UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO COMPARATIVO DE MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D EN LA FABRICACIÓN DE ENGRANAJES

Alumno: D. GUILLERMO ARENAL GARGALLO

Director: D. CARLOS CASTELLOTE VARONA

JULIO 2024

TÍTULO: ESTUDIO COMPARATIVO DE MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D EN LA FABRICACIÓN DE ENGRANAJES

AUTOR: GUILLERMO ARENAL GARGALLO

DIRECTOR DEL PROYECTO: CARLOS CASTELLOTE VARONA

FECHA: 08 de 07 de 2024

RESUMEN

El presente trabajo de Fin de Grado (TFG) se centra en el estudio de la fabricación aditiva y los materiales de impresión 3D, con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica en sistemas de engranajes y compararlos.

Este TFG surge de la necesidad de estudiar las propiedades y posibles aplicaciones de los materiales de impresión 3D mediante modelado por deposición fundida, la tecnología de fabricación aditiva más asequible y accesible de la cual todavía hay mucho por descubrir y analizar.
A lo largo del proyecto se seleccionaron y ensayaron tres materiales diferentes: PLA, ABS y PA6. Se realizaron simulaciones mediante software para analizar el diseño de engranajes bajo condiciones de carga. Los resultados demostraron que la impresión 3d es una tecnología viable para la fabricación de engranajes, permitiendo la creación de geometrías complejas y personalizadas. Por otro lado se pudo observar que aún se presentan dificultades en la impresión de ciertos materiales y que en diseños de pequeño tamaño aumenta la dificultad de precisión de estas máquinas.

Finalmente el análisis de costos reveló que, a pesar de la inversión inicial en equipo y materiales, esta tecnología es competitiva en la fabricación de prototipos y producciones en pequeña escala.

Palabras clave: Impresión 3D, Engranajes, Tecnología FDM, Propiedades Mecánicas, materiales Termoplásticos.

ABSTRACT

This Final Degree Project (TFG) focuses on the study of additive manufacturing and 3D printing materials, aiming to evaluate their technical feasibility in gear systems and compare them. This TFG arises from the need to study the properties and potential applications of 3D printing materials through fused deposition modeling, the most affordable and accessible additive manufacturing technology, which still has much to be discovered and analyzed.

Throughout the project, three different materials were selected and tested: PLA, ABS, and PA6. Simulations were conducted using software to analyze the gear design under load conditions. The results demonstrated that 3D printing is a viable technology for gear manufacturing, allowing the creation of complex and customized geometries. However, difficulties were observed in printing certain materials, and the precision of these machines decreases with smaller designs.

Finally, the cost analysis revealed that despite the initial investment in equipment and materials, this technology is competitive for prototyping and small-scale productions.

Key words: 3D Printing, Gears, FDM technology, Mechanical Properties, Thermoplastic Materials.

Índice

RESUMEN 3

ABSTRACT 3

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN 12

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12

1.2 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN 13

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO 14

Capítulo 2. Marco teórico 15

2.1 Impresión 3D 15

2.1.1 Introducción 15

2.1.2 Introducción histórica 15

2.1.3 Fabricación aditiva 15

2.1.3.1 Beneficios de la impresión 3D 16

2.1.4 Desventajas de la impresión 3d 18

2.1.4.1 Aplicaciones de la fabricación aditiva 19

2.1.5 Estereolitografía (SLA) 20

2.1.5.1 Introducción Histórica 20

2.1.5.2 Definición 21

2.1.6 Sinterización por láser (SLS) 22

2.1.6.1 Introducción Histórica 22

2.1.6.2 Definición 22

2.1.7 Deposición fundida (FDM) 24

2.1.7.1 Introducción Histórica 24

2.1.7.2 Definición 24

2.1.8 Selección de la tecnología de impresión 3D 25

2.1.8.1 Parámetros fundamentales en impresión 3D 26

2.1.9 Materiales (FDM) 27

2.1.9.1 Propiedades mecánicas 29

2.1.10 Engranajes 30
2.1.10.1 Introducción 30
2.1.10.2 Clasificación 30
2.1.10.3 Parámetros geométricos 33
2.1.10.4 Parámetros de diseño 35
2.1.10.5 Aplicaciones 38
2.1.10.6 Ventajas y desventajas 39
2.1.10.7 Fabricación de engranajes 40
Capítulo 3. Estudio de materiales 42
3.1 Metodología 42
3.1.1 Introducción 42
3.1.2 Elección de materiales 42
3.1.3 Elección del diseño experimental 42
3.1.4 Ensayo de tracción 42
3.1.5 Equipo experimental 42
3.1.6 Realización experimento 43
3.1.6.1 Impresión 3D 43
3.1.6.2 Ensayo de tracción 43
3.1.7 Análisis 43
3.1.8 Conclusiones 43
3.2 Elección de materiales 44
3.2.1 PLA 45
3.2.2 ABS 45
3.2.3 PA6 45
3.2.4 Conclusiones 45
3.3 Ensayo de tracción 46
3.3.1 Definición del ensayo 46
3.3.2 Objetivos y valores característicos 46
3.4 Equipo experimental 47
3.4.1 Para impresión 3D 47
3.4.2 Para Ensayo tracción 52
3.5 Parte experimental 54
3.5.1 Introducción 54

3.5.2 Probeta de ensayo 54
3.5.3 Actividades previas 56
3.5.3.1 Impresión 3D 56
3.5.3.2 Ensayo de tracción 56
3.5.4 Realización de ensayos 57
3.5.4.1 Impresión 3D 57
3.5.4.2 Ensayo de tracción 58
3.6 Análisis 60
3.6.1 Resultados ensayo Tracción 60
3.6.2 Cálculo propiedades mecánicas 65
3.7 Conclusiones 71
Capítulo 4. Diseño de engranajes 73
4.1 Introducción 73
4.2 Referencias de diseño 73
4.3 Descripción del sistema de engranajes 74
4.4 Medición de los engranajes de referencia 75
4.5 Cálculo de engranajes: 75
4.5.1 Cálculo de engranajes rectos 76
4.5.2 Cálculo de engranajes cónicos 77
4.6 Diseño CAD 78
4.6.1 Software de diseño 3D 78
4.6.2 Modelado de los engranajes 79
4.6.2.1 Engranajes cónicos 79
4.6.2.2 Engranaje doble conico-recto 83
4.6.2.3 Engranaje doble 1-2 85
4.6.2.4 Engranaje recto 88
4.7 Ensamblaje 89
4.8 Simulación y Verificación 94
4.8.1 Análisis de los parámetros seleccionados 94
4.8.2 Procedimiento del estudio en ANSYS 96
4.9 Impresión 3D de engranajes 110
4.9.1 Impresión en PLA 110
4.9.2 Impresión en ABS 111

4.9.3 Impresión en PA6 111
4.9.4 Previsualización 112
4.9.5 Impresión por capas 113
4.9.6 Engranajes impresos 115
Capítulo 5. PRESUPUESTO 118
5.1 Equipo de investigación 118
5.2 Materiales de Impresión 118
5.3 Impresión de Probetas 118
5.4 Material de ensayos 119
5.5 Equipo de diseño 119
5.6 Impresión de engranajes 119
Total Presupuesto 119
Capítulo 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO 120
Capítulo 7. Bibliografía 121

Índice de Figuras

Ilustración 1 Comparación entre manufactura sustractiva y aditiva 16
Ilustración 2 Coste por pieza en función del número de piezas fabricadas 16
Ilustración 3 Comparación de complejidad y cantidad 17
Ilustración 4 La primera patente de impresión 3D, presentada por Charles Hull en 1984 y aprobada en 1986 20
Ilustración 5 Evolución de la Tecnología de Impresión 3D: De 1984 a 2015 21
Ilustración 6 Polimerización en tanque con láser 21
Ilustración 7 Fusión en lecho de polvo, o Powder Bed Fusion 23
Ilustración 8 Extrusión de material 24
Ilustración 9 Engrane de dos ruedas 30
Ilustración 10 Ejemplo de engrane de ejes paralelos 31
Ilustración 11 Engranaje de dientes rectos 31
Ilustración 12 Engranaje helicoidal 32
Ilustración 13 Engranaje en V de ejes paralelos 32
Ilustración 14 Engranaje Cónico de ejes perpendiculares 33
Ilustración 15 Paso circular o circunferencial 33
Ilustración 16 Nomenclatura usada en engranajes 34
Ilustración 17 Ángulo de presión, (α) 35
Ilustración 18 Plano de la sección transversal 36
Ilustración 19 Transmisión de engranajes 36
Ilustración 20 Transmisión por engranajes multi-etapas 37
Ilustración 21 Probeta diseñada en SolidWorks 47
Ilustración 22 Bambu Lab X1-Carbon Combo 3D Printer 48
Ilustración 23 Entorno gráfico del Software: Bambu Studio 50
Ilustración 24 Zona de parametrización 51
Ilustración 25 Maquina de ensayos SERVOSIS ME405 52
Ilustración 26 Placa Modelo 52
Ilustración 27 Equipo ensayo de Tracción 53
Ilustración 28 Software PDC2K 53
Ilustración 29 Plano de ayuda Probeta 54
Ilustración 30 Medidas Probeta 1B 3 56
Ilustración 31 Probeta sujeta por mordazas 58
Ilustración 32 Fractura de la probeta (1PLA) 59
Ilustración 33 Grafica generada por el Software PCD2K (PLA) 59
Ilustración 34 Curva tensión-deformación 60
Ilustración 35 Curva Fuerza-Deformación PLA 61
Ilustración 36 Curva Fuerza-Deformación ABS 1 62
Ilustración 37 Curva Fuerza-Deformación ABS 2 63

Ilustración 38 Curva Fuerza-Deformación PA6 2 64
Ilustración 39 Curva Fuerza-Deformación PA6 2 64
Ilustración 40 Representación gráfica Modulo de Young 65
Ilustración 41 Probetas PLA 66
Ilustración 42 Límite elástico PLA..... 67
Ilustración 43 Probetas ABS 68
Ilustración 44 Límite elástico ABS 1 68
Ilustración 45 Límite elástico ABS2 69
Ilustración 46 Probetas PA6 70
Ilustración 47 Límite elástico PA6 1 70
Ilustración 48 Límite elástico PA6 2 71
Ilustración 49 Curvas Tensión-Deformación 72
Ilustración 50 Gearbox replica 73
Ilustración 51 Motor eléctrico..... 74
Ilustración 52 Sistema de engranajes 75
Ilustración 53 Medición del diámetro externo 75
Ilustración 54 Engranajes cónicos de dientes rectos 79
Ilustración 55 Espacio de trabajo de Fusion 360..... 79
Ilustración 56 Ventana de Configuración de engranajes rectos 80
Ilustración 57 Engranaje recto generado 81
Ilustración 58 Diente engranaje recto..... 81
Ilustración 59 Ángulo al centro del engranaje (α)..... 82
Ilustración 60 Bocetos geometría 82
Ilustración 61 Engranaje cónico final 83
Ilustración 62 Ventana de configuración 2 83
Ilustración 63 Engranaje cónico 84
Ilustración 64 Ventana de configuración 3 84
Ilustración 65 Engranaje recto superior..... 84
Ilustración 66 Engranaje doble cónico-recto 85
Ilustración 67 Ventana de configuración 4 85
Ilustración 68 Engranaje recto 39 dientes..... 86
Ilustración 69 Ventana de configuración 5 86
Ilustración 70 Engranaje recto 20 dientes..... 86
Ilustración 71 Engranajes rectos acoplados..... 87
Ilustración 72 Vista lateral engranaje doble 39-20 87
Ilustración 73 Ventana de configuración 6 88
Ilustración 74 Engranaje 32 dientes..... 88
Ilustración 75 Vista lateral engranaje recto 32 dientes 88
Ilustración 76 Distancia entre centros 91
Ilustración 77 Vista de las relaciones de posición..... 91
Ilustración 78 Relaciones de posición utilizadas 92
Ilustración 79 Vista superior ensamble sin tapa 93
Ilustración 80 Ensamble separado con ejes de referencia..... 93

