará los tornillos de forma justa para garantizar una buena unión de las partes.

Las operaciones realizadas para el segundo prototipo de garra de mordaza son las mismas que en caso anterior. Hay que recordar que estas garras tienen una superficie de apoyo o escalón, lo cual implica una menor zona para la sujeción de la pieza, lo que en los análisis anteriores daba lugar a la aparición de tensiones de mayor valor, especialmente en las esquinas superiores de las mismas.

Se incluyen ahora imágenes de los ensayos realizados sobre este segundo prototipo de garras:



ILUSTRACIÓN 100: ENSAYO PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA MORDAZA (1)



ILUSTRACIÓN 99: ENSAYO PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA MORDAZA (2)

De nuevo los resultados obtenidos son positivos, tanto en resistencia de la pieza durante el proceso, calidad de la operación de fresado y aspecto y situación final de las garras tras la operación. Se aprecia de nuevo que el análisis por elementos finitos antes realizado se corresponde con la realidad. Aunque en este caso las tensiones que aparecen en los puntos críticos son mayores, en ningún momento se supera el límite elástico del material, por lo que se puede realizar el mecanizado sin ningún inconveniente.

En cuanto al apriete de los tornillos y la superficie de esta, al no realizar un apriete excesivo se aprecia que los defectos que aparecían tras los ensayos en las garras anteriores ya no ocurren. Más adelante se valorará la posibilidad de reforzar dicha zona, pero se demuestra que sin un apriete excesivo se consigue la calidad de fresado propia de esta máquina sin comprometer la integridad estructural de las garras ensayadas.

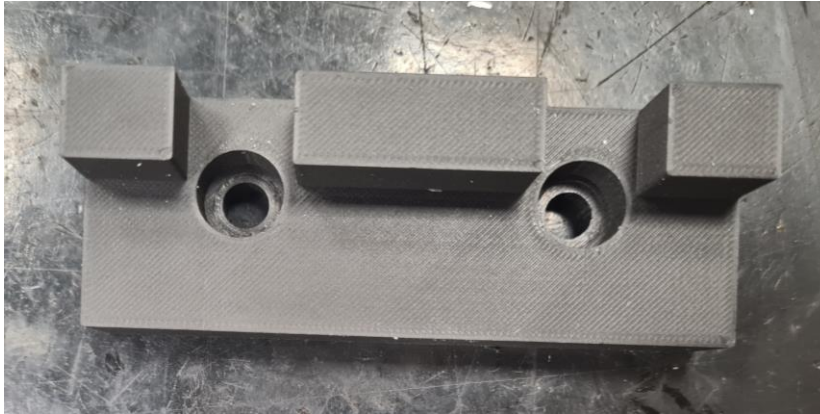


ILUSTRACIÓN 101: ESTADO TRAS ENSAYO PROTOTIPO 2 DE GARRA PARA MORDAZA



ILUSTRACIÓN 102: DETALLE DE LA GARRA TRAS ENSAYO

7.1.2. *Ensayo de garras para plato en operaciones de torneado.*

De forma similar a las garras para mordaza, las garras diseñadas para realizar operaciones de torneado se ensayarán en condiciones habituales de funcionamiento, se analizará la calidad del mecanizado y el estado final de las piezas y se concluirá acerca de la viabilidad de estas garras, así como posibles modificaciones que puedan resultar de interés.

En primer lugar, se plantea la posibilidad de realizar un ensayo utilizando únicamente una de las garras impresas, es decir, usando dos de las garras para plato originales de acero templado y una de las impresas con Onyx (con las especificaciones incluidas en apartados anteriores).

Con este ensayo se pretende conocer la viabilidad de la garra impresa y su compatibilidad con las garras originales durante el mecanizado.

Antes de realizar cualquier operación de arranque de material, se colocan las garras en su posición correcta; siendo la garra 3 la impresa con material Onyx y las garras 1 y 2 las originales. Se comprueba además el cierre correcto de las tres garras y se procede a situar la pieza a mecanizar entre las garras y dar distinto número de revoluciones a modo de comprobación inicial.

Concretamente se prueba el agarre a 35, 400 y 1500 revoluciones.



**ILUSTRACIÓN 103: COMPROBACIÓN APRIETE DE
PIEZA EN EL PLATO DE GARRAS**



ILUSTRACIÓN 104: DETALLE PIEZA A 400 REVOLUCIONES

Para analizar los resultados obtenidos en este ensayo el aspecto a considerar más importante es la diferencia de peso entre la garra original y la impresa. Mientras que la garra original tiene un peso de 1.04 Kg, las garras impresas apenas pesan 83g, es decir, la garra de Onyx empleada en este ensayo tiene un peso 12.5 veces menor a la garra original.

Esto tiene un impacto notable cuando trabajamos a grandes revoluciones debido a las fuerzas centrífugas que aparecen en el plato. Dicha fuerza es proporcional a la masa de las garras y al cuadrado de la velocidad de giro. Durante el mecanizado, se produce un desequilibrio en dichas fuerzas debido a la presencia de una garra con una masa mucho menor que el resto, es decir, en condiciones normales las tres fuerzas quedan direccionadas hacia fuera dispuestas a 120º entre sí y de igual módulo, en este caso una de esas tres fuerzas es significativamente menor a las relativas a las garras de acero templado.

Así, cuando ensayamos a distintas velocidades se puede observar que el eje de la pieza a mecanizar no se mantiene fijo y que, por tanto, hay un salto o balanceo de la pieza. Cuando se ensaya a 1500 revoluciones, las consecuencias son aún más notables, produciéndose fuertes vibraciones y desvíos en la pieza a mecanizar. Aunque a pequeñas velocidades las vibraciones no son notables, el salto que da la pieza a mecanizar debido a la descompensación de fuerzas antes comentada hace imposible garantizar el buen mecanizado de esta.

Por tanto, se puede concluir que no es posible realizar operaciones de arranque de material empleando garras de distintos materiales, ya que no se puede asegurar el buen funcionamiento de la máquina, el acabado, la calidad y la seguridad durante la operación de torneado.

Por todo lo anterior, para concluir sobre la viabilidad o no de las piezas impresas será necesario realizar un ensayo empleando las tres garras de mismo material Onyx con las especificaciones ya descritas.

El punto de partida de este primer ensayo es el mismo que en el caso anterior, inicialmente se comprueba que las piezas encajen, y se analiza el agarre y resistencia de las piezas bajo distintas revoluciones sin realizar ninguna operación de arranque de material.



**ILUSTRACIÓN 106: DETALLE DEL ENCAJE
LAS TRES GARRAS IMPRESAS**



**ILUSTRACIÓN 105: DETALLE DEL PLATO A 1500
REVOLUCIONES**

Al emplear las tres garras del mismo material no se presentan los problemas anteriores. La pieza queda bien agarrada y no se observa balanceo en el eje de esta. De esta forma, se puede realizar operaciones de mecanizado.

Se plantea realizar dos operaciones habituales sobre una pieza cilíndrica de diámetro inicial 40mm y longitud 150mm de la misma aleación que la pieza mecanizada en la fresadora; aluminio 6082-T6 a 1500 revoluciones:

- Una primera operación de cilindrado con la que se pretende reducir la longitud total de la pieza en 2mm.
- Una segunda operación de refrentado para reducir el radio de la pieza en 1.5mm.

A continuación, se incluyen imágenes del resultado del mecanizado y del desgaste sufrido por las garras impresas tras la operación:

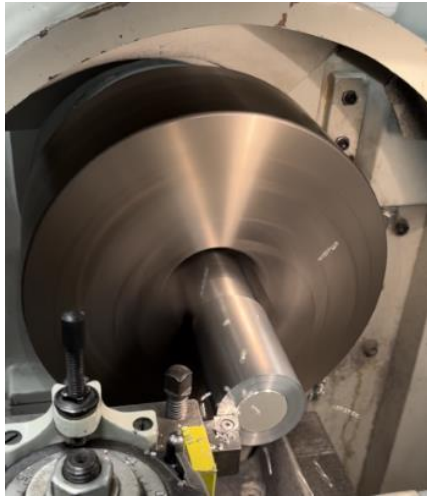


ILUSTRACIÓN 107: DETALLE DE LA OPERACIÓN DE REFRENTADO

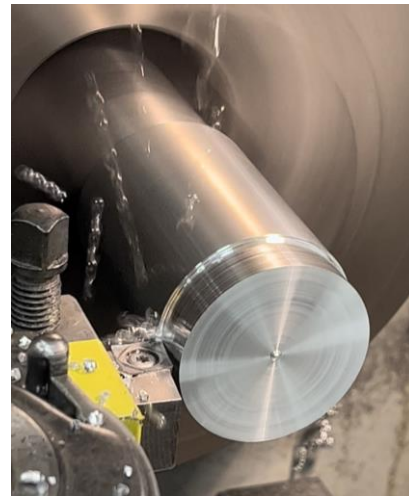


ILUSTRACIÓN 108: DETALLE DE LA OPERACIÓN DE CILINDRADO

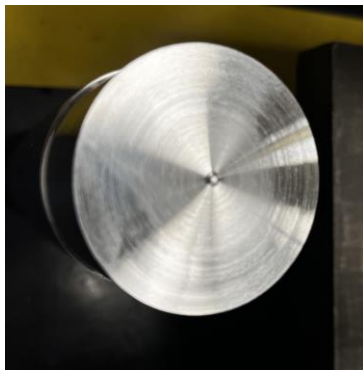


ILUSTRACIÓN 109: ACABADO TRAS REFRENTADO

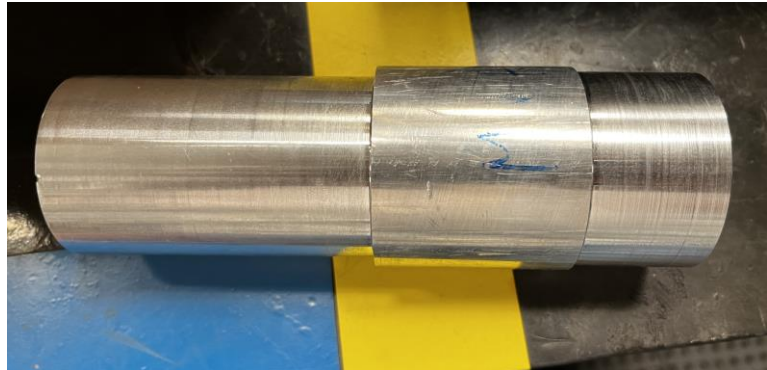


ILUSTRACIÓN 110: ACABADO TRAS CILINDRADO



ILUSTRACIÓN 112: ESTADO DE LAS GARRAS TRAS MECANIZADO (1)



ILUSTRACIÓN 111: ESTADO DE LAS GARRAS TRAS MECANIZADO (2)

En las imágenes anteriores se puede comprobar el acabado de la pieza usando las garras impresas con tecnología 3D. Concretamente, en la ilustración 107, se realiza una comparación entre un cilindrado realizado con las garras originales (parte izquierda de la pieza) y un cilindrado realizado con las garras impresas (derecha).

Aunque sería necesario estudiar más en detalle el acabado de las piezas y cómo factores como la densidad de relleno o el refuerzo de determinadas zonas contribuye a mejorar la calidad de la pieza obtenida, se puede concluir que los mecanizados realizados y el acabado obtenido son adecuados.

Se recuerda que, aunque el análisis por elementos finitos mostraba la posibilidad de deformación en las garras bajo condiciones límite de trabajo, se puede asegurar que bajo condiciones normales de funcionamiento las garras no sufren deformación ninguna y se garantiza el correcto amarre de la pieza durante el mecanizado.