Ilustración 81 Corte ensamble 93
Ilustración 82 96
Ilustración 83 Definición de materiales 97
Ilustración 84 Geometria importada 97
Ilustración 85 Contacto entre engranajes 98
Ilustración 86 Caras del engranaje en contacto 98
Ilustración 87 Aplicación de sujeciones 99
Ilustración 88 Mallado 99
Ilustración 89 Momento aplicado 100
Ilustración 90 Árbol de soluciones 100
Ilustración 91 Equivalent stress ABS 101
Ilustración 92 Zona de máxima tensión ABS 101
Ilustración 93 Equivalent stress PLA 102
Ilustración 94 Zona de máxima tensión PLA 102
Ilustración 95 Equivalent stress PA6 103
Ilustración 96 Zona de máxima tensión PA6 103
Ilustración 97 Deformación total del sistema ABS 104
Ilustración 98 Zona de máxima deformación ABS 105
Ilustración 99 Deformación total del sistema PLA 105
Ilustración 100 Zona de máxima deformación PLA 105
Ilustración 101 Deformación total del sistema PA6 106
Ilustración 102 Zona de máxima deformación PA6 106
Ilustración 103 Factor de seguridad ABS 107
Ilustración 104 Factor de seguridad PLA 107
Ilustración 105 Factor de seguridad PA6 108
Ilustración 106 Ciclos de vida ABS 108
Ilustración 107 Ciclos de vida PLA 109
Ilustración 108 Ciclos de vida PA6 109

Índice de Tablas

Tabla 1 Propiedades de materiales FDM 44
Tabla 2 Características Bambu Lab X1-Carbon 49
Tabla 3 Medidas Probeta 1B 55
Tabla 4 Medidas probeta 1B 2 55
Tabla 5 Parámetros de impresión 57
Tabla 6 Parámetros de ensayo tracción 61
Tabla 7 Resultados 1º ensayo PLA 61
Tabla 8 Resultados 2º ensayo PLA 62
Tabla 9 Resultados 1º ensayo ABS 62
Tabla 10Resultados 2º ensayo ABS 63
Tabla 11 Resultados 1º ensayo PA6 63
Tabla 12 Resultados 2º ensayo PA6 64
Tabla 13 Propiedades PLA 66
Tabla 14 Propiedades ABS 67
Tabla 15 Propiedades PA6 69
Tabla 16 Comparación de propiedades entre ensayos y ficha técnica de los materiales 71
Tabla 17 Datos curva S-N ABS (Seol Kyeong-su, 2018) 95
Tabla 18 Datos curva S-N PLA (Ezzeddine Ftoutou, 2024) 95
Tabla 19 Datos curva S-N PA6 (Dr. Touhid Alam Ansari, 2018) 96

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un mundo donde la innovación y la personalización son cada vez más demandadas, la fabricación de objetos tridimensionales enfrenta grandes desafíos. Los métodos de fabricación tradicionales evolucionan cada vez más, sin embargo presentan limitaciones en términos de costos, tiempo y la complejidad de los diseños que pueden producir. Estas restricciones impiden el avance hacia soluciones más personalizadas y eficaces afectando la competitividad y la capacidad de adaptación de las empresas.

Como respuesta a estas limitaciones surge la fabricación aditiva frente a los métodos convencionales, la cual está teniendo un impacto significativo en la digitalización de la industrial. Esto permite la creación de objetos complejos y personalizados especialmente en metales y plásticos reduciendo el tiempo de desarrollo y los costes de producción.

Esta tecnología no solo nos ofrece beneficios económicos sino que también nos permite diseñar de forma diferente simplificando los productos y aumentando su funcionalidad. Cada vez más sectores aprovechan los beneficios de la fabricación aditiva para innovar y satisfacer las demandas de los clientes y usuarios. La producción de series pequeñas y el prototipado se benefician enormemente de su simplicidad y versatilidad, es una tecnología que acerca la fabricación al usuario final descentralizando la producción, permitiendo a empresas pequeñas e individuos diseñar y fabricar productos sin tener que realizar grandes inversiones.

Por otro lado la fabricación aditiva y la impresión 3D, también presentan desafíos como la necesidad de materiales especializados, la optimización de procesos o la falta de conocimiento. Por tanto es crucial investigar y desarrollar esta tecnología para poder conocer tanto sus ventajas como sus limitaciones.

La fabricación de engranajes es fundamental dentro del campo de la ingeniería mecánica ya que son los elementos que transmiten el movimiento y potencia en una gran cantidad de dispositivos mecánicos en la industria automotriz y electrónica. Durante siglos, los engranajes se han fabricado con materiales metálicos mediante los métodos de fabricación convencionales tales como el mecanizado, el corte o el fresado, pero estos métodos requieren grandes cantidades de materia prima, son costosos, generan muchos desperdicios y hacen que los engranajes sean pesados. En los últimos años los engranajes de polímero se han empleado cada vez más debido a su peso reducido en los sistemas de transmisión, ya que son más económicos y generan menos ruido en comparación con los engranajes de metal. (Chil-Chyuan Kuo, 2021)

Este trabajo se centrará en el diseño de un tren de engranajes utilizando la impresión 3D, de este modo se analizará si es viable implementar la fabricación aditiva en el diseño y producción de este tipo de elementos mecánicos. Con este estudio se evaluará la precisión del diseño, la resistencia de los materiales, el costo y el tiempo de producción, al igual que la facilidad de personalización y modificación.

1.2 OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y fabricar un tren de engranajes utilizando la impresión 3d, evaluando su viabilidad técnica. Este estudio nos dará una mayor visión del alcance de esta nueva tecnología cada vez más utilizada en la industria manufacturera. Para realizar un estudio completo se deberán cumplir los siguientes objetivos:

- Estudiar y seleccionar tanto la tecnología como los materiales adecuados para la impresión 3d de engranajes.
- Realizar ensayos para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados.
- Diseñar un tren de engranajes optimizado, basado en un mecanismo utilizado en la actualidad.
- Fabricar y ensamblar los engranajes utilizando la impresión 3d, evaluando la precisión de diseño y fabricación.

En este proyecto se analizan las capacidades de la fabricación aditiva para producir componentes mecánicos complejos y funcionales. Se busca demostrar el potencial que tiene para aplicaciones prácticas y contribuir a la innovación en el diseño y la fabricación.

En cuanto a los objetivos personales que conlleva este trabajo de fin de grado cabe destacar los siguientes:

- Evaluar mi capacidad para el desarrollo y el diseño del producto.
- Adquirir conocimientos avanzados sobre los procesos de impresión 3d y la fabricación aditiva.
- Evaluar mi capacidad para la resolución.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Tras definir el tema principal de este trabajo y los objetivos principales que se persiguen, se desarrolla la estructura del proyecto la cual contiene 6 capítulos de los cuales se hace una breve descripción a continuación

1. Introducción: En el primer capítulo de nuestro proyecto, se mete en contexto al lector proporcionando una idea general de los aspectos que se van a tratar a lo largo de la memoria, se definen los objetivos principales para abordar el problema planteado y se explica la estructura que este va a tomar.

2. Marco teórico: Este segundo capítulo contiene el marco teórico, en este se hace una introducción al mundo de la fabricación aditiva y se define cada una de las tecnologías de la constituyen. Por otro lado se definen los elementos mecánicos a estudiar, los engranajes.

3. Estudio de materiales: En este capítulo se hace un estudio detallado de los materiales de impresión 3d. se seleccionan tres materiales para ensayar experimentalmente. Tras la selección de estos materiales, se imprimen una serie de probetas de cada material, se obtienen sus propiedades mecánicas mediante ensayos y cálculos, para poder determinar sus posibles aplicaciones futuras.

4. Diseño de engranajes: El cuarto capítulo contiene una descripción detallada del diseño realizado de un tren de engranajes al cual se realiza una simulación aplicando los materiales seleccionados y se analiza su viabilidad técnica.

5. Presupuesto: Tras realizar el estudio y diseño del sistema, es esencial realizar un análisis de los costes que conlleva este proyecto, tanto del coste de los materiales, del coste de infraestructura necesario para la realización de los ensayos y del diseño y por último de los costes de impresión de todos los componentes fabricados.

6. Conclusiones: En el capítulo final, se presentan las conclusiones y se proponen recomendaciones para futuras investigaciones.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Impresión 3D

2.1.1 Introducción

En los últimos años, la impresión 3D se ha considerado como una de las mayores innovaciones en el mundo de la industria manufacturera. Lo que una vez fue una visión futurista de la fabricación se ha convertido en una realidad tangible y accesible en nuestra vida cotidiana. La impresión 3D ha transformado la forma en que concebimos la producción y ha abierto un abanico de posibilidades que apenas empezamos a explorar. Esta revolucionaria tecnología, también conocida como fabricación aditiva, permite la creación de objetos tridimensionales capa por capa a partir de una variedad de materiales, incluyendo plásticos, metales, cerámicas, etc. Su impacto se ha sentido en una amplia gama de industrias, desde la medicina y la arquitectura hasta la moda y la industria aeroespacial. (El rincón del badget, s.f.)

2.1.2 Introducción histórica

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es una tecnología que ha experimentado una notable evolucionen los últimos años, sin embargo sus inicios se remontan a la década de 1980. En el año 1981 el japonés Hideo Kodama inventó dos métodos de fabricación en plástico con un polímero que se endurecía con la luz ultravioleta.
El primer proceso de impresión 3D, conocido como estereolitografía (SLA), fue patentado por Chuck Hull en 1984. Este proceso utilizaba láseres para solidificar capas de resina líquida, lo que permitía la creación de objetos tridimensionales a partir de datos digitales los cuales eran ceros y unos. En otras palabras, permitía crear un modelo 3D a partir de una imagen. Este avance marcó el inicio de lo que hoy conocemos como impresión 3D.
Otros investigadores como Beaman y Deckard, en la época de los 80, desarrollaron la sinterización por láser.
(ABAX, s.f.)

2.1.3 Fabricación aditiva

La fabricación aditiva, o manufactura aditiva, se basa en la fabricación de objetos tridimensionales de manera secuencial, habitualmente capa a capa.

Se define como aditiva porque el material se añade secuencialmente, a diferencia de las tecnologías de sustracción convencionales, donde se quita material de un bloque sólido hasta quedar con la pieza final. Algunos ejemplos de manufactura sustractiva son el torneado, el CNC o los procesos de corte en general como corte láser, corte por chorro de agua, corte por mecanizado…

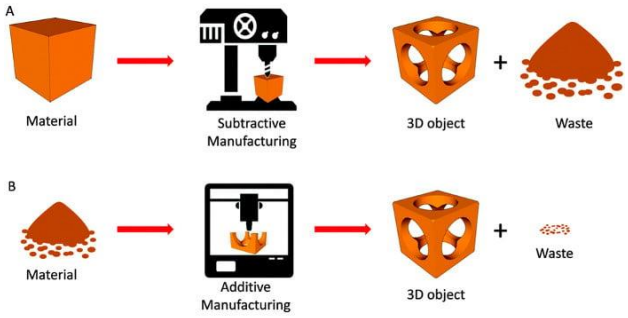


Ilustración 1 Comparación entre manufactura sustractiva y aditiva

De esta manera, se logra crear un objeto aplicando capas, pudiendo variar el tipo de material, la altura de las capas, la manera en la que las capas se depositan unas sobre otras…

2.1.3.1 Beneficios de la impresión 3D

La tecnología aditiva ha emergido como una de las más demandas en una gran variedad de sectores. Desde finales de los años 90, se han obtenido grandes beneficios en comparación con otras técnicas de fabricación tradicionales, lo que la han convertido en uno de los pilares de la cuarta revolución industrial. Estos son algunos de los beneficios de la fabricación aditiva:

- **Reducción del material usado:** En comparación con la fabricación sustractiva convencional, esta tecnología no genera desechos ya que se deposita la cantidad de material preciso en cada capa.
- **Reducción del coste de fabricación para series cortas:** Aunque el coste de fabricación varía según la tecnología de fabricación aditiva empleada, por lo general sigue siendo más bajo.