Por otro lado, al igual que las garras diseñadas para la mordaza, sería conveniente estudiar la durabilidad de las piezas para tener información acerca del posible desgaste o deterioro de las piezas tras numerosas operaciones. En cualquier caso, tras unas primeras operaciones las piezas no muestran ninguna deformación ni signos de desgaste relevantes.

Por todo lo anterior, se puede concluir que las garras diseñadas con las especificaciones concretas aportadas son viables para ser empleadas en operaciones habituales de torneado. Posteriormente, se realizará una comparativa con las garras originales según distintos criterios y se propondrán posibles modificaciones a modo de aumentar la calidad del mecanizado, las condiciones críticas de funcionamiento y la durabilidad de las garras.

7.2. Viabilidad de las piezas y posibles modificaciones.

En base a los análisis realizados y los ensayos recogidos en el apartado anterior se pretende dar respuesta a si las piezas impresas son viables para su uso habitual en las máquinas-herramientas de fresado y torneado y, en caso de que no lo sean, se plantean posibles soluciones.

7.2.1. Viabilidad de garra para mordaza.

En el caso de las garras para mordaza la respuesta es clara. Un primer análisis por elementos finitos mostraba la resistencia de la pieza durante el mecanizado gracias a las buenas propiedades mecánicas del Onyx. También los ensayos realizados corroboran la misma idea.

Por tanto, se puede afirmar que las garras para mordaza en sus dos versiones son aptas para su uso en el taller.

Queda abierta la posibilidad de añadir un refuerzo en la zona antes comentada, la zona de apoyo de los tornillos. Este refuerzo, aunque aumentaría la vida útil de la mordaza y evitaría posibles deformaciones ante un apriete excesivo, supone un aumento de precio principalmente, debido a las fibras de refuerzo.

Para valorar esta posibilidad se presenta la siguiente propuesta.

Como material de refuerzo se empleará fibra de carbono, con las propiedades indicadas anteriormente. El software de impresión permite añadir refuerzo en toda la capa seleccionada (no permite concretar el material de refuerzo únicamente a una zona de una capa concreta). Las capas y el número de capas dependen de la orientación elegida para la pieza. Se propone emplear un refuerzo con 5 capas de fibra de carbono. Teniendo en cuenta las capas correspondientes a la superficie de la pieza, estas capas se sitúan bajo estas, concretamente en las últimas capas de la pieza antes de pasar del diámetro menor al mayor en los agujeros.

Aunque sería conveniente concentrar el material de refuerzo sólo en las zonas de apriete de los tornillos, solo es posible aplicar el material de refuerzo en toda la sección de la capa, aumentando considerablemente los costes de producción. Además, al emplear refuerzo por fibra de carbono la altura de capa queda fijada a 0.125mm. Cada una de las capas de refuerzo va cambiando de dirección, maximizando así la resistencia en todas las direcciones, se alternan ángulos de 0, 45, 90 y 135 grados.

Con todo lo anterior, la propuesta de impresión sería la siguiente:

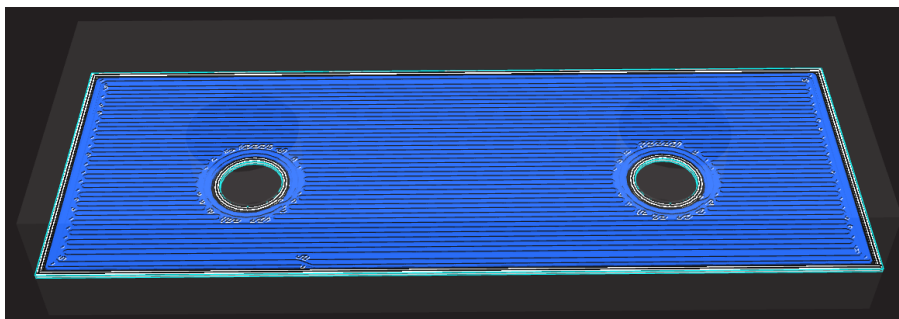


ILUSTRACIÓN 113: DETALLE DE ZONA DE REFUERZO DE GARRA PARA MORDAZA

TABLA 12: ESPECIFICACIONES DE GARRA PARA MORDAZA CON REFUERZO DE FIBRA DE CARBONO

Detalles de la pieza		Parámetros de la pieza	
Dimensiones	115.0mm x 41.2mm x 19.1mm	Altura de capa	0.125mm
Tiempo de impresión	6h 30m	Patrón de relleno	Triangular
Peso total	52.6g	Densidad de relleno	37%
Volumen de plástico	44.22 cm ³	Capas suelo y techo	4
Volumen de fibra	2.42 cm ³	Capas paredes	2
Material base	Onyx	Material de refuerzo	Fibra de carbono
Coste de material	17.77 USD		

En comparación con la misma pieza impresa, pero sin material de refuerzo, la garra de mordaza reforzada con fibra de carbono tendría un peso y tiempo de impresión muy similar a la original. Sin embargo, el aspecto más llamativo es el aumento en precio, ya que la pieza con refuerzo es un 86,3% más cara. Aunque la pieza gana significativamente en resistencia, el empleo de fibra de carbono, aunque se limite a unas pocas capas, encarece considerablemente la pieza.

7.2.2. Viabilidad de garra para plato de garras

Recordando las conclusiones obtenidas tras los resultados, la viabilidad de la garra para plato está asegurada para condiciones normales de funcionamiento. En un principio, apoyándonos en el estudio teórico, bajo las condiciones límites del plato de garras empleado la integridad de la pieza no está asegurada, ya que existen determinadas zonas donde se supera el límite elástico del material.

No obstante, la posibilidad de emplear material de refuerzo, en este caso y al igual que para la garra de mordaza, de fibra de carbono, permite solucionar este problema. Este material presenta unas propiedades mecánicas muy superiores a las del material base empleado u Onyx. De esta forma se propone el siguiente diseño, empleando fibra de carbono como refuerzo buscando garantizar el funcionamiento bajo la carga crítica aportada por el fabricante.

Así, el material de refuerzo se concentrará en la zona de aplicación de la fuerza y también en el comienzo de los raíles de la pieza (zona que permite encajar la pieza en el plato) ya que en estas zonas aparecían las mayores tensiones y deformaciones. De esta forma se proponen 45 capas de fibra de carbono situadas en la cara principal de la garra (zona de aplicación de la fuerza y principio de los raíles). Para plantear este refuerzo es necesario cambiar la orientación de la pieza (siendo ahora la primera capa donde se aplica la fuerza de sujeción y la última la cara donde queda indicada el número de la garra) lo cual afecta también a la cantidad de material de soporte empleado. De nuevo, al emplear refuerzo por fibra de carbono la altura de capa queda limitada a 0,125mm.

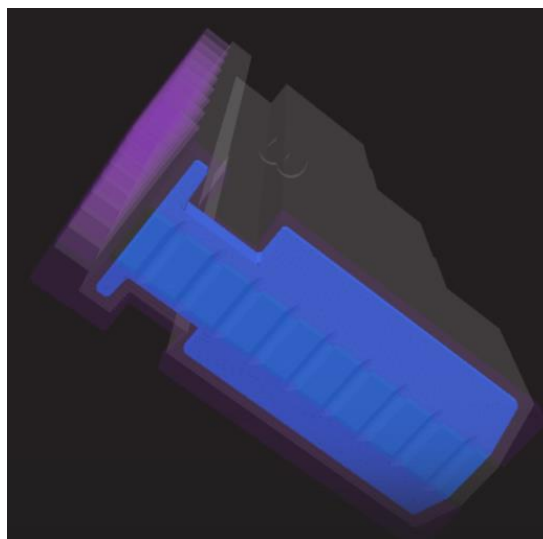


ILUSTRACIÓN 114: DETALLE DEL REFUERZO PROPUESTO
(AZUL)

TABLA 13: ESPECIFICACIONES DE GARRA PARA PLATO CON REFUERZO DE FIBRA DE CARBONO

Detalles de la pieza		Parámetros de la pieza	
Dimensiones	27mm x 69mm x 105mm	Altura de capa	0.125mm
Tiempo de impresión	13h 37m	Patrón de relleno	Triangular
Peso total	88.65 g	Densidad de relleno	40%
Volumen de plástico	84.34 cm ³	Capas suelo y techo	4
Volumen de fibra	4.98 cm ³	Capas paredes	2
Material base	Onyx	Material de refuerzo	Fibra de carbono
Coste de material	34.96 USD		

De esta propuesta la gran diferencia con respecto al prototipo original es el precio. Mientras que se consigue reforzar de manera significativa la zona crítica de la pieza y aumentar el límite elástico por encima de las tensiones máximas debido a los esfuerzos, el precio aumenta en un 62,5%. En cuanto al resto de parámetros, el peso final o tiempo de impresión varían ligeramente. Posteriormente se comparará las distintas propuestas de garra para plato con las garras que pueden encontrarse en el mercado.

7.3. Comparativa con repuestos originales.

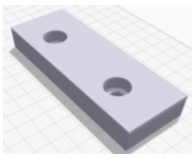
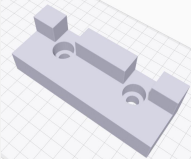
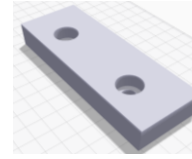
Finalmente, se plantea una comparativa de las piezas impresas con las piezas originales contemplando las distintas variables a considerar. No es suficiente comprobar la funcionalidad de los prototipos impresos por aditiva, sino que es necesario valorar si la fabricación bajo esta técnica es más rentable que la fabricación mediante técnicas tradicionales. Por otro lado, aunque el coste sea el aspecto más relevante, es pertinente contemplar otras variables como el tiempo de reposición, el peso o el grado de personalización.

7.3.1. Comparativa de garras para mordaza.

Tanto la fresadora empleada como la mordaza que lleva equipada son modelos considerablemente antiguos, por lo que no es fácil encontrar repuestos de garras para mordaza. Para la comparativa, se usará un modelo de un fabricante similar y los datos aportados en su catálogo y página de venta al público. Por otro lado, todos los valores de las piezas impresas incluidos son los proporcionados por el software de impresión, por lo que podrían variar ligeramente en la realidad.

A modo de comparación:

TABLA 14: COMPARATIVA ENTRE GARRAS PARA MORDAZA

Comparativa entre garras para mordaza				
Descripción	Prototipo mordaza	Prototipo mordaza con apoyo	Prototipo mordaza con refuerzo	Mordaza original lisa
Imagen				
Modelo y fabricante	Fabricación propia	Fabricación propia	Fabricación propia	Boca Lisa Arnold Standard para Mordaza de Alta Presión
Precio unidad	9.09€	11.19€	16.92€	53.36€ (IVA inc.)
Tiempo de reposición	6h 26m (tiempo de impresión)	8h 23m (tiempo de impresión)	6h 30m (tiempo de impresión)	24h-72h (tiempo estimado de envío)
Peso	47.38g	58.37g	52.6g	664.8g
Material	Onyx	Onyx	Onyx y fibra de carbono	Acero templado
Acabado de la pieza a mecanizar	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno

Esta última tabla permite sintetizar todo lo estudiado en torno a las ventajas y desventajas de la fabricación aditiva. La gran limitación actual de la impresión 3D es conseguir las mismas propiedades mecánicas y térmicas que pueden ofrecer los materiales convencionales como el acero en el caso de las garras para mordaza. Sin duda, los materiales comúnmente utilizados en la fabricación aditiva no serían capaces de aportar las exigencias mecánicas que requieren piezas como la estudiada. Sin embargo, el continuo avance en las técnicas de aditiva y los materiales empleados permiten llegar al contexto de este trabajo.