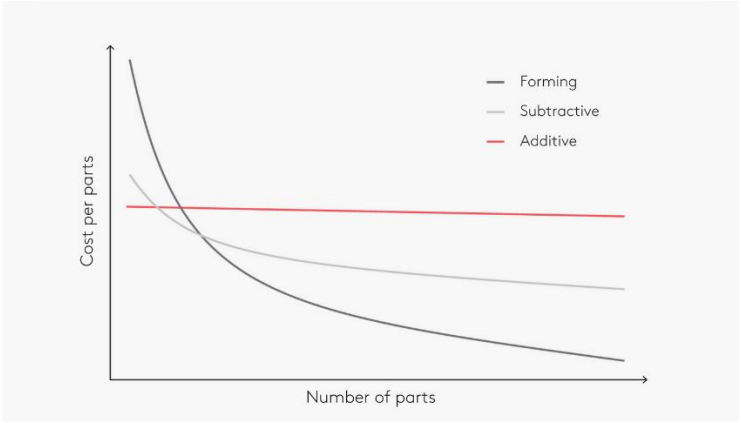


Ilustración 2 Coste por pieza en función del número de piezas fabricadas

- **Reducción de tiempos y costes de fabricación:** Gracias a la tecnología aditiva, es posible reducir hasta un 90% los tiempos de fabricación. Esto permite mejorar el ritmo de producción y reducir el coste final.
- **Mayor velocidad y menor coste de prototipado:** Como se ha mencionado anteriormente, la fabricación aditiva es la opción más económica cuando la producción es baja. Esto hace a esta tecnología ideal para prototipado rápido, donde queremos hacer sólo una o unas pocas unidades de una pieza para poder comprobar los posibles fallos.
  Además de ser más barata, también es más accesible, permitiendo a casi cualquier empresa tener su propio taller de prototipado, al contrario de lo que ocurre con equipos como CNC o fresadoras.

  Para fabricar un bajo número de piezas complejas es más eficiente la manufactura aditiva:

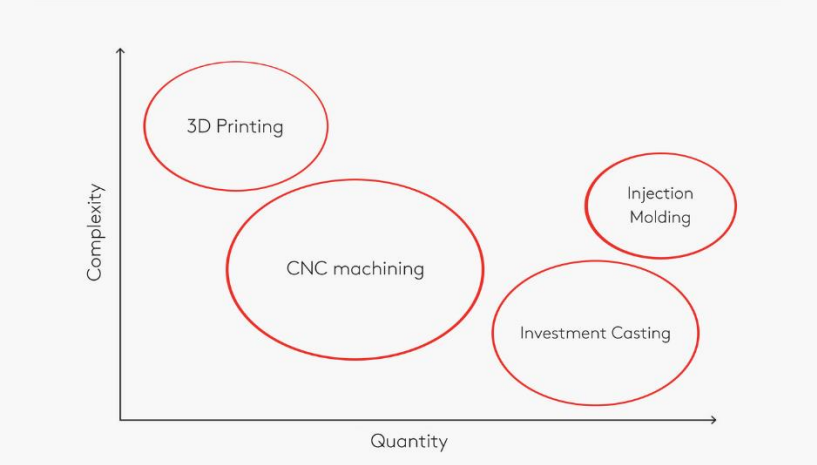


Ilustración 3 Comparación de complejidad y cantidad

- **Revolución logística:** Gracias a esta tecnología se reducen considerablemente los costes logísticos y de almacenaje ya que disponemos de stock virtual y podemos fabricar los modelos únicamente cuando sean necesario.
- **Libertad de diseño y versatilidad:** Permiten crear modelos con geometrías complejas y con una gran variedad de materiales.
- **Tecnología sostenible con el medio ambiente:** la tecnología aditiva permite reducir los costes energéticos y de transporte, la materia prima ocupa mucho menos espacio, en los procesos de producción. Por otra parte, el PLA, uno de los materiales más empleados, se fabrica a partir de materiales ecológicos y renovables como maíz, algodón, caña de azúcar o raíces de tapioca. (Laboratorios 3D, s.f.) y (bitlaf, s.f.)

2.1.4 Desventajas de la impresión 3d

Como ocurre con las nuevas tecnologías, aún quedan varios retos técnicos por superar antes de que la mayoría de los fabricantes adopten el sector de la AM. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- **Mantenimiento:** La tecnología de las impresoras 3D está evolucionando y las averías no son infrecuentes, incluso con un mantenimiento programado con regularidad. Los tiempos de inactividad y el mantenimiento son costes potenciales que asustan a los inversores.
- **Escasez de mano de obra:** Otro reto son los conocimientos técnicos necesarios para gestionar y hacer funcionar los equipos. El mercado tiene una enorme demanda de conocimientos técnicos para supervisar y hacer funcionar los equipos de AM.
- **Disponibilidad de material:** Dada la relativa juventud de las tecnologías de AM, la disponibilidad de material es mucho menor que en los servicios de fabricación tradicionales. Con menos antecedentes de materiales y una selección de materiales más limitada, la AM ofrece un gran número de oportunidades. Afortunadamente, el desarrollo de materiales de AM avanza a un ritmo considerable.
- **Velocidad de producción lenta:** la lentitud de esta tecnología impide que pueda utilizarse en aplicaciones de producción a gran escala. Los fabricantes de equipos son conscientes de esta deficiencia y están buscando métodos para mejorar la velocidad de producción. Por ejemplo algunos fabricantes han optado por implantar dos cabezales en la sinterización selectiva por láser.
- **Automatización del post-procesado:** La mayoría de las piezas impresas en AM y 3D requieren algún tipo de post-procesado. Esto requiere mano de obra adicional y contribuye a los gastos generales por unidad. Algunas operaciones de AM requieren la eliminación de soportes, lijado, limpieza, alisado con vapor, curado, etc. El reto consiste en automatizar estas operaciones con robótica y sistemas automatizados de manipulación de materiales.
- **Software:** Las capacidades de preparación y diseño de datos son limitadas. Las empresas necesitan la infraestructura digital adecuada para gestionar eficazmente sus operaciones de impresión 3D. El resultado es que la industria ha estado desarrollando software de gestión del flujo de trabajo específico para la impresión 3D.
- **Calidad:** La variación pieza a pieza es una preocupación para muchas tecnologías de AM. La composición del material es una fuente crucial de variación debido a la contaminación. Parte de esta variación está relacionada con el material, mientras que otro aspecto es el almacenamiento y la manipulación inadecuados.
- **Material:** Debido a la corta vida de esta tecnología, existe una gran escasez de la información sobre materiales, ya que no existe una base de datos de materiales completa con parámetros de impresión establecidos y especificaciones claramente definidas.

- **Normas:** El sector carece de directrices para toda la industria, incluidas normas universalmente entendidas y aceptadas. Algunos actores clave en el desarrollo de normas, como ISO y ASTM International, han creado comités dedicados al desarrollo de normas de AM.
- **Precisión y tolerancias:** Algunas tecnologías de impresión 3D presentan de forma intrínseca una precisión menor y por tanto unas tolerancias mayores de fabricación, aunque también influye la calibración de la maquinaria.

(Dassault Sistemes, s.f.)

2.1.4.1 Aplicaciones de la fabricación aditiva

Fabricación aditiva industrial

La fabricación aditiva está creciendo enormemente en la industria 4.0, en la industria sanitaria, una de las más importantes a nivel mundial, la fabricación aditiva se utiliza para crear implantes de forma personalizada, teniendo en cuenta las necesidades propias de cada paciente. Esta fabricación personalizada supone por un lado una reducción de gastos ya que es más económico crear una única pieza y por otro lado mejoras médicas ofreciendo piezas hechas a medida para cada paciente

Estos factores explican porque el crecimiento de la manufactura aditiva está siendo excepcional en los últimos años. La fabricación aditiva nos permite crear piezas específicas y modelar a medida.

Fabricación aditiva aeronáutica

La fabricación aeronáutica es imprescindible tanto para el transporte de personas como de mercancías. La fabricación aditiva está permitiendo reducir la contaminación y el impacto ecológico de las aerolíneas. Las piezas que se crean con la manufactura aditiva exponen muchos beneficios frente a los antiguos componentes metálicos

Los beneficios más destacados de la fabricación aditiva en la aeronáutica nos son tantos que podemos crear una lista muy completa:

- Garantiza la sostenibilidad de la industria: evita que se agoten las materias primas necesarias porque es posible la reutilización, reduce el stock y los residuos que genera la fabricación.
- Ahorra económico: minimiza los tiempos necesarios para la producción de los componentes, lo que supone un ahorro en la inversión.
- Nuevos diseños: se moderniza la industria aeronáutica porque permite crear nuevas piezas y diseños, lo que supone un salto tecnológico y aumentar la funcionalidad de los componentes.
- Reducción de almacenaje: las reparaciones en in situ y la reducción del número de piezas permiten ahorrar una gran parte de la inversión en almacenes.

Estas ventajas explican por sí solas la revolución que supone la fabricación aditiva para la industria aeronáutica.

Fabricación aditiva automoción

El sector del motor es uno de los pilares de nuestra economía y de otros países. En este terreno, durante la fabricación de coches deportivos se están utilizando piezas hechas a medida en los conductos de refrigeración utilizando la fabricación aditiva.

Gracias a la manufactura aditiva podemos:

- Aumentar la rapidez de la producción
- Mejorar la agilidad de fabricación de los prototipos
- Garantizar la competitividad de las empresas

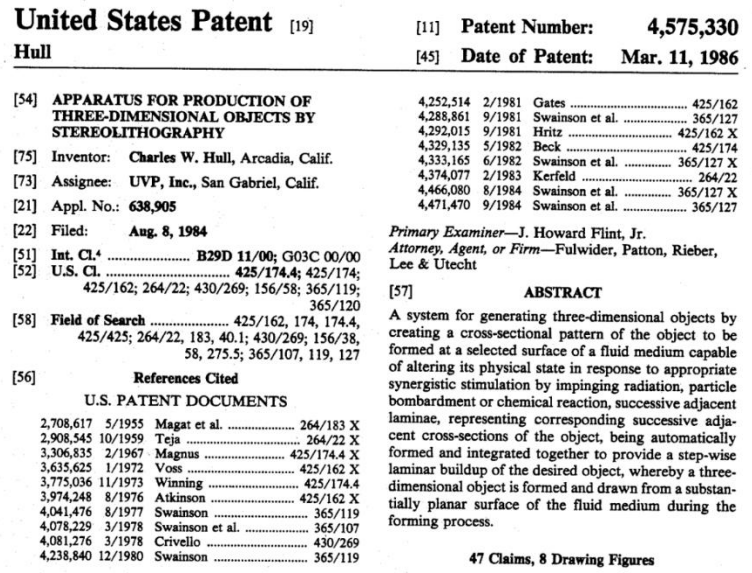
La impresión 3D metálica está revolucionando el mundo del automóvil porque conseguimos piezas metálicas operativas, en un menor espacio de tiempo y de calidad.

(Mintforpeople, 2022)

2.1.5 Estereolitografía (SLA)

2.1.5.1 Introducción Histórica

El estudio de las impresoras con inyección de tinta y su evolución dio sus primeros frutos en 1984, cuando Charles Hull (que acabaría siendo uno de los actores principales de la industria al co-fundar 3D Systems), saca a la luz el concepto de estereolitografía (también conocida como SLA) y pone patas arriba el mercado. (BITFAB, 2024)



United States Patent [19]
Hull

[11] **Patent Number: 4,575,330**
[45] **Date of Patent: Mar. 11, 1986**

[54] **APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREOLITHOGRAPHY**

[75] Inventor: **Charles W. Hull**, Arcadia, Calif.