Así, una vez superada la limitación de resistencia, se puede observar la ventaja competitiva de la fabricación aditiva. No solo se trata de un ahorro en precio, el cual se reduce hasta en un 83%, sino también en otros aspectos. Entre dichos aspectos cabe destacar el peso, el cual se reduce hasta en un 93%, y el tiempo desde que se necesita la pieza hasta que se obtiene los cuales se reducen considerablemente.

Otro aspecto de gran relevancia es el grado de personalización. En caso de querer una garra con una particularidad concreta, esta no va a ser fácilmente conseguida por los distribuidores habituales, y en caso de que sea posible suele ir acompañado de un aumento considerable del precio. Con la fabricación aditiva, en función de las necesidades para un mecanizado concreto, se diseña la pieza, se analiza su resistencia y se imprime, donde los únicos añadidos que aparecen son el tiempo de rediseño y el coste de material extra que pueda aparecer.

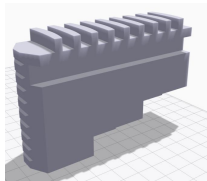
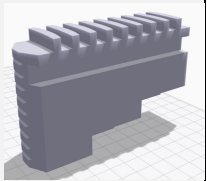
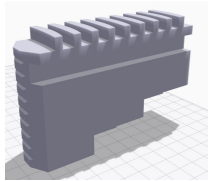
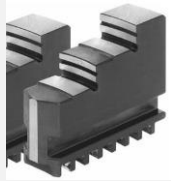
También a destacar que, para la mordaza estudiada, no se han encontrado repuestos originales, sino de un fabricante de productos similares. Esto también se presenta como una ventaja competitiva de la fabricación aditiva aplicada a estas herramientas. Para máquinas o herramientas antiguas el encontrar repuestos cuando estos se deterioran puede ser complicado e incluso puede suponer la necesidad de tener que cambiar el conjunto entero por uno nuevo. Con la fabricación aditiva se puede recrear las piezas o repuestos fácilmente y poder dar de mayor vida útil al resto del conjunto.

7.3.2. Comparativa de garras para plato

De la misma forma que las garras para mordaza, se plantea una comparativa de las distintas opciones de garra para plato con posibilidad de mecanizado exterior estudiadas con las opciones que podemos obtener a través de del fabricante tanto de platos de garras como de repuestos para este. Se analizarán los datos para una sola garra para plato.

A modo de comparación:

TABLA 15: COMPARATIVA ENTRE GARRAS PARA PLATO

Comparativa entre garras duras de exterior para plato				
Descripción	Prototipo garra dura	Prototipo garra dura con densidad de relleno del 55%	Prototipo garra dura con refuerzo de fibra de carbono	Garra dura fabricante externo
Imagen				
Modelo y fabricante	Fabricación propia	Fabricación propia	Fabricación propia	Garra dura de exterior Röhm 315200 250
Precio unidad	20.49€	24.15€	33.30€	79.05€ (IVA inc.)
Tiempo de reposición	15h 28m (tiempo de impresión)	17h 27m (tiempo de impresión)	13h 37m (tiempo de impresión)	24h-72h (tiempo estimado de envío)
Peso	83.37g	102.48g	88.65g	1038g
Material	Onyx	Onyx	Onyx y fibra de carbono	Acero templado
Acabado de la pieza a mecanizar	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno

De nuevo se observa el gran potencial o ventaja competitiva que presenta la fabricación aditiva, y más concretamente los materiales e impresora ofrecidos por MarkForged, sobre la fabricación tradicional. De nuevo la gran limitante de la impresión 3D es la resistencia de sus materiales, vemos que, en este caso, para ofrecer las mismas prestaciones que las garras originales, es necesario plantear un refuerzo de fibra de carbono ya que el material base no es capaz de evitar deformaciones bajo las fuerzas de trabajo.

En cualquier caso, se aprecia que, para condiciones normales de funcionamiento, el prototipo más básico es viable y permite grandes mejoras como una reducción en precio del 74.1% y una reducción en peso del 92% respecto de los repuestos ofertados por el fabricante.

También se plantea un prototipo con un 15% más de densidad de relleno a modo de reforzar la pieza y darle mayor resistencia y durabilidad aumentando el precio en 3,66€ respecto del prototipo más básico.

Por otro lado, el prototipo propuesto con refuerzo de fibra de carbono, aunque supone un aumento de precio de 12.81€ respecto del prototipo más básico, este sigue implicando una reducción en precio del 57,9% respecto de los presupuestos ofertados por el fabricante.

Incluso planteando un prototipo combinando las dos opciones anteriores, aumento de densidad de relleno en un 15% y refuerzo de fibra de carbono, el precio final de la pieza seguiría lejos del ofertado por el fabricante.

Aunque el Onyx se trata de un material caro en comparación con otros usados en impresiones por adición de capas, las buenas propiedades que ofrece y su posibilidad de combinación con refuerzo de fibras, hace que las piezas impresas con este material presenten una enorme ventaja competitiva que las fabricadas mediante procesos tradicionales.

8. Conclusiones

Uno de los principales objetivos de este proyecto era el de analizar si los nuevos materiales e impresoras disponibles en el mercado son viables para la sustitución de piezas con altas demandas mecánicas.

Sin duda la fabricación de piezas por impresión 3D se encuentra realmente desarrollada y en un momento de mejoras continuas. Factores como la calidad del acabado, la variedad de materiales y de técnicas y los tiempos de impresión han mejorado considerablemente en los últimos años. Sin embargo, una de las principales limitaciones de estos materiales han sido las propiedades físicas y más concretamente en materia de resistencia a esfuerzos.

Aunque los materiales empleados en este proyecto siguen sin poder competir con algunos materiales tradicionales como por ejemplo el acero, ello no significa que las piezas fabricadas con estos materiales no sean aptas para su uso, en máquinas-herramientas como las empleadas en este proyecto.

De existir una combinación perfecta, esta sería aquella que combina el grado de personalización de piezas, la posibilidad de trabajar con piezas de geometría compleja y bajos tiempos de fabricación de prototipos que ofrece las técnicas de fabricación aditiva con las propiedades mecánicas que ofrecen los materiales metálicos.

A pesar de que dicha realidad aún no está disponible, la combinación de materiales como Onyx o nylon con materiales refuerzo como la fibra de carbono o la fibra de vidrio ofrecida por MarkForged a través de su tecnología e impresora se presentan como una buena aproximación a dicha combinación ideal.

Así, la primera conclusión que se puede ofrecer en base a este trabajo es que, de superar la barrera de la resistencia exigida a los materiales empleados, la fabricación aditiva presenta enormes ventajas en cuestiones básicas como reducción de precio y peso en el desarrollo de prototipos.

Por otro lado, con técnicas de fabricación convencionales, trabajar con geometrías complejas o con un alto nivel de detalle implica necesariamente un aumento significativo de los costes de fabricación. La fabricación aditiva, en el punto de desarrollo en el que se encuentra en la actualidad, ha conseguido superar esa barrera, permitiendo incluso optar por geometría más compleja u optimizada a beneficio de reducción del peso de la pieza y, por tanto, de la cantidad de material empleado y, en definitiva, del precio final de la pieza.

Completando la idea anterior, la posibilidad de realizar modificaciones según necesidades concretas que puedan aparecer durante el proceso productivo y su rápida implementación es otro de los puntos fuertes de esta técnica. Conociendo la pieza, realizar un cambio sobre el modelo 3D, es un proceso considerablemente rápido que permite adaptarse a casi cualquier necesidad de diseño.

Analizando más en detalle el componente del precio se pueden obtener las siguientes conclusiones:

En primer lugar, de tratarse de series largas con cientos o miles de piezas a fabricar, las técnicas convencionales ampliamente extendidas en las industrias son enormemente más rentable en cuestiones como precio por unidad o tiempo de fabricación por unidad, siendo normalmente el coste unitario decreciente conforme aumenta el tamaño del lote a producir.

Mientras que la fabricación tradicional requiere de utillajes, procesos y herramientas concretas para desarrollar una pieza en concreto, que normalmente suelen implicar costes elevados y la necesidad de series largas para su amortización, el coste de fabricar una pieza por aditiva se mantiene constante, ya que depende fundamentalmente del gasto en material y del tiempo de fabricación, que no varían según aumentan el número de piezas fabricadas.

Por otro lado, además de fabricación de series cortas, cuando se presenta la necesidad de fabricar un prototipo o repuestos la opción de la fabricación aditiva es la más interesante. Ampliando la idea, en cualquier taller o industria puede aparecer la necesidad de sustituir una pieza concreta debido a su desgaste o rotura y los precios de repuestos ofrecidos por el fabricante suelen ser elevados e, incluso, se puede presentar la situación donde el fabricante ya no ofrezca repuestos de ese modelo, al estar descatalogados o ser demasiado antiguos. Por tanto, la fabricación aditiva puede ser de gran importancia en estos casos, dando de mayor vida útil a las máquinas y herramientas empleadas.

En resumen, aunque este trabajo se ha centrado en dos elementos concretos de dos máquinas-herramientas de uso bastante común en la industrial, permite conocer el nivel de maduración de las tecnologías de fabricación aditiva y de los materiales disponibles en el mercado. Aunque en algunos aspectos las tecnologías productivas convencionales presentan una clara ventajas sobre la impresión 3D, el continuo avance de esta técnica permite llegar a conclusiones como la de este trabajo y validar la posibilidad de emplear piezas impresas en aditiva para todo tipo de aplicaciones en la mayoría de los sectores productivos.

9. Bibliografía

- Adam, J. O. (2017). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- Addvance3d. (2021, mayo 19). El proceso completo de la fabricación aditiva (Parte 1). *Addvance3D*. <https://addvance3d.com/el-proceso-completo-de-la-fabricacion-aditiva/>
- Alvarez C, K. L., Lagos C, R. F., & Aizpun, M. (2016). Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM). *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(ESPECIAL), 17-24. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500003>
- Análisis, simulación y optimización de procesos de mecanizado sobre piezas complejas derivadas de fabricación aditiva mediante fabricación virtual*. (s. f.). Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://riunet.upv.es/handle/10251/175116>
- Aramburu Santa Cruz, N. (2019). *Diseño de una estructura mediante diseño generativo para prototipo de fotogrametría* [Universidad del País Vasco]. <https://addi.ehu.es/handle/10810/36863>
- Arango Mantilla, F. A., & Casas Estevez, F. (2021). *Desarrollo de un modelo de elementos finitos del conjunto herramienta-sujeción, para su caracterización dinámica en el análisis de vibraciones en el proceso de fresado* [Universidad Antonio Nariño]. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5045>
- Barrenetxea, G. (s. f.). ¿Qué es la fabricación aditiva y para qué sirve? *SOLVENUP*. Recuperado 19 de febrero de 2022, de <https://solvenup.com/que-es-la-fabricacion-aditiva-y-para-que-sirve/>
- Boparai, K. S., Singh, R., & Singh, H. (2016). Development of rapid tooling using fused deposition modeling: A review. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 281-299. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2014-0048>
- C., L. (2019, septiembre 9). *Guía completa: Deposición de energía directa, te lo contamos todo!* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/guia-deposicion-de-energia-directa-100920192/>
- Calles Valero, A. F. (2019). *Optimización del proceso de fabricación aditiva para piezas reforzadas en función de la resistencia mecánica*. [Universidad de Jaén]. <http://tauja.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/14372>
- Camarillo, A. (2021, mayo 20). ¿Qué es el «Infill» en la impresión 3D? *330ohms*. <https://blog.330ohms.com/2021/05/20/que-es-el-infill-en-la-impresion-3d/>

Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-Plaza, E., Núñez, P. J., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P. (2019). Fabricación aditiva de estructuras 3D reforzadas: Efectos de los parámetros de impresión en el comportamiento mecánico. *Materiales Compuestos*, 3(3), 40-46.

Campodarve Montero, J. (2020). *Análisis de viabilidad de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva en SEAT* [Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/330515>

Conde Rubio, M. (2020). *Diseño y fabricación de utillaje de sujeción mecánica mediante tecnologías de fabricación aditiva (Rapid Tooling)*. [Universidad Pontificia Comillas]. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/41268>

Contreras-Anguita, J. A. (2021). *Diseño y fabricación de una fresadora CNC* [Universidad de Jaén]. <http://tauja.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/14815>

Cubides, C., & Jairo, J. (2008). *Diseño y Fabricación de dos Sistemas de Sujeción para el Centro de Mecanizado Leadwell v20-i* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14261>

Entendiendo el relleno. (s. f.). *BCN3D Stratos*. Recuperado 21 de junio de 2022, de <https://support.bcn3d.com/es/knowledge/infill>

Estrems Amestoy, M. (2012). *Análisis de amarres en máquinas-herramientas* [Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/2725>

Fernández Jaramillo, R. (2021). *Plan procesos de fabricación para la carcasa de un plato de cuatro garras independientes* [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/174857>

Fernández López, B. J. (2018). *Desarrollo de software para la generación automática de elementos mecánicos en Solid Edge* [Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/51988/>

Fraiz Cosano, D. & Jiménez Calzado, Mariano (2021). *Tecnologías de Fabricación y Producción*. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/59173/Gu%C3%ADa%20Docente.pdf?sequence=-1>

Hernández-Castellano, P. M., Gutiérrez Barcenilla, A., Martínez Rivero, M. D., Marrero-Alemán, M. D., Paz Hernandez, R., Suárez García, L. A., & Ortega García, F. (2018). *Tecnologías de fabricación aditiva*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. <https://accedacris.ulpgc.es/jspui/handle/10553/52521>

Hussin, R. B., Sharif, S. B., Abd Rahim, S. Z. B., Suhaimi, M. A. B., Bin Mohd Khushairi, M. T., Abdellah EL-Hadj, A., & Shuaib, N. A. B. (2021). The potential of metal epoxy composite (MEC) as hybrid mold inserts in rapid tooling application: A review. *Rapid Prototyping Journal*, 27(6), 1069-1100. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2020-0025>

Idrach Antonucci, E. (2020). *Estudio de los parámetros óptimos de impresión 3D para una mayor tenacidad a fractura en probetas impresas en pla con partículas de madera* [Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/341787>

Kumar, K., Zindani, D., & Davim, J. P. (2020). Rapid Prototyping, Rapid Tooling and Reverse Engineering: From Biological Models to 3D Bioprinters. En *Rapid Prototyping, Rapid Tooling and Reverse Engineering*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110664904>

La fabricación aditiva paso a paso—Mizar Additive. (2021, agosto 3). <https://mizaradditive.com/fabricacion-aditiva-paso-paso/>

Liaño Ramírez, J. I., & Casqueiro Placer (advisor), C. (2020). *Aplicación de la impresión 3D en la fabricación de repuestos para un buque de la Armada* [Universidad de Vigo]. <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/362>

López Bayona, V. M. (2019). *Estudio de la resistencia mecánica en piezas sostenibles producidas mediante fabricación aditiva* [Universidad de Jaén]. <http://tauja.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/13990>

Materiales compuestos: Tipos, ejemplos y usos. (2020, noviembre 30). *PerezCamps*. <https://perezcamps.com/es/materiales-compuestos/>

Marín, U., & Luis, Ó. (2021). *Estudio de la resistencia mecánica a la tracción en función de la variación de la altura de capa en proceso de fabricación de modelado por deposición fundida, mediante impresión 3D*. [Pontificia Universidad Católica de Valparaíso] <http://repositorio.ucv.cl/handle/10.4151/64526>

Markforged Industrial 3D Printing. (s. f.). Markforged Resources. Recuperado 21 de junio de 2022, de <https://markforged.com/es/resources/blog>

Martí Rodríguez, B. (2017). *Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM*. [Universidad Politécnica de Cataluña]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/106056>

Maz Vargas, H. (2018). *Estudio de la resistencia a la tracción y a la flexión de materiales compuestos de matriz polimérica fabricados mediante impresión 3D* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/13148>

Maza Durand, V. M. (2021). *Modelado y construcción a escala de torno convencional impreso en 3D para fines académicos*. [Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/5121>

- Mendialdua Landecho, I. (2020). *Diseño, fabricación y análisis dimensional de útil de control producido mediante fabricación aditiva. PARTE 1* [Universidad Pontificia Comillas]. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/41260>
- Mudarra Acebedo, M. (2021). *Puesta a punto y caracterización de probetas de material compuesto fabricadas con un sistema de impresión 3D* [Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/126838>
- Muñoz Montenegro, E. J., Sánchez Rosales, W., Cárdenas Pérez, C. A., & Sáenz Benavides, J. L. (2019). *Diseño de una máquina herramienta de 3-ejes con tecnología CNC para operaciones de maquinado* [Universidad del Norte]. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/8758>
- Navarrete Pérez, J. F. (2021). *Análisis de operaciones de fresado con CATIA* [Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/129033>
- Paredes Salinas, J. G., Pérez Salinas, C. F., Castro Miniguano, C. B., Paredes Salinas, J. G., Pérez Salinas, C. F., & Castro Miniguano, C. B. (2017). Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz. *Enfoque UTE*, 8(3), 1-15. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n3.163>
- Pérez, R., & Jorge, M. (2020). *Fundamentos de los Procesos de Conformado por Arranque de Material*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/135060>
- Pérez-Jiménez, M. (2018). *Análisis comparativo de la calidad superficial de piezas fabricadas mediante mecanizado y fabricación aditiva*. [Universidad de Jaén]. <http://tauja.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/9359>
- Polímeros—Concepto, tipos, propiedades y características. (s. f.). *Concepto*. Recuperado 23 de junio de 2022, de <https://concepto.de/polimeros/>
- Rodríguez, D. R. (2021, diciembre 28). Cálculo de la fuerza de sujeción en el plato hidráulico de un torno CNC. *Writer & Engineer*. <https://wryen.com/2021/12/28/calculo-de-la-fuerza-de-sujecion-en-el-plato-hidraulico-de-un-torno-cnc/>
- Rodríguez Hernández, J. (2021). *Materiales reforzados con fibra continua para impresión 3D: Historia, mecanismo y materiales*. <https://digital.csic.es/handle/10261/264531>
- Sánchez, S. (2017, octubre 9). *FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo!* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- Solid Edge | Siemens Digital Industries Software*. (s. f.). Solid Edge. Recuperado 21 de junio de 2022, de <https://blogs.sw.siemens.com/solidedge/>

Tapia Cabrera, J. E. (2020). *Evaluación de las propiedades de amortiguamiento de materiales fabricados por impresión 3D y reforzados con nanotubos y fibras de carbono* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/15674>

Tipos de Polímeros. (2018, noviembre 25). <https://todoenpolimeros.com/tipos-de-polimeros/>

Viana Colino, M. V. (2015). *Optimización topológica de una pieza metálica para adaptarla a fabricación aditiva* [Universidad Carlos III Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/25313>

10. Anexos

Anexo I: Especificaciones técnicas recursos fabricación aditiva.



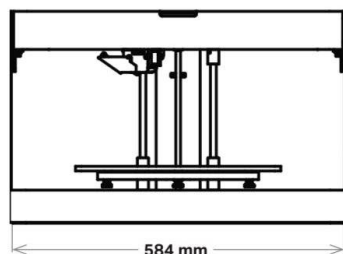
ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Mark Two (2.ª generación)

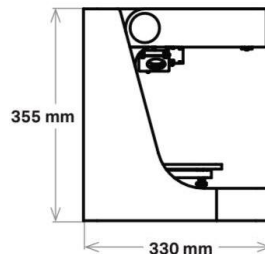
Sustituya los utillajes de aluminio mecanizado (guías, mordazas y accesorios) por piezas más resistentes a un coste muy inferior. Gracias al reforzamiento de fibra continua de carbono y a una extraordinaria fiabilidad, la Mark Two consigue piezas versátiles en un solo día que son 26 veces más resistentes que el ABS y se pueden utilizar de inmediato.

Propiedades de la impresora	Proceso	Fabricación con filamento fundido, fabricación con filamento continuo
	Volumen de construcción	320 x 132 x 154 mm
	Peso	16 kg
	Tamaño de la máquina	584 x 330 x 355 mm
	Lecho de impresión	Acoplamiento cinemático, plano con una precisión de 160 µm
	Sistema de extrusión	Extrusor de segunda generación, detección de falta de plástico
	Alimentación	100-240 V CA, 150 W (pico 2 A)
	Módulo de RF	Banda de frecuencias 2,4 GHz, estándar Wi-Fi 802.11 b/g/n
Materiales	Plásticos disponibles	Onyx, Nylon White
	Fibras disponibles	fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de aramida (Kevlar®), fibra de vidrio HSHT
	Resistencia a la tracción	800 MPa (25,8 veces más que el ABS, 2,6 veces más que el aluminio 6061-T6)*
	Módulo de elasticidad a la tracción	60 GPa (26,9 veces más que el ABS, 0,87 veces más que el aluminio 6061-T6)*
Propiedades de las piezas	Altura de capa	100 µm predeterminada, 200 µm máxima
	Relleno	Relleno de celdas cerradas: varias geometrías disponibles
Software	Software incluido	Eiger Cloud (más opciones disponibles a un coste adicional)
	Seguridad	Autenticación de dos factores, acceso del administrador de la organización, inicio de sesión único

VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



* Datos relativos a la fibra continua de carbono. **Nota:** Todas las especificaciones son aproximadas y pueden cambiar sin previo aviso. Dupont™ y Kevlar® son marcas comerciales y marcas comerciales registradas de E. I. du Pont de Nemours and Company.

MATERIAL DATASHEET



Composites

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Onyx ESD	Nylon	Markforged parts are primarily composed of Composite Base materials. Users may reinforce parts with one type of Continuous Fiber. Dimensions and construction of test specimens: - Tensile: ASTM D638 type IV beams - Flexural: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H) - Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B) 1. Measured by a method similar to ASTM D790. Composite Base - only parts do not break before end of flexural test. 2. Onyx FR is UL 94 V-0 Blue Card certified down to a thickness of 3mm. 3. Surface resistance measured on multiple part surfaces using recommended print settings by an accredited third party test facility. See Onyx ESD technical data sheet for more details.
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	3.0	4.2	1.7	
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	41	52	51	
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	40	50	36	
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	18	25	150	
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	71	71	83	50	
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.0	3.6	3.7	1.4	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	138	41	
Flame Resistance	UL94	—	V-0 ²	—	—	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	44	110	
Surface Resistance (Ω)	ANSI/ESD STM11.11 ³	—	—	10 ⁵ - 10 ⁷	—	
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.2	1.2	1.1	

Continuous Fiber	Test (ASTM)	Carbon	Carbon FR	Kevlar®	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	760	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	57	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	1.6	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	540	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	51	50	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 ¹	1.2	1.6	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	420	300	130	180	216
Compressive Modulus (MPa)	D6641	62	59	25	24	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	0.5	1.5	—	0.8
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	810	2000	2600	3100
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5

Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Plies)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar® composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar® and FG composites)
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat

Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data was prepared by Markforged, Inc. These represent typical values.