[73] Assignee: **UVP, Inc.**, San Gabriel, Calif.

[21] Appl. No.: **638,905**

[22] Filed: **Aug. 8, 1984**

[51] **Int. Cl.**[4] **B29D 11/00**; G03C 00/00

[52] **U.S. Cl.** **425/174.4**; 425/174; 425/162; 264/22; 430/269; 156/58; 365/119; 365/120

[58] **Field of Search** 425/162, 174, 174.4, 425/425; 264/22, 183, 40.1; 430/269; 156/38, 58, 275.5; 365/107, 119, 127

[56] **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

2,708,617	5/1955	Magat et al.	264/183 X
2,908,545	10/1959	Teja	264/22 X
3,306,835	2/1967	Magnus	425/174.4 X
3,635,625	1/1972	Voss	425/162 X
3,775,036	11/1973	Winning	425/174.4
3,974,248	8/1976	Atkinson	425/162 X
4,041,476	8/1977	Swainson	365/119
4,078,229	3/1978	Swainson et al.	365/107
4,081,276	3/1978	Crivello	430/269
4,238,840	12/1980	Swainson	365/119
4,252,514	2/1981	Gates	425/162
4,288,861	9/1981	Swainson et al.	365/127
4,292,015	9/1981	Hritz	425/162 X
4,329,135	5/1982	Beck	425/174
4,333,165	6/1982	Swainson et al.	365/127 X
4,374,077	2/1983	Kerfeld	264/22
4,466,080	8/1984	Swainson et al.	365/127 X
4,471,470	9/1984	Swainson et al.	365/127

Primary Examiner—J. Howard Flint, Jr.
Attorney, Agent, or Firm—Fulwider, Patton, Rieber, Lee & Utecht

[57] **ABSTRACT**

A system for generating three-dimensional objects by creating a cross-sectional pattern of the object to be formed at a selected surface of a fluid medium capable of altering its physical state in response to appropriate synergistic stimulation by impinging radiation, particle bombardment or chemical reaction, successive adjacent laminae, representing corresponding successive adjacent cross-sections of the object, being automatically formed and integrated together to provide a step-wise laminar buildup of the desired object, whereby a three-dimensional object is formed and drawn from a substantially planar surface of the fluid medium during the forming process.

47 Claims, 8 Drawing Figures

Ilustración 4 La primera patente de impresión 3D, presentada por Charles Hull en 1984 y aprobada en 1986

Se trata de la técnica que hace posible crear un objeto en 3D a partir de datos digitales (que no son más que ceros y unos). En otras palabras, permite crear un modelo 3D a partir de una simple imagen.
Era revolucionario. Ya se podían realizar pruebas y ver cómo iba a quedar el objeto impreso de una forma muy aproximada, sin tener que emplear tiempo, recursos y materiales en testeos.

Aquí puedes ver los diagramas presentados por Charles Hull en su patente original y cómo es una impresora Form 2 de estereolitografía en la actualidad. El parecido es asombroso:

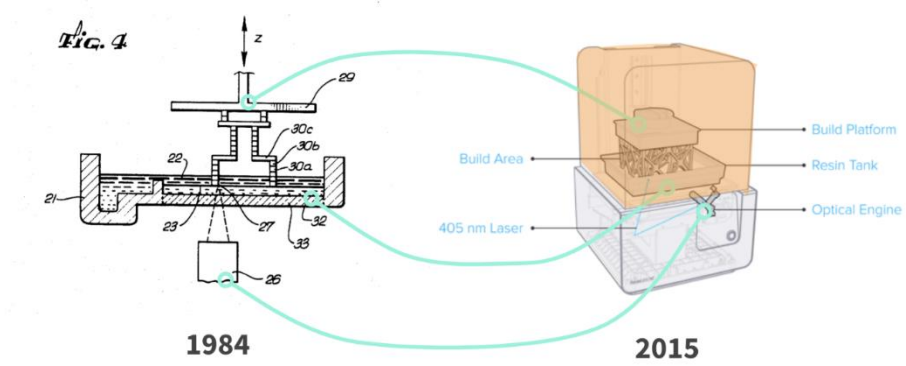


Ilustración 5 Evolución de la Tecnología de Impresión 3D: De 1984 a 2015

2.1.5.2 Definición

La polimerización en tanque es un proceso de impresión 3D en el que una fuente de luz cura o endurece de forma selectiva una resina de fotopolímero en un tanque. En otras palabras, la luz se dirige con precisión a un punto específico de una fina capa de plástico líquido para endurecerla. Este proceso se repite capa a capa hasta dar forma a una pieza en 3D

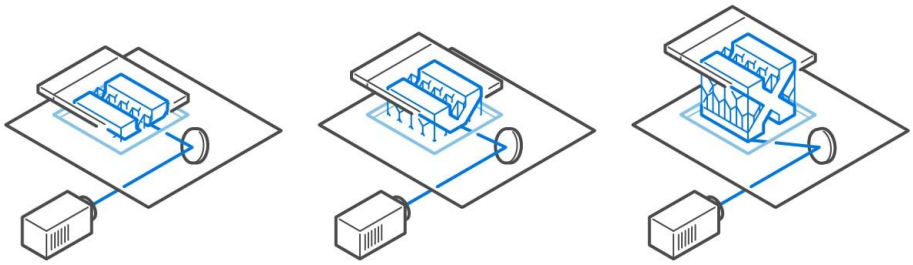


Ilustración 6 Polimerización en tanque con láser

Las impresoras SLA utilizan espejos, conocidos como galvanómetros o «galvos», con uno posicionado en el eje X y otro en el eje Y. Estos galvos dirigen rápidamente un rayo láser sobre un tanque de resina, curando y solidificando selectivamente una sección

transversal del objeto dentro de esta área de construcción, construyéndolo capa por capa.

La mayoría de las impresoras SLA utilizan un láser de estado sólido para el curado de las piezas. La desventaja de este tipo de impresora 3D, que utiliza un láser de punto, es que puede tardar más en trazar la sección transversal de un objeto que la tecnología DLP. (ALL3DP, 2024)

2.1.6 Sinterización por láser (SLS)

2.1.6.1 Introducción Histórica

El sinterizado selectivo por láser fue una de las primeras técnicas de fabricación aditiva, desarrollada a mediados de la década de los 80 por los doctores Carl Deckard y Joe Beaman en la Universidad de Texas en Austin. Desde entonces, su método se ha adaptado para que funcione con una multitud de materiales, como plásticos, metales, vidrio, cerámica y diversos materiales compuestos en polvo. Hoy en día, estas tecnologías se conocen de forma general como fusión de lecho de polvo: procesos de fabricación aditiva que utilizan energía térmica para fundir de forma selectiva partes de un lecho de polvo.

Los dos sistemas de impresión 3D con fusión de lecho de polvo más comunes en la actualidad son los basados en material plástico, que normalmente reciben el nombre de sistemas SLS, y los basados en metal, conocidos como sinterizado directo de metal por láser (DMLS) o fusión selectiva por láser (SLM). Hasta hace poco, los sistemas de fusión tanto del plástico como del metal tenían un coste prohibitivo y resultaban difíciles de manejar, lo que limitaba su uso a pequeñas cantidades de piezas a medida o de alto valor, como componentes para la industria aeroespacial o productos sanitarios.

Recientemente, la innovación en este campo ha experimentado un rápido crecimiento y parece que los sistemas SLS basados en plástico están siguiendo los pasos de otras tecnologías de impresión 3D, como la estereolitografía (SLA) o el modelado por deposición fundida (FDM), para convertirse en sistemas accesibles o compactos de gran aceptación.
(Formlabs, s.f.)

2.1.6.2 Definición

La fusión en lecho de polvo metálico es un proceso de impresión 3D que genera objetos sólidos utilizando una fuente térmica para inducir la fusión entre las partículas de polvo metálico de una capa cada vez.

La mayoría de las tecnologías de fusión en lecho de polvo emplean mecanismos para añadir polvo a medida que se construye el objeto, lo que da como resultado que el componente final quede encapsulado en el polvo metálico. Las principales variaciones en las tecnologías de fusión en lecho de polvo metálico provienen del uso de diferentes fuentes de energía, ya sean láseres o haces de electrones.

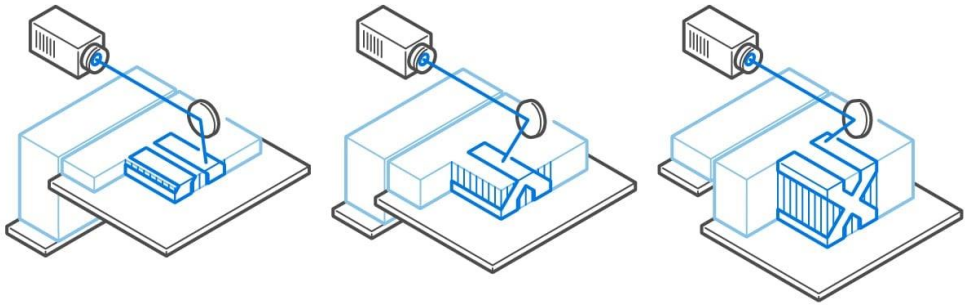


Ilustración 7 Fusión en lecho de polvo, o Powder Bed Fusion

En primer lugar, se calienta un recipiente de polvo polimérico a una temperatura justo por debajo del punto de fusión del polímero. A continuación, una cuchilla o rasqueta de recubrimiento deposita una capa muy delgada del material en polvo (normalmente de 0,1 mm de grosor) sobre una plataforma de construcción.

A continuación, un rayo láser de CO2 comienza a escanear la superficie. El láser sinteriza selectivamente el polvo y solidifica una sección transversal del objeto. Al igual que en el caso de la estereolitografía, el láser se enfoca hacia la ubicación correcta por medio de un par de galvos.

Una vez escaneada toda la sección transversal, la plataforma de construcción se mueve hacia abajo una altura equivalente al espesor de una capa. Estos pasos se repiten hasta que todos los objetos están completamente fabricados.

El polvo que no ha sido sinterizado permanece en su lugar como soporte para el objeto que sí lo ha sido, eliminando la necesidad de estructuras de soporte.

El microsinterizado selectivo por láser (μSLS) es, esencialmente, el sinterizado selectivo por láser (SLS) a escala diminuta. A menudo se denomina microsinterizado láser. Aunque la técnica SLS suele referirse a un proceso con plásticos, aquí el μSLS se refiere más bien a un proceso de sinterizado por láser con metales. El μSLS puede producir verdaderas piezas metálicas en 3D con una resolución inferior a 5 μm y un rendimiento superior a 60 mm3/hora.

En el μSLS, se recubre un sustrato con una capa de tinta de nanopartículas metálicas que luego se seca para producir una capa de nanopartículas uniforme. A continuación, se utiliza la luz láser que se ha modelado mediante una matriz digital de microespejos

para calentar y sinterizar las nanopartículas siguiendo el patrón deseado. Este conjunto de pasos se repite para construir cada capa de la pieza 3D en el sistema μSLS.

(ALL3DP, 2024)

2.1.7 Deposición fundida (FDM)

2.1.7.1 Introducción Histórica

La tecnología de modelado por deposición fundida (FDM), también llamada fabricación con filamento fundido (FFF) es una de las formas de impresión 3D más comunes.

El proceso de impresión 3D FDM fue inventado y patentado en 1989 por Scott Crump, y comercializado en 1990 por la empresa que fundó, Stratasys (EE.UU.). Al tratarse de una marca registrada, el acrónimo FDM no podía ser utilizado por nadie que no fuera Stratasys. Así que, cuando se lanzó el movimiento RepRap en 2005, el equipo dirigido por Adrian Bowyer creó el acrónimo FFF. Con ello se hace hincapié en el uso de filamento, mientras que las primeras impresoras FDM de Stratasys utilizaban gránulos o pellets. Básicamente, no hay ninguna distinción técnica entre estas dos siglas, ya que ambas representan el mismo proceso de fabricación aditiva.