Markforged tests plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

Part and material performance will vary by fiber layout design, part design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

MATERIAL DESCRIPTIONS

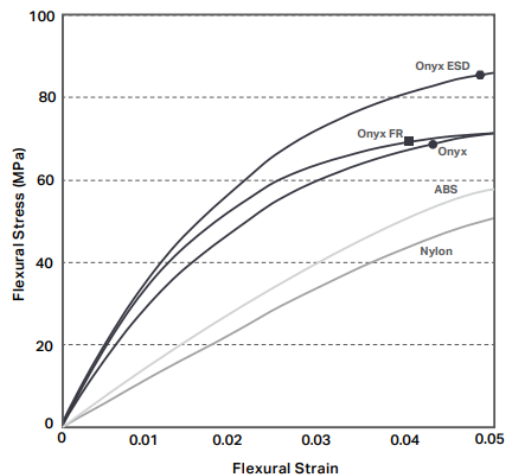


Composites

Markforged composite printers are capable of Continuous Fiber Reinforcement (CFR) — a unique process that reinforces FFF parts with high-strength continuous fibers. A CFR capable machine uses two extrusion systems: one that extrudes Composite Base material in a standard FFF process, and a second for long strand continuous fibers that are laid down in-layer, replacing FFF infill.

Composite Base

Markforged Composite Base materials print like conventional FFF thermoplastics. They can be printed by themselves, or reinforced with any of our continuous fibers, including Carbon Fiber, Kevlar, and Fiberglass.



● Onyx Flexural Strength: 71 MPa

Onyx is a micro carbon fiber filled nylon. It's 1.4 times stronger and stiffer than ABS and can be reinforced with any continuous fiber. Onyx sets the bar for surface finish, chemical resistivity, and heat tolerance.

■ Onyx FR Flexural Strength: 71 MPa

Onyx FR is a Blue Card certified UL94 V-0 material that possesses similar mechanical properties to Onyx. It's best for applications in which flame retardancy, light weight, and strength are required.

● Onyx ESD Flexural Strength: 83 MPa

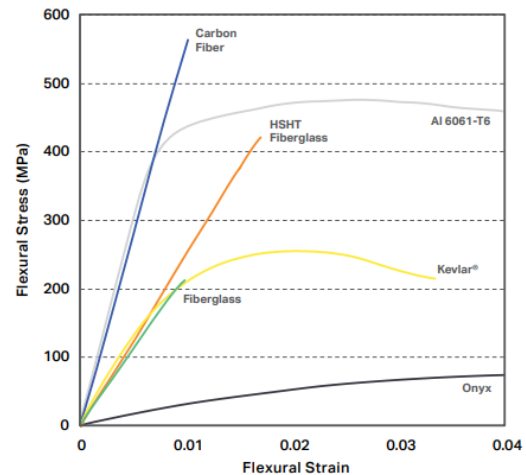
Onyx ESD is a static dissipative safe variant of Onyx — meeting stringent ESD safety requirements while offering excellent strength, stiffness, and surface finish. It's best used in applications that require ESD safe materials.

● Nylon Flexural Strength: 50 MPa

Nylon White parts are smooth, non-abrasive, and easily painted. They can be reinforced with any continuous fiber and work best for non-marring work holding, repeated handling, and cosmetic parts.

Continuous Fiber

Continuous Fibers are laid down on the inside of parts through a second fiber nozzle. They cannot be printed by themselves — instead, they are used to reinforce parts printed out of a composite base material like Onyx.



● Carbon Fiber Flexural Strength: 540 MPa

Carbon Fiber has the highest strength-to-weight ratio of our reinforcing fibers. Six times stronger and eighteen times stiffer than Onyx, Carbon Fiber reinforcement is commonly used for parts that replace machined aluminum.

● Fiberglass Flexural Strength: 200 MPa

Fiberglass is our entry level continuous fiber, providing high strength at an accessible price. 2.5 times stronger and eight times stiffer than Onyx, Fiberglass reinforcement results in strong, robust tools.

● Kevlar® Flexural Strength: 240 MPa

Kevlar® possesses excellent durability, making it optimal for parts that experience repeated and sudden loading. As stiff as fiberglass and much more ductile, it can be used for a wide variety of applications.

● HSHT Fiberglass Flexural Strength: 420 MPa

High Strength High Temperature (HSHT) Fiberglass exhibits aluminum strength and high heat tolerance. Five times as strong and seven times as stiff as Onyx, it's best used for parts loaded in high operating temperatures.

Anexo II: Especificaciones de los utillajes y máquinas-herramientas empleadas.





tornos

D 460 x 1000 / D 460 x 1500 / D 460 x 2000

01
Tornos

Torno de precisión para roscar y cilindrar, completamente equipado. Su banco y su bancada están hechas en un solo bloque, proporcionando un uso excelente y un gran funcionamiento con bajas vibraciones.



D 460 x 1500 con indicador digital de posición DPA 2000 S y SVH 5 - B opcional.

Accesorios opcionales:

•  Plato de 3 garras Ø 200 mm •  Plato de 4 garras Ø 200 mm •  Plato de 3 garras Ø 250 mm •  Plato de 4 garras Ø 250 mm •  Plato de sujeción plano Ø 400 mm • Limitador de posición, con 4 posiciones • Dispositivo universal de pinza de sujeción 5C	<table border="0"> <tr><td>Código</td><td></td></tr> <tr><td>344 1535</td><td></td></tr> <tr><td>344 1536</td><td></td></tr> <tr><td>344 4020</td><td></td></tr> <tr><td>344 4021</td><td></td></tr> <tr><td>344 4038</td><td></td></tr> <tr><td>344 4022</td><td></td></tr> <tr><td>344 4006</td><td></td></tr> </table>	Código		344 1535		344 1536		344 4020		344 4021		344 4038		344 4022		344 4006		• Juego de pinzas 3 - 25 mm, 17 piezas, 5C • Juego de cuchillas 20 mm con placas giratorias HM, 7 piezas • Kit de porta-útiles de cambio rápido SVH 5 - B • Montaje en fábrica SVH • Contrapunto giratorio MK 4	<table border="0"> <tr><td>Código</td><td></td></tr> <tr><td>344 1509</td><td></td></tr> <tr><td>344 4011</td><td></td></tr> <tr><td>338 4305</td><td></td></tr> <tr><td>900 0400</td><td></td></tr> <tr><td>344 0704</td><td></td></tr> </table>	Código		344 1509		344 4011		338 4305		900 0400		344 0704	
Código																															
344 1535																															
344 1536																															
344 4020																															
344 4021																															
344 4038																															
344 4022																															
344 4006																															
Código																															
344 1509																															
344 4011																															
338 4305																															
900 0400																															
344 0704																															

Más accesorios opcionales en las páginas 26 a 37.

Modelo	D 460 x 1000	D 460 x 1500	D 460 x 2000
Código	340 2100	340 2150	340 2200
Altura de las puntas	230 mm	230 mm	230 mm
Distancia máxima entre las puntas*	1.000 mm	1.500 mm	2.000 mm
Ø máximo torneado sobre carro	465 mm	465 mm	465 mm
Ø máximo torneado sobre bancada	270 mm	270 mm	270 mm
Ø máximo torneado sin puente	690 mm	690 mm	690 mm
Longitud del escote de la bancada	165 mm	165 mm	165 mm
Ø eje escariado del cabezal - cola	58 mm	58 mm	58 mm
Soporte del eje del cabezal	Camlock D 1 - 6"	Camlock D 1 - 6"	Camlock D 1 - 6"
Cono del eje del cabezal	MK 6	MK 6	MK 6
Nº de revoluciones del eje del cabezal	25 - 2.000 r.p.m.	25 - 2.000 r.p.m.	25 - 2.000 r.p.m.
Nº de velocidades	12	12	12
Rosca métrica [53]	0,1 - 14 mm/rev.	0,1 - 14 mm/rev.	0,1 - 14 mm/rev.
Rosca inglesa [40]	112 - 2 Gg/1"	112 - 2 Gg/1"	112 - 2 Gg/1"
Avance longitudinal [40]	0,031 - 1,7 mm/rev.	0,031 - 1,7 mm/rev.	0,031 - 1,7 mm/rev.
Avance transversal [40]	0,014 - 0,784 mm/rev.	0,014 - 0,784 mm/rev.	0,014 - 0,784 mm/rev.
Rosca trapecial [50]	4 - 112 DP	4 - 112 DP	4 - 112 DP
Rosca modular [34]	0,1 - 7 MP	0,1 - 7 MP	0,1 - 7 MP
Anchura de la bancada	300 mm	300 mm	300 mm
Recorrido del carro porta herramientas*	128 mm	128 mm	128 mm
Recorrido del carro transversal*	285 mm	285 mm	285 mm
Cono morse del contrapunto	MK 4	MK 4	MK 4
Recorrido de la pinola	130 mm	130 mm	130 mm
Altura de alojamiento de la torreta cuadrada (máx.)	25 mm	25 mm	25 mm
Potencia del motor	6 CV / 4,5 kW / 400 V	6 CV / 4,5 kW / 400 V	6 CV / 4,5 kW / 400 V
Potencia de la bomba de refrigeración	100 W	100 W	100 W
Dimensiones (l x a x an)	2.200 x 1.370 x 1.080 mm	2.750 x 1.370 x 1.080 mm	3.250 x 1.370 x 1.080 mm
Peso neto	1.720 kg	1.977 kg	2.400 kg

*Los recorridos de las guías son más cortos si se usan reglas de medición para pantallas digitales



Indicadores de posición, un accesorio imprescindible.
¿Necesita visualizar su torno?
Consulte nuestra amplia gama de reglas y visualizadores en las páginas 34 y 35.
La manera más económica de equipar su máquina.

Accesorios incluidos:

- Plato de 3 garras Ø 250 mm
- Plato de 4 garras Ø 300 mm con garras independientes
- Plato de sujeción plano Ø 350 mm
- Casquilla de reducción MK 6 / MK 4
- Contrapunto fijo MK 6
- Contrapunto fijo MK 4
- Luneta fija paso hasta 25 - 178 mm
- Luneta móvil paso hasta 19 - 114 mm
- Banco montado
- Protección contra salpicaduras
- Freno del husillo
- Lámpara halógena
- Reloj de rosca
- Porta-útil cuádruple
- Carga inicial con aceite Mobil de alta calidad
- Sistema de refrigeración



Geared scroll chucks in steel design

ZS - ZSU - centric clamping

Geared scroll chucks
ZS - ZSU



APPLICATION

Proven geared scroll chuck for use in areas requiring high clamping forces, high concentricity as well as reliable long-term repeatability. For universal use on lathes, rotary tables, dividing units, etc.

TYPE

Geared scroll chucks in steel design.
3-jaw and 4-jaw version.