(3Dnatives, 2023)

2.1.7.2 Definición

La extrusión de material es un proceso de impresión 3D en el que se empuja un filamento de material termoplástico sólido a través de una boquilla calentada, derritiéndolo en el proceso. La impresora deposita el material en una plataforma de construcción a lo largo de una trayectoria predeterminada, donde el filamento se enfría y solidifica para formar un objeto sólido.

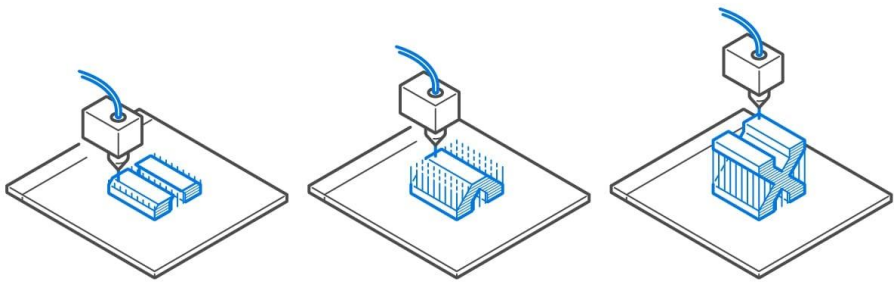


Ilustración 8 Extrusión de material

Los dispositivos de extrusión de material constituyen el tipo de impresora 3D más común y barata del mundo. El mecanismo es el siguiente: se carga una bobina de filamento en la impresora 3D y se hace pasar a través de una boquilla del cabezal de extrusión. Esta boquilla se calienta hasta la temperatura deseada y, a continuación, un motor impulsa el filamento a través de ella, provocando que se derrita.

Entonces, la impresora 3D mueve el cabezal de extrusión a lo largo de las coordenadas especificadas, depositando el material fundido sobre la placa de construcción, donde se enfría y solidifica. Una vez que se ha completado una capa, la impresora procede a colocar otra capa. Este proceso de impresión en secciones transversales se repite, construyendo capa sobre capa, hasta que el objeto está completamente formado.

Dependiendo de la geometría del objeto, a veces es necesario añadir estructuras de soporte, por ejemplo, si un modelo tiene partes que sobresalen mucho.

Para que te hagas una idea de su alcance, el modelado por deposición fundida se puede utilizar para crear piezas de construcción impresas en 3D mediante la extrusión de arcilla u hormigón, para dar forma a postres impresos en 3D mediante la extrusión de chocolate o para fabricar órganos impresos en 3D mediante la extrusión de células vivas en un biogel. Si un material se puede extrudir, se puede imprimir en 3D, o casi. (ALL3DP, 2024)

2.1.8 Selección de la tecnología de impresión 3D

Para este proyecto se ha optado por utilizar la tecnología de impresión 3D FDM, la cual es una de las tecnologías más usadas en la manufactura aditiva por ser fácilmente accesible. La Universidad Europea de Madrid cuenta con un laboratorio de fabricación digital (FABLAB) equipado con tecnología en maquinaria y software de diseño, del cual disponemos para realizar nuestro diseño. A continuación enumeraremos algunas características de la impresión por deposición fundida por las que destaca frente al resto de tecnologías.

- **Accesibilidad:** Las impresoras 3D FDM son una opción relativamente económica, existen equipos tanto para uso industrial como domestico de alta calidad y con precios bastante asequibles. En los últimos años se ha podido observar un gran aumento de calidad de los materiales mientras que los precios se han reducido.
    - **Variedad de materiales:** La variedad de materiales disponibles para esta tecnología es enorme, dependiendo de la aplicación podemos utilizar desde un polímero barato, sin muchas pretensiones como el PLA hasta un Policarbonato si se necesitan piezas resistentes. Por otro lado existen materiales más flexibles como pueden ser el TPU o TPE y materiales muy ligeros que emplean mezclas con fibra de carbono.

- **Facilidad de uso:** Las impresoras 3D FDM en general son máquinas bastante fáciles de usar, sobre todo las de gama profesional. Esto hace posible que se pueda tener un pequeño centro de producción o prototipado en la propia empresa, sin necesidad de personal especialmente cualificado. (bitlaf, s.f.)

2.1.8.1 Parámetros fundamentales en impresión 3D

A la hora de realizar un diseño se debe tener en cuenta el modo en el que se van a fabricar las piezas. A continuación se enumeran algunos parámetros a considerar para la fabricación mediante impresión 3D.

- **Velocidad de impresión:** Velocidad a la que el extrusor deposita el material, una velocidad más lenta mejorará la calidad de impresión. Si la velocidad es demasiado alta, esto puede generar vibraciones e inercias en el extrusor.

- **Aceleración:** Este es un parámetro que definirá la curva de velocidad desde 0 hasta llegar a la velocidad definida, o al revés, cuando frena. Esto tiene un efecto directo en el tiempo de impresión, pero también en la calidad, pues los ángulos y movimientos bruscos se van a ver amortiguados, reduciendo vibraciones.

- **Diámetro boquilla:** El agujero por donde sale el material marca la capacidad de material depositado por segundo. El diámetro estándar es de 0.4mm. Pero puede ir de 0.2 a 1.2mm. A mayor diámetro más material y mayor velocidad de impresión, lo que requiere menos fuerza por parte del extrusor. Un tamaño menor de boquilla permite un mejor acabado y definir muy bien los detalles superficiales de una figura.

- **Altura de capa:** La altura de la capa tiene un efecto directo en la estética y calidad de la pieza impresa. Una capa gruesa (0.3 mm) requerirá menos cantidad de capas lo que significa menos tiempo de producción sin embargo dará un acabado más rugoso. Si la capa es fina (0.1 mm), tardara más tiempo pero el acabado será mejor.

- **Volumen de extrusión:** Se debe conocer con precisión la cantidad de material que sale por cada paso del motor del extrusor en cada momento.

- **Temperatura de extrusión:** Es la temperatura a la que se calienta el material para fundirlo y que el extrusor lo deposite. Cada material tiene un rango de temperaturas de extrusión definido por el fabricante.

(Capa sobre capa, s.f.)

2.1.9 Materiales (FDM)

Existen muchos tipos de materiales dentro de la impresión por deposición, algunos de los más utilizados son los siguientes:

1. **PLA (ácido poliláctico):** El PLA es uno de los materiales más comunes en la impresión 3D debido a su fácil impresión, bajo coste y buena resistencia mecánica. Es un polímero biodegradable que se obtiene a partir de fuentes renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar.
   Este material es considerado un polímero semicristalino por tener una temperatura de fusión de entre 170-180ºC, por lo que no necesita una bandeja calentada. El principal uso de este material dentro de la industria, es el prototipado, de este modo las empresas ahorran dinero en la fabricación de moldes.

2. **ABS (acrilonitrilo butadieno estireno):** Otro de los materiales más utilizados en la impresión 3D, es el ABS. El ABS es un polímero termoplástico que se utiliza en la fabricación de piezas que requieren una alta resistencia al impacto y a la temperatura ya que se caracteriza por su alta resistencia y durabilidad. Al contrario que el PLA este material es un derivado del petróleo, lo que significa que es altamente contaminante y además nocivo para la salud durante su impresión, por lo que se recomienda una impresora con recinto cerrado. Otra diferencia con el PLA es que el ABS si necesita una cama precalentada entre 80-130ºC para su impresión ya que su temperatura de fusión es de 230-260ºC.

   En términos de uso, el ABS es un material más técnico por lo que tiende a ser más utilizado en la industria como para la creación de engranajes, herramientas y también prototipos, es ampliamente utilizado en la industria automotriz y en la producción de juguetes.

3. **PETG (tereftalato de polietileno glicol):** El PETG es un material que combina las propiedades del PLA y el ABS. Es resistente, flexible y fácil de imprimir. Además, ofrece una buena resistencia química y térmica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales. El PETG se puede utilizar para diversas aplicaciones como la fabricación de envases, botellas y productos médicos. Al igual que los anteriores materiales se utiliza en la creación de prototipos gracias a su alta rentabilidad.

4. **HIPS:** Este material tiene buenas propiedades mecánicas, a medio camino entre el polipropileno y la goma. Además se adhiere muy bien al ABS. Y teniendo en cuenta que se disuelve en limoneno hace que sea muy buen material de soporte para el ABS.

5. **Materiales con cargas de fibras:** Con la entrada de la impresión 3D en el sector industrial, ha surgido la necesidad de utilizar materiales cada vez más resistentes a esfuerzos mecánicos y ambientes corrosivos, dando como resultado el nacimiento de materiales con cargas de fibras de vidrio y de carbono.

   La fabricación por filamento con cargas de fibras, también conocida como FFF, incorpora compuestos de polímeros reforzados con fibra continua (FRP) llamados composites.
   Los compuestos FRP a diferencia del acero o del aluminio son anisotrópicos, es decir, sus propiedades son direccionales, por lo tanto, las propiedades mecánicas más altas están de la dirección de colocación de las fibras.
   Estas fibras refuerzan el material base elevando la resistencia a la fatiga y rigidez a bajas y altas temperaturas. El resultado es un mayor rendimiento en sus aplicaciones finales consiguiendo llegar a ofrecer la misma fiabilidad que una pieza mecanizada.

6. **Nylstrong (PA6):** El Nylstrong es una poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio, como se ha explicado anteriormente es un material reforzado con fibras por lo que se caracteriza por sus excelentes propiedades mecánicas, un alto nivel de rigidez, excelente resistencia al calor, al impacto y al desgaste haciéndolo ideal para aplicaciones funcionales y piezas que deben soportar cargas y esfuerzos.
   El PA6 es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en diversas industrias como la automotriz, electrónica o en la fabricación de equipos industriales (engranajes, ruedas dentadas, rodillos…).

   La impresión de este material presenta algunos desafíos como:

   - Absorción de humedad.
   - Alta temperatura de impresión (Tª extrusión entre 240-260ºC)
   - Adhesión a la cama de impresión.
   - Deformación en piezas grandes.

7. **Metales:** Junto a los materiales con fibras, la impresión 3D de metal ha experimentado un crecimiento muy rápido en industrias como la aeroespacial, automotriz o medica ya que permite producir series pequeñas de piezas metálicas a un precio muy reducido en comparación con las tecnologías de fabricación tradicionales como el CNC y la fundición.
   Este tipo de materiales para impresora 3D están compuestos por un alto grado de polvos metálicos y una parte de polímeros aglutinantes. Para conseguir fabricar piezas funcionales con estos materiales, es necesario pasar por un proceso de eliminación del material aglutinante y sinterización, después de haber impreso la pieza.

Una vez sintetizada la pieza, podrás realizar tareas de postprocesado como pulido, fresado, roscado, torneado, soldaduras, entre otros. (InfoCNC, s.f.) y (capasobrecapa, s.f.)

2.1.9.1 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales son esenciales para entender su comportamiento en distintas aplicaciones y entornos. Comprender estas propiedades nos permite conocer cómo interactúan los materiales con las fuerzas que actúan sobre ellos y así poder diseñar de la manera más eficiente.

Propiedades como su capacidad para resistir y soportar fuerzas externas, deformarse y recuperar su forma original, así como su resistencia al desgaste y la fatiga son fundamentales en el diseño y la fabricación de cualquier objeto o estructura, ya que determinan su estabilidad, durabilidad y seguridad. (polaridad, s.f.)

Existen diversos tipos de propiedades mecánicas que son de vital importancia, a continuación se definirán algunas de ellas para su comprensión y posterior calculo en ciertos materiales.

- **Resistencia:** La resistencia de un material es una propiedad mecánica fundamental a la hora de determinar si es adecuado para una determinada aplicación. Se puede medir a través de pruebas de tracción, compresión o flexión, y se expresa en unidades de presión, como MPa o psi.

- **Dureza:** La dureza de un material es la resistencia que ofrece en su superficie a la penetración o a ser rayado. Se puede medir utilizando escalas de dureza como la escala de Mohs o la escala de Rockwell.

- **Elasticidad:** La elasticidad es la propiedad mecánica que le permite a un material deformarse bajo la acción de una fuerza y luego recuperar su forma original cuando esta se detiene. Se puede describir a través de la ley de Hooke y se expresa en términos de módulo elástico.

- **Plasticidad:** La plasticidad de un material es su capacidad para deformarse de manera permanente bajo la acción de una fuerza. Es una propiedad que permite la conformación y manipulación de los materiales en procesos de fabricación.

- **Tenacidad:** La tenacidad de un material se refiere a su resistencia a la fractura cuando se somete a una carga. Es una combinación de resistencia y ductilidad.

- **Fatiga:** La fatiga es la capacidad de un material para resistir cargas cíclicas repetitivas sin fracturarse. Es especialmente relevante en aplicaciones donde el material está sujeto a vibraciones o movimientos constantes. (Polaridad.es, s.f.)

2.1.10 Engranajes

2.1.10.1 Introducción

Un engranaje es mecanismo de transmisión formado por dos o más ruedas dentadas engranadas entre si las cuales permiten transmitir un movimiento circular de una rueda a otra mediante el contacto de sus dientes con velocidad constante y sin deslizamiento. Los engranajes no solo transmiten un movimiento giratorio sino que dependiendo de la relación entre el número de dientes de las dos ruedas dentadas, se puede aumentar o disminuir la velocidad de giro.

En una transmisión por engranajes se puede distinguir entre rueda conductora solidaria al eje de entrada (input o eje motor) y la rueda conducida a la que se transmite el movimiento y que es solidaria al eje de salida (output). (Ingemecánica, s.f.)

Cuando una transmisión está formada por ruedas de diferentes tamaños, la rueda de menor tamaño se denomina piñón y la de mayor tamaño corona.

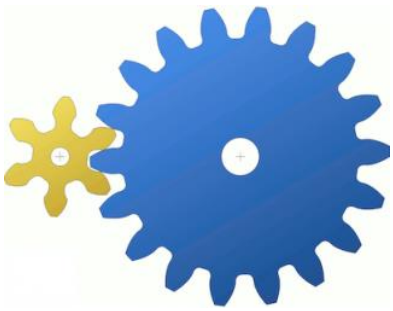


Ilustración 9 Engrane de dos ruedas

2.1.10.2 Clasificación

Existen diferentes tipos de engranajes, estos pueden clasificarse de varias maneras, según la forma de sus dientes, según la disposición de los ejes y según sus aplicaciones específicas. A continuación definiremos algunos tipos de engranajes:

Engranajes de ejes paralelos

Los engranajes de ejes paralelos son el tipo más común y simple ya que son fáciles de fabricar y transmiten potencia con mayor eficiencia que cualquier otro tipo de engranaje.

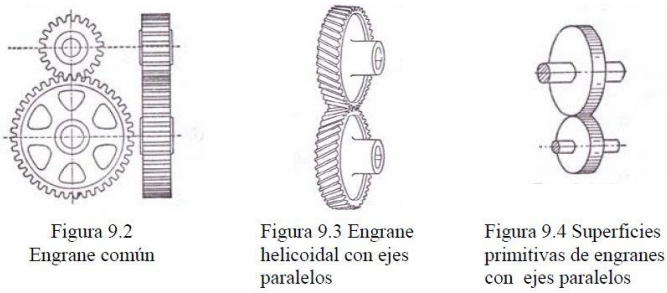


Figura 9.2
Engrane común

Figura 9.3 Engrane helicoidal con ejes paralelos

Figura 9.4 Superficies primitivas de engranes con ejes paralelos

Ilustración 10 Ejemplo de engrane de ejes paralelos

Dentro de los engranajes de ejes paralelos podemos diferenciar entre engranajes de dientes rectos y engranajes de dientes helicoidales:

Engranaje Recto

El engranaje recto es una rueda dentada muy simple cuyos dientes son rectos, es decir, son cilindros con dientes que se proyectan de manera radial. La proyección de los dientes puede encontrarse en el exterior o interior de la rueda.

Ilustración 11 Engranaje de dientes rectos

Engranajes helicoidales

Un engranaje helicoidal es muy similar a un cilíndrico recto, es una rueda dentada cuyos dientes están inclinados respecto al eje de rotación.

Ilustración 12 Engranaje helicoidal

Dentro de los engranajes helicoidales, existen los engranajes de espina o engranajes dobles. Son un tipo de engranajes cuyo perfil está compuesto por dos dentados helicoidales, de manera que el perfil del engranaje tiene forma de V.

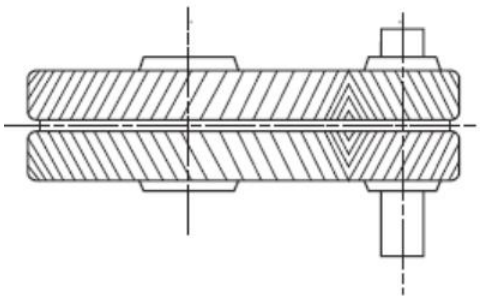


Ilustración 13 Engranaje en V de ejes paralelos

Engranajes de ejes perpendiculares

Los engranajes de ejes perpendiculares se utilizan para transmitir un movimiento entre ejes que se cruzan, generalmente formando un ángulo de 90 grados. Dentro de este tipo de engranajes podemos diferenciar entre engranajes cónicos y tornillos sin fin. En este caso explicaremos los engranajes cónicos:

Un engranaje cónico es una rueda dentada cuyos dientes tienen forma cónica. Al igual que los engranajes de ejes paralelos, los engranajes cónicos pueden tener dientes rectos o curvos (helicoidales). (Ingenierizando, s.f.)

Ilustración 14 Engranaje Cónico de ejes perpendiculares

2.1.10.3 Parámetros geométricos

Para entender la geometría de los engranajes y su funcionamiento, es necesario conocer una serie de parámetros y elementos de su estructura.

A continuación se definen dichos parámetros:

- **Paso** (*p*): El también llamado paso circular o circunferencial es la distancia desde un punto de un diente hasta el mismo punto del diente adyacente.

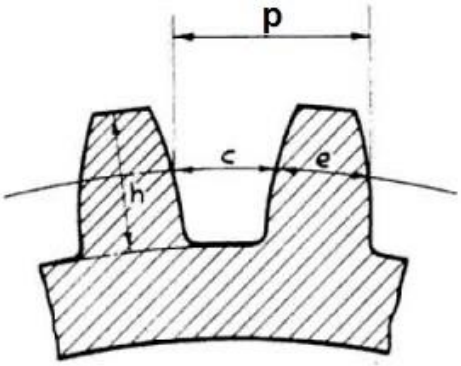


Ilustración 15 Paso circular o circunferencial

$$p = \frac{\pi * d}{Z}$$

p, el paso del diente (en mm);
d, el valor del diámetro primitivo (en mm);
Z, el número de dientes.

- **Módulo** (*m*): Relación que existe entre el diámetro primitivo del engranaje y el número de dientes (*Z*) que contiene la rueda. Para que dos engranajes puedan engranar deben tener el mismo módulo, *m.*

$$m = \frac{d}{Z}$$

- **Paso Diametral o Diametral Pitch** (*Dp*): El diametral pitch o paso diametral es el cociente entre el número de dientes (*Z*) y el diámetro primitivo (*d*).

$$D_p = \frac{Z}{d}$$

- **Circunferencia de cabeza** (R_a): Circunferencia que limita a los dientes exteriormente.
- **Circunferencia de pie** (R_f): Circunferencia que limita el hueco entre dientes por su parte inferior.

- **Adendo o altura de cabeza** (h_a): Distancia radial entre la circunferencia primitiva y la cabeza del diente.
  Para un perfil de referencia normalizado:

$$h_a = m$$

- **Dedendo o altura de pie** (h_f): Distancia radial entre la raíz del diente y la circunferencia primitiva.
  Para un perfil de referencia normalizado:

$$h_f = 1.25 * m$$

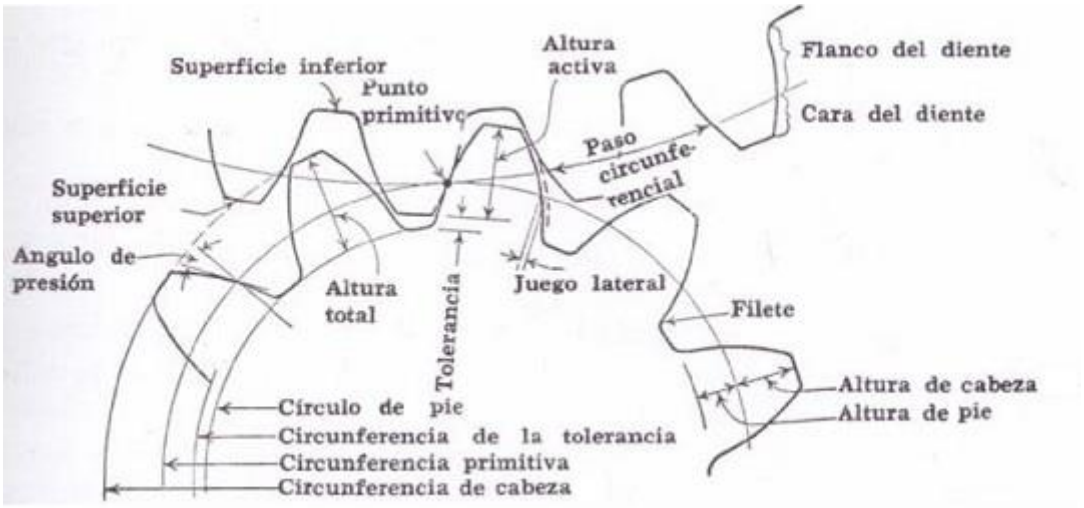


Ilustración 16 Nomenclatura usada en engranajes

- **Altura total** (*h*): Es igual a la suma de las alturas de cabeza y de pie. Para un perfil de referencia normalizado:
  - $h = 2.25 * m$

- **Espesor del diente** (*s*): El espesor del diente es el que viene medido sobre la circunferencia primitiva. Para un perfil de referencia normalizado:

$$S = m * \frac{\pi}{2}$$

- **Cara del diente**: Es la parte de la superficie del diente que queda entre la circunferencia primitiva y la de cabeza.

- **Ángulo de presión** (*α*): Es el ángulo que forma la línea de presión (que es la línea normal a la superficie del diente en el punto de contacto entre dos engranajes) con la tangente a ambas circunferencias primitivas.

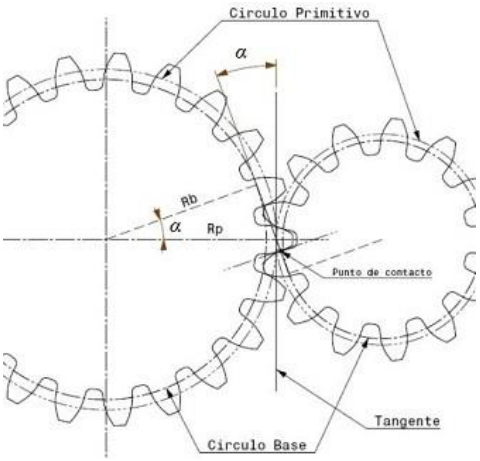


Ilustración 17 Ángulo de presión, (α)

2.1.10.4 Parámetros de diseño

Condición de engrane:

Para que dos ruedas dentadas engranen de la manera correcta, se debe cumplir la condición de engrane, al igual que dos engranajes deben tener el mismo módulo, dos engranajes deben
El principio fundamental o condición de engrane entre dos dientes se basa en que el perfil de éstos debe ser tal que la normal trazada por el punto de contacto entre los dos dientes pase siempre por un punto ***O*** que se sitúa en la línea que une los dos centros de rotación de los engranajes, y que las distancias entre dicho punto ***O*** y los respectivos centros, coincida con sus correspondientes radios primitivos.