CUSTOMER BENEFITS

- High clamping force
- Special flat design for minimum interfering contours
- The jaws can be adjusted over the entire clamping range by turning the key. This allows workpieces with different clamping diameters to be quickly clamped
- Jaws in chuck ground out for concentricity

TECHNICAL FEATURES

- With one-piece jaws or with base and top jaws
- Steel body and spiral ring die-forged
- Series-balanced and hardened

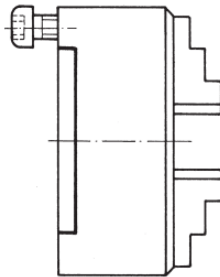
ZS = centric clamping, steel

ZSU = centric clamping, steel, reversible top jaws



A09

DIN 6350, cylindrical centre mount, form A



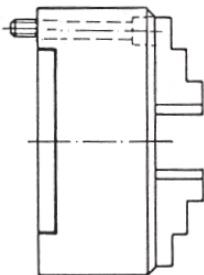
Size	ZA	Through-hole mm	3-jaw chuck with inside and outside jaw	4-jaw chuck with inside and outside jaw	3-jaw chuck with base and reversible top jaw	4-jaw chuck with base and reversible top jaw	Speed max. min ⁻¹	Torque Nm	Total clamping force kN
80	56	19	102513	102505	-	-	7000	30	13
100	70	20	101782	102130	101788	102136▲	6300	60	27
125	95	32	101672	106075	101678	106081	5500	80	31
160	125	42	100717	101164	100725	101170▲	4600	110	47
200	160	55	100186	100466	100189	100484▲	4000	140	55
250	200	76	100533	101030	100541	101036▲	3000	150	63
315	260	103	101344	101598	101350	101901▲	2300	180	69
400	330	136	102062	102330▲	102068▲	102336▲	1800	240	92
500	420	190	102555▲	103340	102585▲	103346	1300	260	100
630	545	240	102720▲	102856	102726	102862	850	280	105
800	710	380	-	-	104913▲	104917▲	700	300	110
1000	910	460	-	-	104925	104929▲	560	450	115
1250	910	550	-	-	104941	104945	450	450	115

Further sizes and mountings available on request

Geared scroll chucks in 6-jaw design available on request

A09

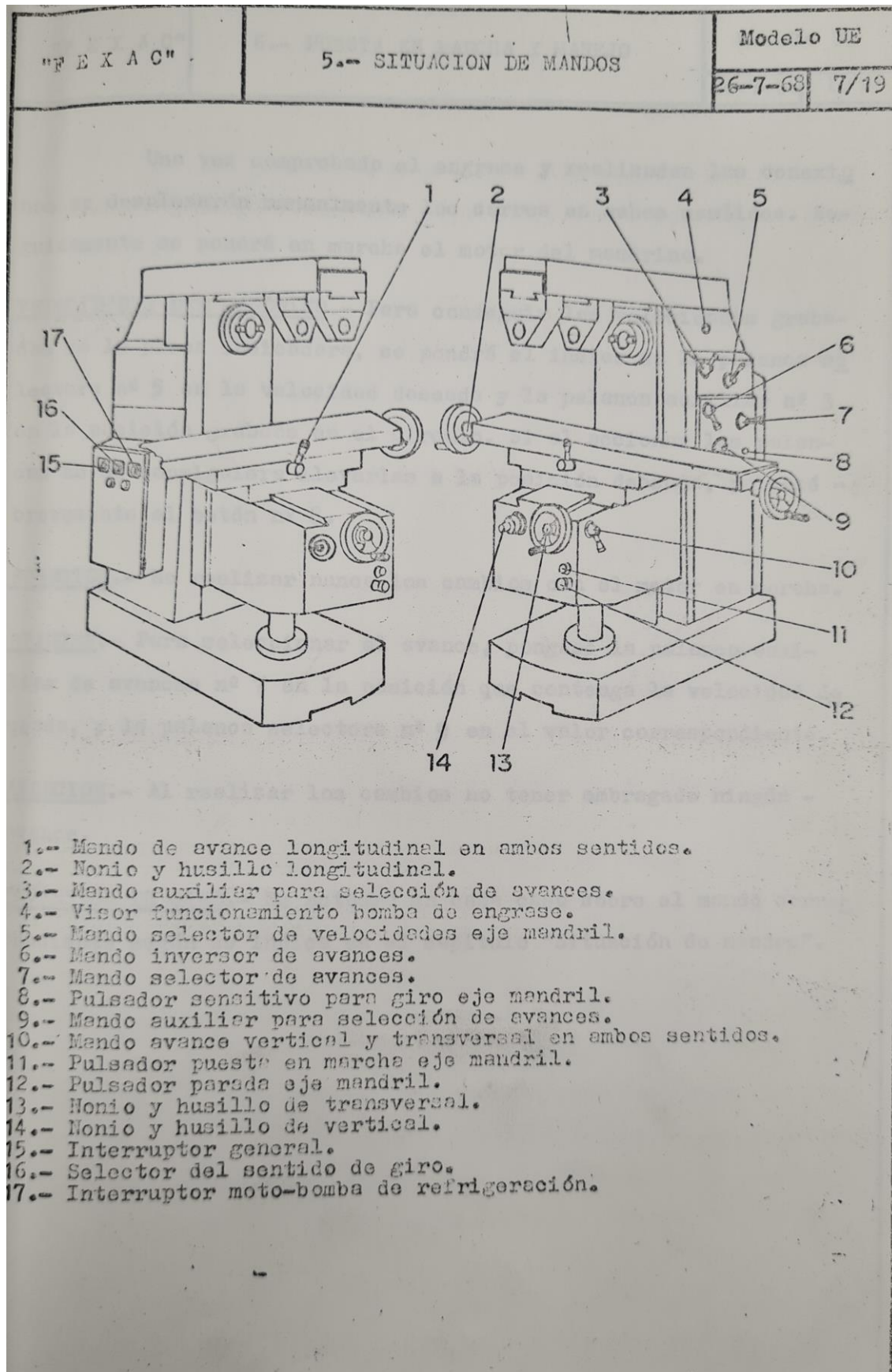
Mounting from front, DIN 6350, cylindrical centre mount



Size	ZA	Through-hole mm	3-jaw chuck with inside and outside jaw	4-jaw chuck with inside and outside jaw	Speed max. min ⁻¹	Torque Nm	Total clamping force kN
125	95	32	120155	124447▲	5500	80	31
160	125	42	115568	125802▲	4600	110	47
200	160	55	113158	113160	4000	140	55
250	200	76	114304	114306▲	3000	150	63
315	260	103	120270	129946▲	2300	180	69
400	330	136	123475▲	134401▲	1800	240	92
500	420	190	127616▲	123465▲	1300	260	100
630	545	240	128545▲	135061▲	850	280	105

Further sizes and mountings available on request

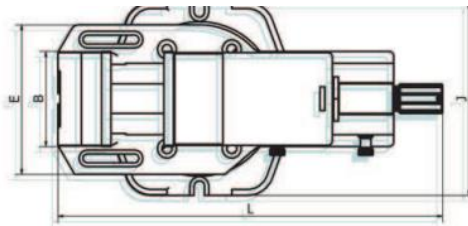
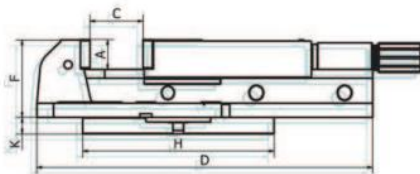
"F E X A C"	1.-CARACTERISTICAS GENERALES	Modelo UE	
		26-7-68	2/19
<u>MESA</u>			
Superficie útil mm.....		1016x240	
Número y ancho de ranuras en T		3x14 H7	
Distancia entre ejes de ranuras en T mm.....		60	
Giro de la mesa en los dos sentidos		45º	
<u>CURSOS</u>			
Longitudinal automático mm.....		775	
Transversal automático mm.....		250	
Vertical automático mm.....		425	
Dist. mín. y máx. entre centro de mandrino y mesa mm.		0-425	
<u>MANDRINO</u>			
Cono		ISO-40	
Número de velocidades		12	
Mínima y máxima en r.p.m.....		40-1250	
Distancia entre centro de eje y carnero mm.....		140	
<u>AVANCES</u>			
Número de avances		12	
Longitudinal y transversal mínimo y máximo mm/min....		9,5-300	
Vertical mínimo y máximo mm/min.....		4,4-142	
<u>MOTORES</u>			
Motor principal CV.....		3	
Moto-bomba de refrigeración CV.....		0,10	
<u>PESO</u>			
Peso neto aproximado Kgs.....		1250	



Mordazas **MANUALES** de **ALTA PRESIÓN**

Arnold MECÁNICA

Tamaño	090	125	160	200
Arnold Mecánica	010 200 090	010 200 125	010 200 160	010 200 200
Arnold Mecánica con regulador		010 210 125	010 210 160	
Arnold Mecánica con base	010 201 090	010 201 125	010 201 160	010 201 200
Arnold Mecánica con base con regulador		010 211 125	010 211 160	
Arnold Mecánica recta	010 202 090	010 202 125	010 202 160	010 202 200
Arnold Mecánica recta con regulador		010 212 125	010 212 160	
Arnold Mecánica en dos partes			010 203 160	010 203 200
Fuerza de amarre (kg)	2.500	4.000	5.000	8.000
A	40	42	50	63
B	90	125	160	200
C Campo de amarre 1	0 - 80	0 - 105	0 - 155	0 - 210
C Campo de amarre 2	75 - 155	100 - 205	150 - 305	165 - 375
D	355	425	570	680
E	160	195	250	300
F	92	107	130	160
F (Mordaza recta)	92	150	150	150
L	395 - 550	485 - 690	570 - 875	720 - 1.100
Peso de la mordaza (kg)	13	26	51	94
Base	800 450 090	800 450 125	800 450 160	800 450 200
H	220	264	325	400
J	230	270	325	400
K	25	28	32	45
Peso de la base (kg)	5	8	15	32