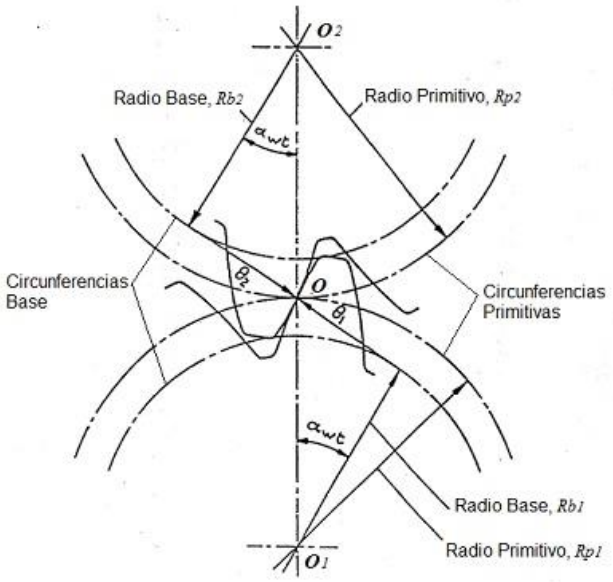


Ilustración 18 Plano de la sección transversal

Relación de transmisión

En un sistema formado por dos engranajes, el engranaje que transmite el movimiento, es decir la entrada, se denomina rueda conductora y la de salida rueda conducida. Se denomina relación de transmisión (r_t) a la relación que existe entre las velocidades de rotación de los dos engranajes, es el cociente entre la velocidad de salida y la velocidad de entrada ($r_t = \omega_2 / \omega_1$).

De esta forma se tiene que:

- si $r_t < 1$, el sistema se denomina reductor.
- si $r_t > 1$, el sistema se denomina multiplicador.

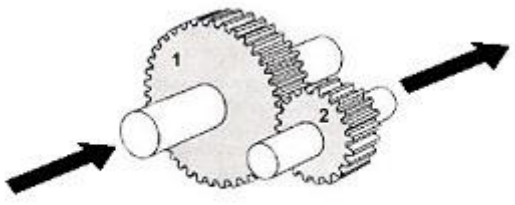


Ilustración 19 Transmisión de engranajes

Matemáticamente, la relación de transmisión (i) puede ser expresada de múltiples maneras, según las siguientes expresiones:

- $i = \frac{w_2}{w_1}$
- $i = \frac{n_2}{n_1}$
- $i = \frac{d_1}{d_2}$
- $i = \frac{Z_2}{Z_1}$

- ω_2 y ω_1, las velocidades angulares (en *rad/s*) de los engranajes de salida y de entrada, respectivamente.
- n_2 y n_1, las velocidades de giro (en *r.p.m.*) de los engranajes de salida y de entrada, respectivamente.
- d_2 y d_1, los diámetros primitivos (en mm) de los engranajes de salida y de entrada, respectivamente.
- Z_2 y Z_1, los números de dientes de los engranajes de salida y de entrada, respectivamente.

Por otro lado, según la magnitud de la relación de transmisión que se pretenda conseguir, puede que sea necesario emplear una transmisión por engranajes constituida por más de una etapa. (Ingemecánica, s.f.)

Ilustración 20 Transmisión por engranajes multi-etapas

2.1.10.5 Aplicaciones

Los engranajes juegan un papel crucial en una amplia variedad de industrias. A continuación, se describen las aplicaciones más destacadas.

Automoción

En el sector automotriz, los engranajes son esenciales para el funcionamiento de numerosos sistemas de los vehículos.

- Cajas de cambios: Los engranajes en las cajas de cambio permiten la selección de diferentes velocidades del vehículo.
- Diferenciales: Estos dispositivos usan engranajes para distribuir la potencia a las ruedas, mejorando la tracción en curvas.
- Sistemas de dirección asistida: Incorporan engranajes para facilitar el giro del volante y reducir el esfuerzo del conductor.

Maquinaria industrial

En la industria, los engranajes son vitales para una variedad de máquinas y equipos.

- Máquinas herramientas: Utilizan engranajes para garantizar movimientos precisos durante la fabricación de piezas.
- Sistemas de transporte: Los engranajes ayudan en el movimiento de cintas transportadoras, grúas y otros equipos de manipulación de materiales.
- Maquinaria de construcción: Equipos pesados como excavadoras y grúas usan engranajes para transmitir potencia y movimiento.

Electrodomésticos

Numerosos dispositivos domésticos cuentan con engranajes para su funcionamiento óptimo.

- Lavadoras: Incorporan engranajes para el movimiento del tambor y la bomba de agua.
- Batidoras: Utilizan engranajes para variar la velocidad de las cuchillas.
- Aspiradoras: Los engranajes ayudan a accionar las ruedas y los cepillos giratorios.

Relojería y juguetes

Los engranajes son fundamentales para la precisión y el funcionamiento de relojes y juguetes.

- Relojes: Los mecanismos internos están compuestos por múltiples engranajes que aseguran una medida del tiempo precisa.
- Juguetes: Muchos juguetes mecánicos utilizan engranajes para crear movimientos y efectos diferentes. (Angis, s.f.)

2.1.10.6 Ventajas y desventajas

Ventajas de los engranajes

- **Precisión:** Los engranajes proporcionan una transmisión de movimiento altamente precisa, minimizan el deslizamiento, garantizando una sincronización exacta entre los componentes conectados.

- **Eficiencia:** Los engranajes pueden operar con pérdidas mínimas de energía, lo que los hace ideales para aplicaciones donde la conservación de energía es crucial.

- **Durabilidad:** Los engranajes son componentes robustos que pueden soportar grandes esfuerzos mecánicos, lo que aumenta su vida útil, especialmente en entornos industriales pesados.

- **Compactos:** Los engranajes son componentes compactos permiten diseñar sistemas compactos y eficientes, optimizando el uso del espacio disponible.

Posibles desventajas del uso de engranajes

- **Coste:** La fabricación de engranajes, especialmente aquellos con especificaciones precisas y materiales de alta calidad, puede resultar costosa.

- **Ruido:** El ruido generado por los engranajes durante su funcionamiento es una preocupación común. Este es particularmente notorio en engranajes rectos y puede ser un factor limitante en aplicaciones donde se requiere un funcionamiento silencioso.

- **Mantenimiento:** Aunque los engranajes son duraderos, requieren un mantenimiento adecuado para funcionar de manera óptima, lo que incluye la correcta lubricación para reducir el desgaste y la inspección regular para detectar posibles fallos. (Angis, s.f.)

2.1.10.7 Fabricación de engranajes

Los engranajes han perdurado durante siglos, convirtiéndose en uno de los elementos mecánicos más antiguos que aún persisten en la actualidad. Existen varios métodos para la fabricación de estos elementos como pueden ser la forja, la extrusión, la pulvimetalurgia, el corte, el fresado o el mecanizado. Este último es el más común, sin embargo cada proceso aporta características diferentes a los engranajes, por lo que la elección del método dependerá del tipo de engranaje y su aplicación específica.

Por otro lado también se utilizan diferentes tipos de materiales para la fabricación de los engranajes como metales, plásticos o incluso madera. Mientras el mecanizado es el proceso más común para fabricar engranajes metálicos, la inyección es el proceso más utilizado para los engranajes de plástico. Gracias al progreso tecnológico cada vez hay más métodos de fabricación alternativos como la fabricación aditiva, una tecnología que permite la producción de diseños complejos incorporando estructuras reticulares diseñadas para reducir la masa, algo que no se puede lograr fácilmente con los métodos tradicionales. (mentira, s.f.)

El siguiente estudio se centrara en la fabricación de engranajes por el método de fabricación aditiva, un método que como ya se ha explicado anteriormente opera construyendo un objeto tridimensional capa por capa basado en un modelo CAD 3D.

Engranajes plásticos

Los engranajes de plástico se utilizan ampliamente en aplicaciones como herramientas electrónicas, electrodomésticos o en el sector de la automoción debido a su rentabilidad en comparación con los engranajes metálicos. El bajo coste y la facilidad de fabricación son factores clave que las empresas buscan para reducir los gastos de producción, es cierto que los engranajes fabricados mediante impresión 3D FDM ofrecen numerosas ventajas pero también presentan ciertos desafíos, a continuación se muestran algunas características de ellos:

- **Peso reducido:** Son significativamente más ligeros en comparación con los engranajes metálicos tradicionales, lo que reduce la carga en los motores y aumenta la eficiencia del sistema.

- **Versatilidad:** Los engranajes de plástico nos permiten elegir entre diversos tipos de materiales en función de las necesidades específicas de la aplicación, permitiendo optimizar las propiedades del engranaje.

- **Alta inercia química:** Presentan un alto grado de inercia química frente a sustancias acuosas y agresivas por lo que no se oxidan ni se corroen, prolongando la vida útil de los engranajes en condiciones desafiantes.

- **Bajo coeficiente de fricción:** Los plásticos tienen un bajo coeficiente de fricción, garantizan una operación más suave reduciendo el desgaste y la necesidad de lubricación frecuente.

- **Necesidad reducida de lubricación:** Algunos plásticos presentan propiedades autolubricantes lo que reduce la necesidad de lubricación adicional, disminuye los costos de mantenimiento y mejora la limpieza del sistema.

- **Reducción de costos:** La eliminación de procesos obsoletos reduce los costes de los engranajes termoplásticos especialmente para pequeñas series de producción o prototipos.

- **Eliminación de costos de montaje:** La capacidad de imprimir engranajes de plástico en una sola pieza, reduce el tiempo y los costos asociados con el montaje.

- **Simplificación de componentes:** Se reduce el número de componentes en el interior de la maquinaria, lo que facilita el diseño y la construcción de sistemas más simples y eficientes, reduciendo el riesgo de fallos y la complejidad del mantenimiento.

- **Menor resistencia mecánica:** Los plásticos en comparación con los metales presentan una menor resistencia a tracción y al impacto, esto limita su uso en aplicaciones de alta carga en donde estos pueden desgastarse o deformarse rápidamente.

- **Desgaste:** Aunque los plásticos sean resistentes al desgaste, estos pueden desgastarse rápidamente bajo condiciones de alta fricción.

- **Sensibilidad a la temperatura:** Los plásticos pueden deformarse a altas temperaturas lo que afecta a su precisión y durabilidad en aplicaciones donde las temperaturas varían significativamente.

- **Propiedades mecánicas inferiores:** Los engranajes fabricados por impresión 3d suelen tener propiedades mecánicas inferiores debido a la anisotropía y a la presencia de capas lo que limita su resistencia y durabilidad.

Capítulo 3. Estudio de materiales

3.1 Metodología

3.1.1 Introducción

En este apartado se define el procedimiento metodológico para llevar a cabo un estudio de materiales seleccionados. En este estudio se evaluarán las propiedades mecánicas de los materiales mediante un ensayo de tracción, una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería. Esta prueba nos permitirá determinar la resistencia y capacidad de deformación de un material sometido a tensiones. El ensayo de tracción proporciona información crucial para diseñar componentes ya que permite determinar las propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia a la tracción, el límite elástico, la elongación, la reducción de área, entre otros.

3.1.2 Elección de materiales

Primeramente, se discutirá la elección de los materiales utilizados para la impresión 3d en este proyecto. Se describirán detalladamente las propiedades de los materiales seleccionados y las razones específicas que justifican la elección de cada uno de ellos para su estudio.

3.1.3 Elección del diseño experimental

La elección del diseño experimental debe cumplir el objetivo del estudio. Primeramente, se realizarán probetas de cada material con las configuraciones óptimas de impresión definidas por el fabricante. Seguidamente, se someterán a ensayos de tracción para obtener los valores característicos de los mismos y así poder realizar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de los materiales impresos.

3.1.4 Ensayo de tracción

Se hará una descripción detallada del ensayo de tracción así como de las propiedades mecánicas que se medirán.