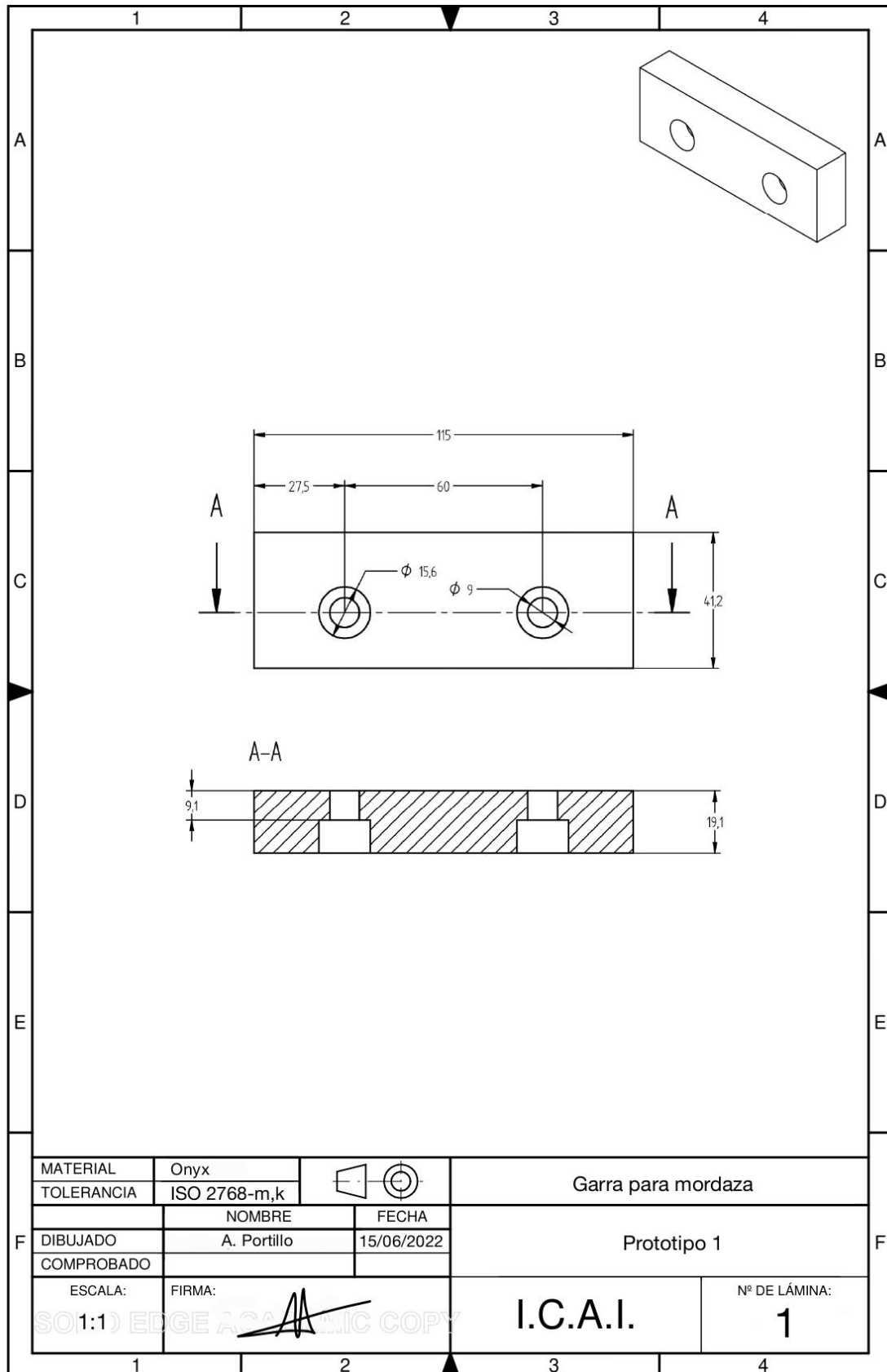
Set suministrado

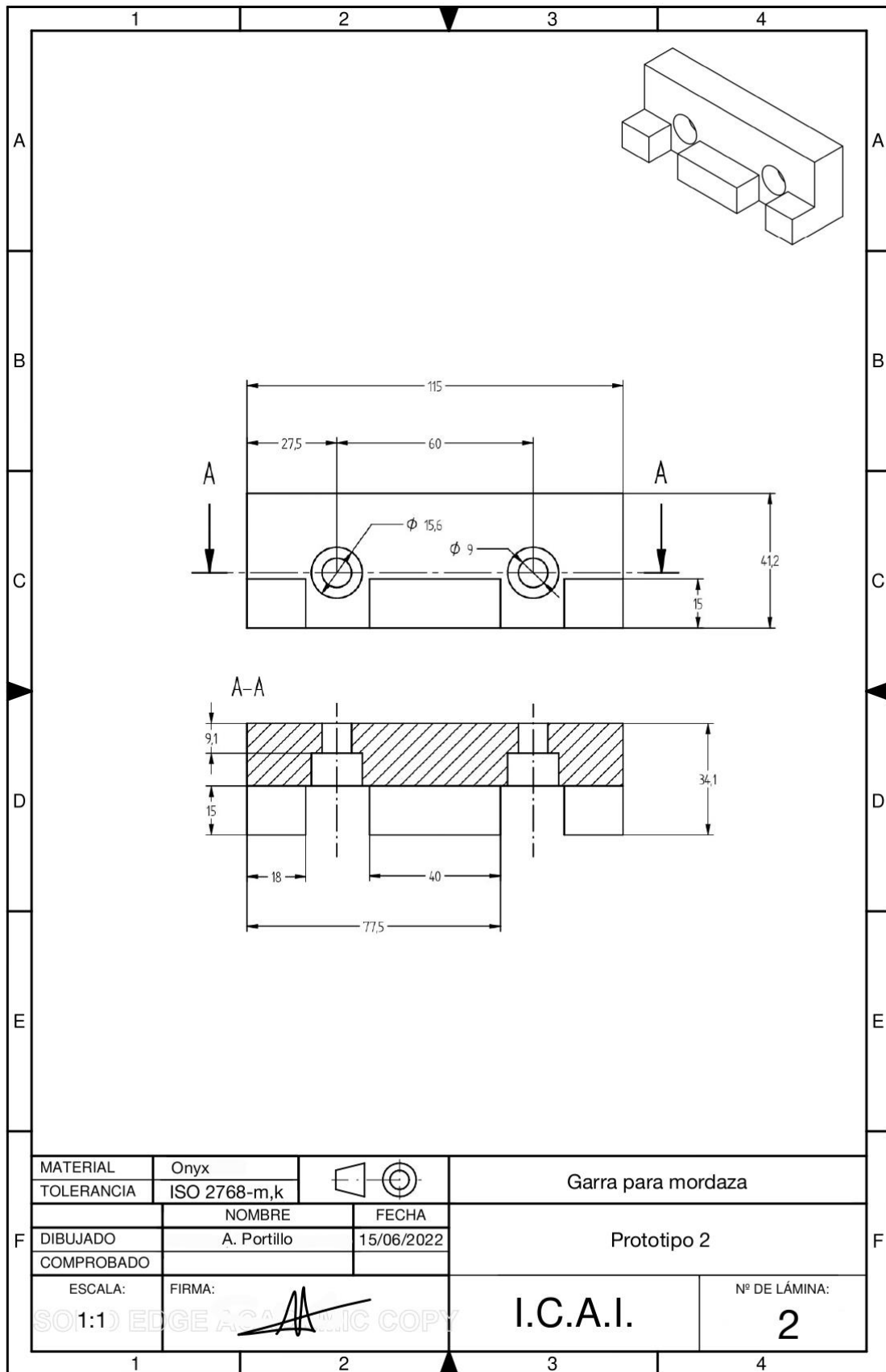
- cuerpo base
- husillo mecánico
- 1 juego de bocas lisas
- 1 manilla
- 4 bridas
- manual de instrucciones

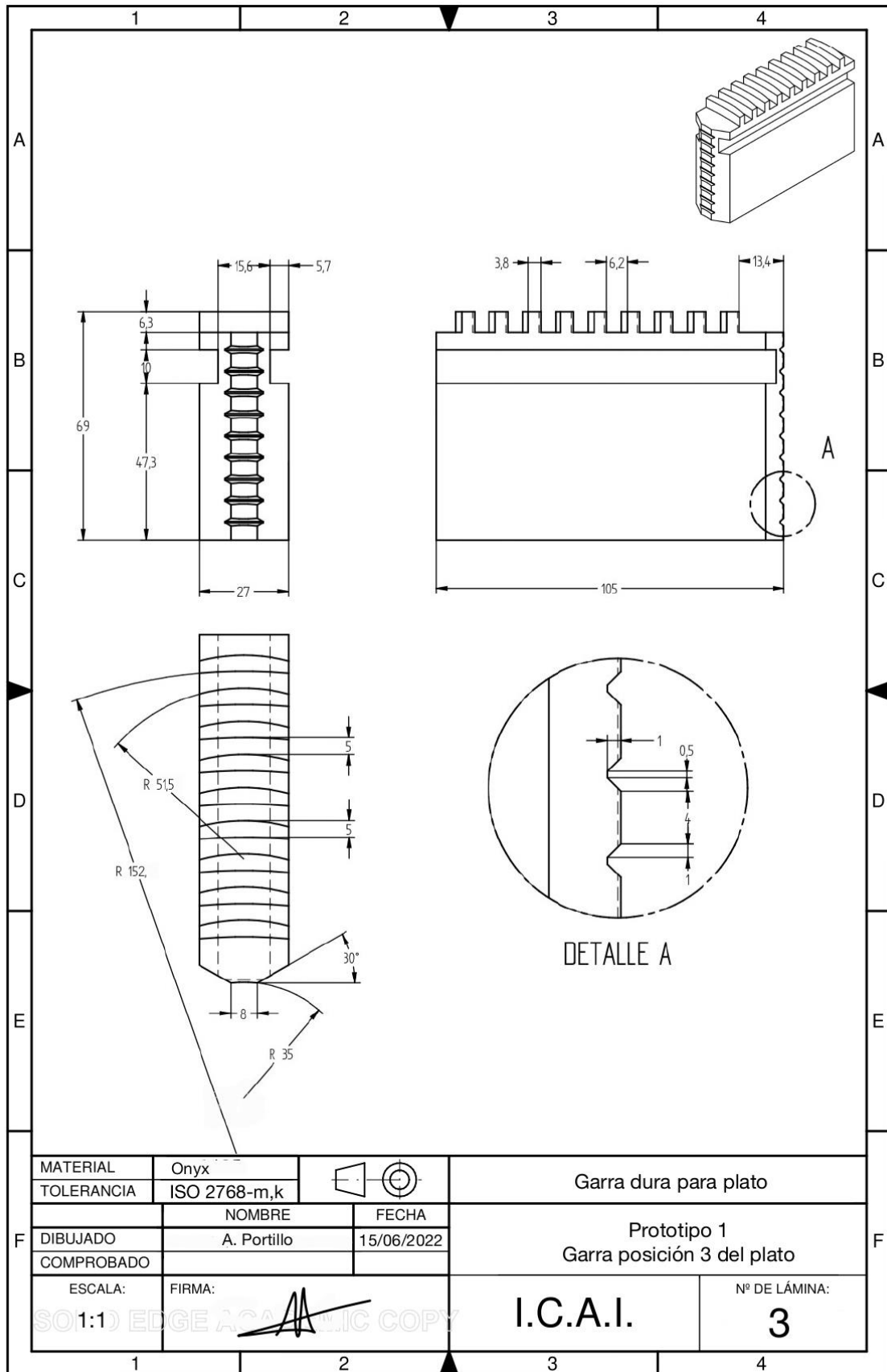


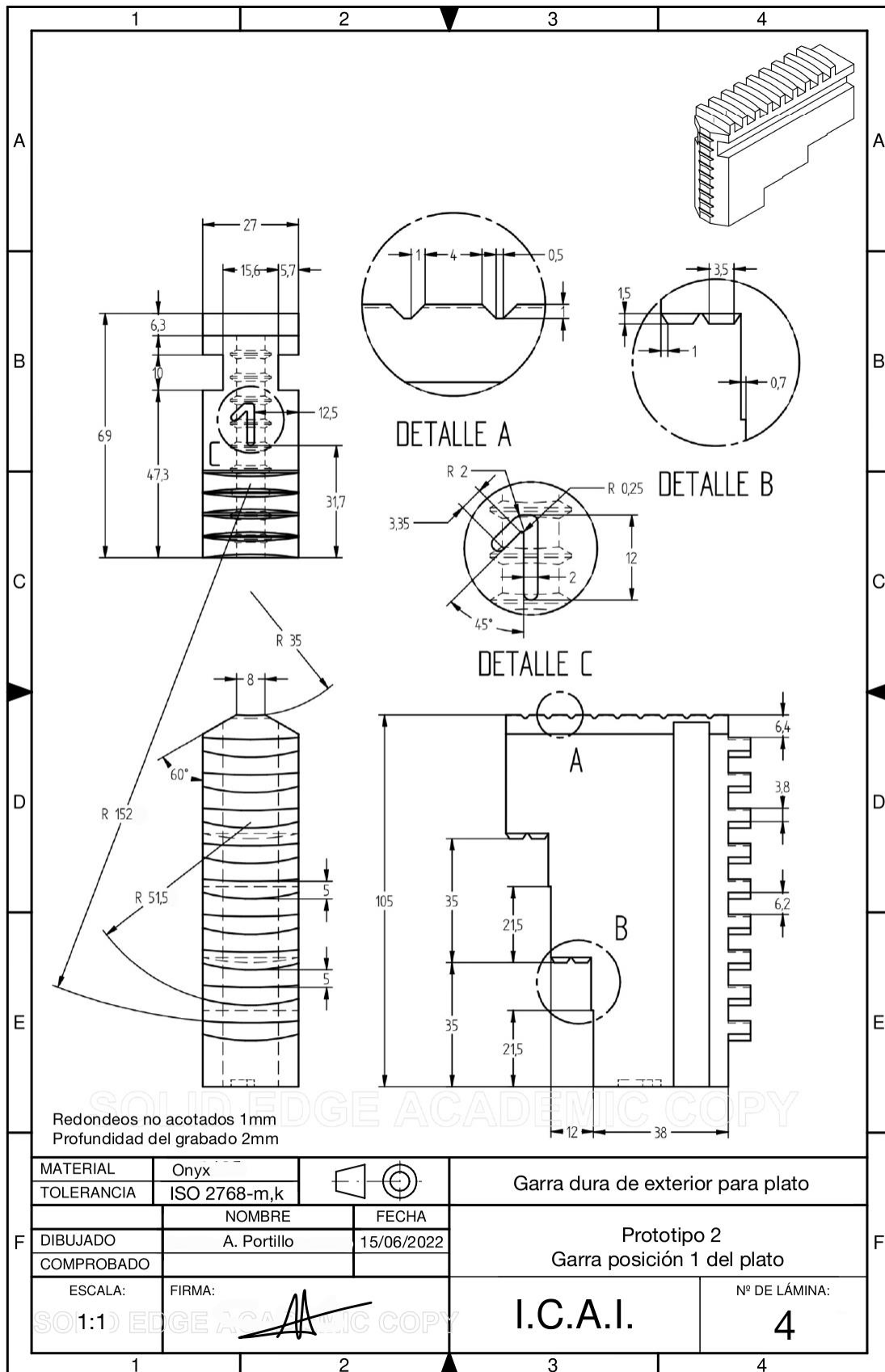
Disponemos de Todas Las Mordazas y Utillajes
 Marca Arnold – Fresmak

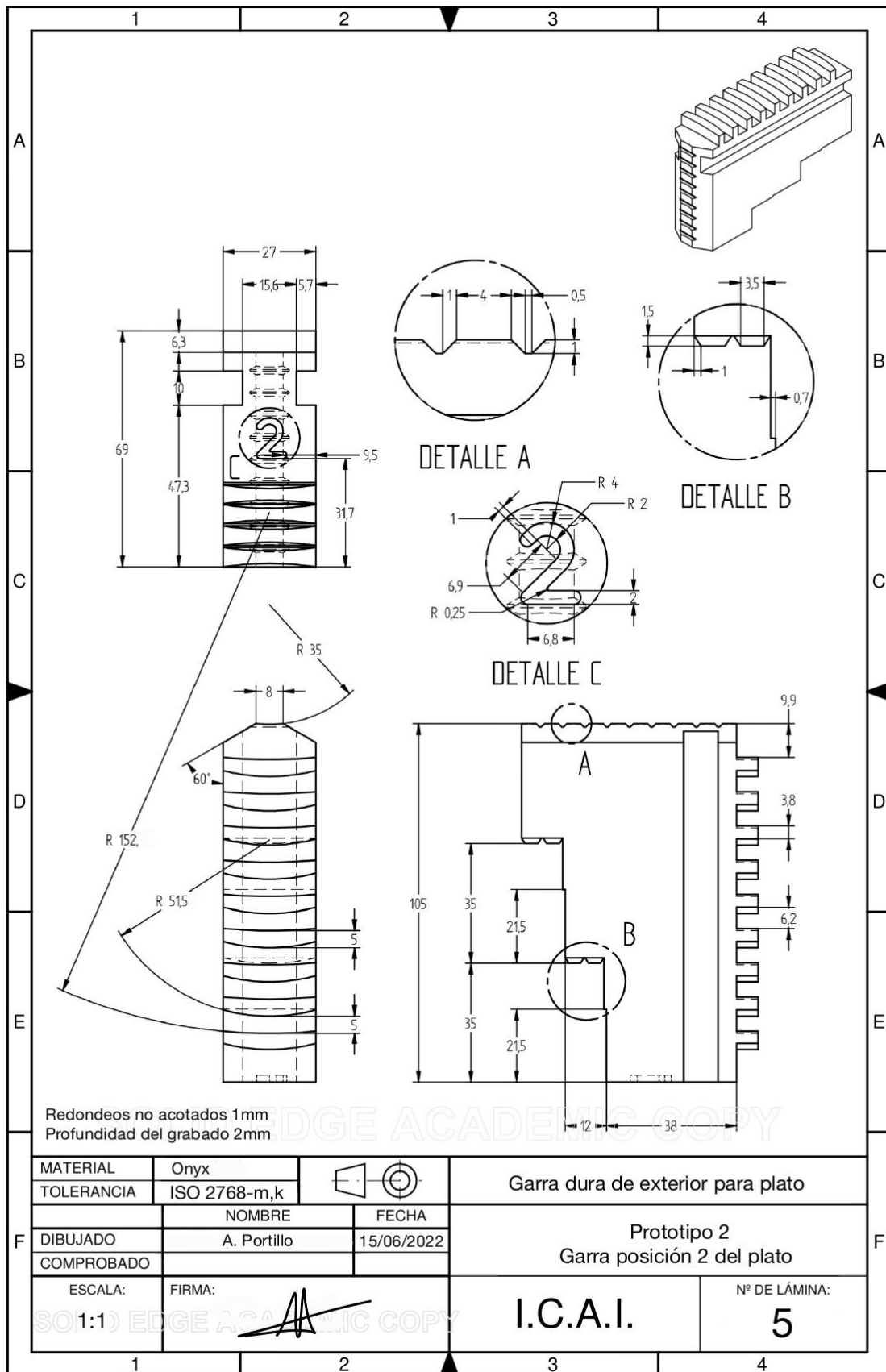
Anexo III: Planos de las piezas impresas.

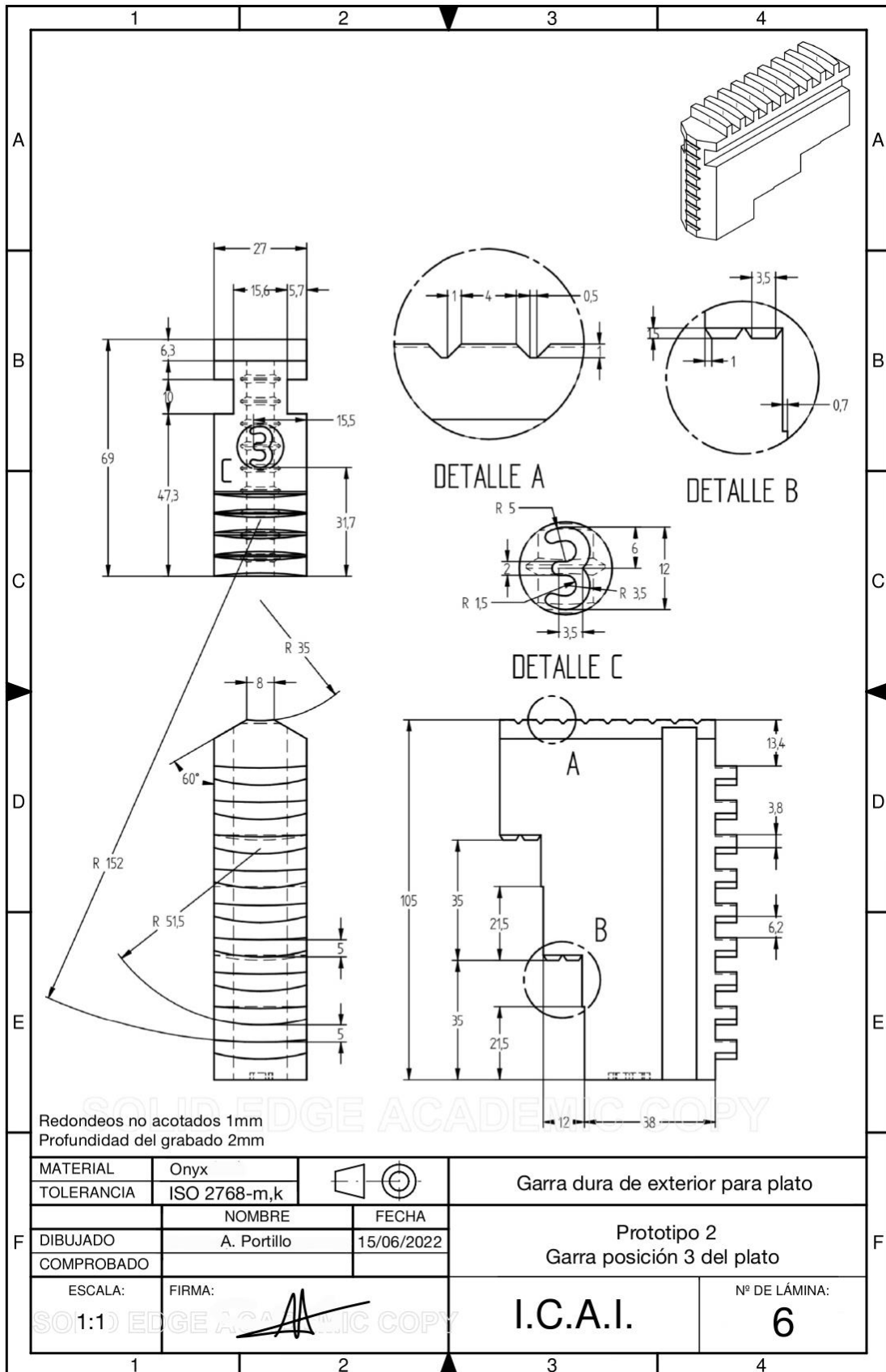












Anexo IV: Objetivos de desarrollo sostenible.

Introducción:

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (también llamados Objetivos Globales) son un conjunto de objetivos adoptados en 2015 por las Naciones Unidas con el propósito de realizar un llamamiento universal para proteger el planeta, acabar con la pobreza y garantizar que, de cara al año 2030, todas las personas puedan disfrutar de paz y prosperidad.

Los ODS están integrados e interrelacionados entre sí, incluyendo todos los desafíos a los que la sociedad se enfrenta día a día, como lo son la desigualdad, el clima, la pobreza, la degradación ambiental, la justicia, la prosperidad y la justicia. Los países se han comprometido a priorizar el progreso de los más rezagados.

La creatividad, el conocimiento, la tecnología y los recursos financieros de toda la sociedad son necesarios para alcanzar los ODS en todos los contextos.



ILUSTRACIÓN 115: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

A continuación, se analiza cómo este proyecto puede aportar y contribuir a lograr los objetivos antes expuestos y, concretamente, en cuales de ellos su impacto puede ser más notable.

Contribución de este proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

Para lograr que los ODS puedan cumplirse de cara al 2030 es necesario que las instituciones de los países actúen de forma conjunta y comprometida con dichos objetivos. Desde la comunidad educativa, se debe transmitir la importancia de estos objetivos a los alumnos y buscar qué impacto puede suponer tanto sus proyectos realizados como su trabajo en un futuro ambiente profesional en el cumplimiento de estos objetivos.

Este trabajo puede contribuir en los Objetivos 9 y 12; objetivos relativos a la industria, innovación e infraestructura y la producción y consumo responsable.

La fabricación aditiva se presenta como una técnica productiva que permite reducir los costes de producción, adaptarse mejor a las necesidades específicas de diseño y, principalmente, reducir los desechos de material. Mientras que otras técnicas productivas emplean grandes cantidades de material para producir una pieza concreta, lo que supone enormes cantidades de desechos si no se recicla dicho material sobrante, la fabricación aditiva no presenta ese problema.

Las técnicas de fabricación basadas en aditiva emplean únicamente el material necesario para obtener la pieza buscada, salvo el material de soporte que puede reducirse o evitarse modificando la orientación de la pieza. De esta forma, aunque se traten de piezas con geometría variable, o series cortas de producción se consigue reducir considerablemente los desechos durante el proceso productivo.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Proyecto de fin de grado

Aplicación de la fabricación aditiva en el desarrollo de utillajes de sujeción en máquinas-herramientas

Autor: Alejandro Portillo Avellaneda

Directores: Mariano Jiménez Calzado y David Fraiz Cosano