3.1.5 Equipo experimental

Se proporcionara una descripción detallada de todos los equipos utilizados para la realización de los procedimientos, incluyendo información sobre la impresora 3D,

materiales de impresión, instrumentos de medición, máquina de ensayo y cualquier otro equipo relevante.

3.1.6 Realización experimento

Para la realización de este apartado, se emplearán dos procedimientos básicos y diferenciados dentro de los cuales se llevarán a cabo los respectivos pasos a seguir.

3.1.6.1 Impresión 3D

Se obtendrán probetas mediante la impresión 3D de los materiales seleccionados para ensayarlas y obtener sus propiedades mecánicas. El diseño de dichas probetas será basado en la normativa ISO e impresas según los parámetros de impresión de cada material descritos en de su ficha técnica.

3.1.6.2 Ensayo de tracción

En este procedimiento se llevara a cabo el ensayo de tracción de las probetas obtenidas anteriormente según los métodos estandarizados. El objetivo de este ensayo es determinar una serie de valores característicos para fines comparativos.

3.1.7 Análisis

Una vez realizados los ensayos, se tendrán todos los datos necesarios para generar las curvas de tensión deformación y calcular las propiedades mecánicas de los materiales.

3.1.8 Conclusiones

Finalmente en este apartado se exponen las conclusiones obtenidas tras el análisis de los resultados, permitiendo mejorar y aportar conocimiento sobre el estudio.

3.2 Elección de materiales

La mayoría de los fallos de los engranajes impresos en 3D se deben a la elección de los materiales incorrectos, a la configuración incorrecta de la impresora y a la especificación del relleno incorrecto (lo que da lugar a engranajes débiles que se rompen o a engranajes que cuestan demasiado en materias primas). (additive-x, s.f.)

Para evaluar los materiales de impresión 3D disponibles para fabricar engranajes, es crucial considerar varios factores: resistencia mecánica, durabilidad, resistencia al desgaste, facilidad de impresión y costo. A continuación, se analizarán varios de los materiales más comunes de los cuales seleccionaremos tres para su posterior ensayo y uso en la fabricación de engranajes:

Material	Resistencia Mecánica	Temperatura de Uso	Durabilidad	Facilidad de Impresión	Costo
PLA	Buena	Hasta 60°C	Baja	Muy fácil	Bajo
ABS	Buena	Hasta 85°C	Moderada	Requiere cama caliente	Moderado
PA6	Excelente	Hasta 120°C	Alta	Difícil, requiere cama caliente	Moderado a alto
PETG	Buena	Hasta 80°C	Moderada	Fácil	Moderado
PC	Muy alta	Hasta 110°C	Alta	Difícil, requiere cama caliente y alta temperatura	Alto
TPU	Alta flexibilidad	Hasta 80°C	Buena	Moderada	Moderado
PEEK	Excepcional	Hasta 250°C	Muy alta	Muy difícil, requiere impresoras especializadas	Muy alto
HIPS	Similar a ABS	Hasta 85°C	Moderada	Fácil	Bajo
PP	Buena	Hasta 100°C	Buena	Difícil, propenso a deformación	Moderado
CF Reinforced	Muy alta	Variable	Alta	Moderada a difícil	Alto

Tabla 1 Propiedades de materiales FDM

Analizando la tabla anterior y teniendo en cuenta la disponibilidad de materiales con los que cuenta el Fablab de la universidad, se ha optado por elegir el PLA, ABS y PA6. Un factor muy importante para este proyecto es la facilidad de impresión ya que algunos de los materiales a pesar de tener cualidades excepcionales son muy difíciles de imprimir, lo que limita nuestra selección.

A continuación se muestran algunas características de los materiales seleccionados:

3.2.1 PLA

Ventajas:

- Muy fácil de imprimir, ideal para prototipos rápidos.

Desventajas:

- Menor resistencia al impacto y al desgaste.
- No adecuado para piezas que estarán sometidas a altas temperaturas.

3.2.2 ABS

Ventajas:

- Presenta una buena resistencia al impacto y a la tracción.
- Es posible mejorar su acabado gracias al post-procesado.

Desventajas:

- Presenta mayor dificultad de impresión que el PLA.

3.2.3 PA6

Ventajas:

- Presenta una alta resistencia al desgaste, al impacto y a la fricción.

Desventajas:

- Difícil de imprimir debido a la absorción de humedad y la necesidad de una cama caliente.
- Requiere almacenamiento en ambientes secos.

3.2.4 Conclusiones

Para la fabricación de engranajes el Nylstrong (PA6) es aparentemente el material más adecuado debido a sus superiores propiedades y durabilidad en aplicaciones mecánicas. A pesar de ello, es un material difícil de imprimir, por lo que también usaremos el PLA y el ABS como materiales más enfocados al prototipado y poder comprobar que los diseños son correctos.

3.3 Ensayo de tracción

3.3.1 Definición del ensayo

El ensayo de tracción es uno de los más habituales en el área de los ensayos mecánicos en plásticos y polímeros. El procedimiento se define en varias normas, siendo las más comunes la ISO 527-1 (Principios generales), ISO 527-2 (Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión) y la ASTM D638. En este ensayo una probeta del material elegido, se sujeta por ambos lados y se somete a una prueba de tracción creciente hasta su fractura.

La idea central de la norma ISO 527 es la elevada comparabilidad de los resultados de ensayo entre laboratorios, empresas y a nivel internacional. (zwick Roell, s.f.)

3.3.2 Objetivos y valores característicos

El objetivo principal del ensayo de tracción es obtener de las propiedades mecánicas de los materiales, tales como:

- **Resistencia a la Tracción:** La máxima tensión que el material puede soportar antes de fracturarse, calculada como la fuerza máxima dividida por el área de la sección transversal original de la probeta.
- **Módulo de Elasticidad (Módulo de Young):** La relación entre la tensión y la deformación en la región elástica del material, indicando la rigidez del material.
- **Elongación a la Fractura:** La cantidad de estiramiento o deformación que experimenta la probeta antes de romperse, expresada como un porcentaje de la longitud original.
- **Curva Tensión-Deformación:** Un gráfico que muestra la relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante, proporcionando una visualización completa del comportamiento mecánico del material.

3.4 Equipo experimental

A continuación se llevará a cabo una descripción detallada tanto del equipo experimental utilizado para el diseño, impresión y ensayo a tracción de las probetas, como de los materiales utilizados en los procedimientos.

3.4.1 Para impresión 3D

Para la impresión de las probetas se ha utilizado el equipo del Fablab de la universidad en donde hay diferente maquinaria a nuestra disposición. Los equipos necesarios y elegidos para ello han sido los siguientes:

- Software (diseño): SolidWorks
- Impresora 3D: Bambu Lab X1-Carbon Combo 3D Printer
- Software (impresión): Bambu Studio
- Materiales: ABS, PLA y PA6

Software (diseño)

Para realizar el diseño de las probetas se ha hecho uso del Software SolidWorks, un programa de diseño CAD 3D que permite tanto modelar piezas y ensamblajes en 3D como realizar planos en 2D. Ofrece una gran variedad de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo de producto.

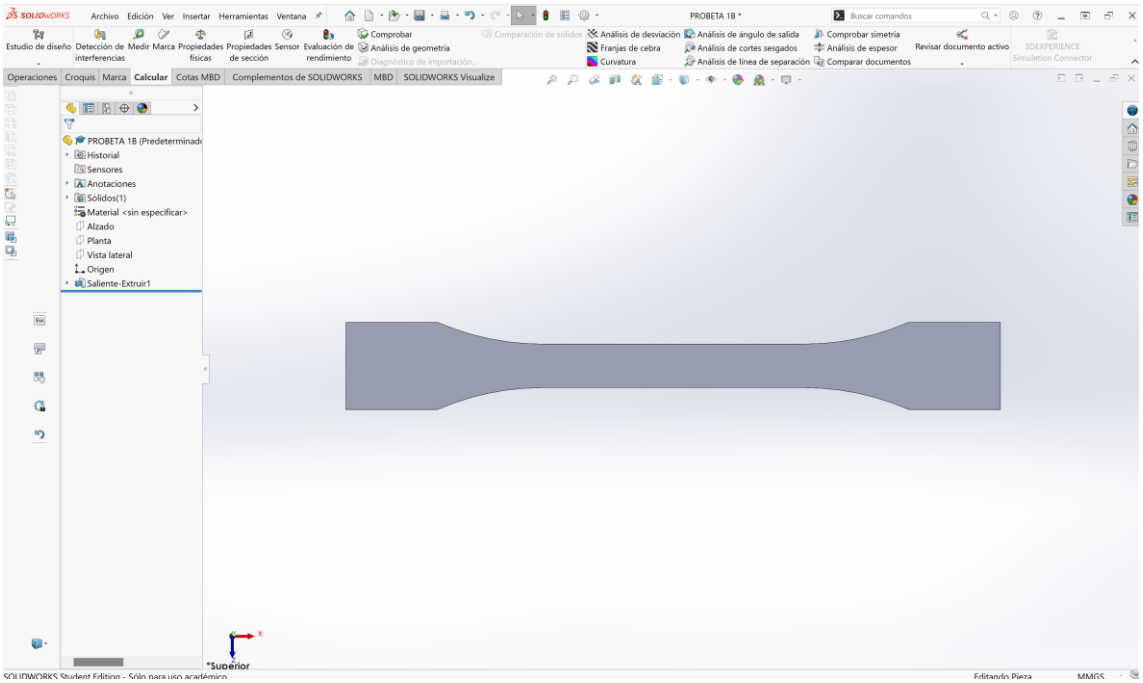


Ilustración 21 Probeta diseñada en SolidWorks

Impresora 3d (Bambu Lab X1)

La impresora utilizada es una impresora que utiliza el modelado por deposición fundida añadiendo capa a capa de filamento de material fundido, en estos casos PLA, ABS y PA6. La boquilla de la impresora es de acero templado de 0,4 mm, con una temperatura máxima del extremo caliente de 300ºC y compatible con PLA, PETG, TPU, ABS, ASA, PVA, PET Ideal para PA, PC, filamento reforzado con fibra de carbono/vidrio.

Ilustración 22 Bambu Lab X1-Carbon Combo 3D Printer

Características de la impresora:

Volumen de construcción (ancho x profundidad x alto)	256 × 256 × 256 mm³
Boquilla	Acero templado de 0,4 mm
Hotend	Todo metal
Temperatura máxima del extremo caliente	300 ℃
Diámetro del filamento	1.75 mm
Filamento compatible	PLA, PETG, TPU, ABS, ASA, PVA, PET Ideal para PA, PC, filamento reforzado con fibra de carbono/vidrio
Superficie de placa de construcción	Placa de PEI texturizada de Bambu **o** Placa fría de Bambu（Preinstalado, aleatorio, Ambos compatibles con Micro Lidar）
Temperatura máxima de la placa de construcción	110 ℃ @ 220 V, 120 ℃ @ 110 V
Velocidad máxima del cabezal de impresión	500 mm/s
Aceleración máxima del cabezal de la herramienta	20 m/s²
Dimensiones físicas	389 × 389 × 457 mm³, Tamaño del paquete 480 × 480 × 590 mm³, Peso neto 14.13 kg, Peso bruto (AMS incluido) 22.3 kg
Requisitos eléctricos	100-240 VCA, 50/60 horas, 1000 W a 220 V, 350 W a 110 V

Tabla 2 Características Bambu Lab X1-Carbon

Software (impresión)

El Software utilizado es el propio de la marca Bambu Studio. Existen varios tipos de softwares disponibles y compatibles con esta impresora, pero para este estudio se ha optado por el propio de la marca el cual tiene mayor fluidez a la hora de trabajar con esta impresora. Dicho programa permite ajustar medidas, escalar, posicionar la pieza de forma óptima e introducir distintos parámetros para su posterior impresión. Por tanto, este software permitirá cambiar los distintos parámetros de impresión en función de nuestros requisitos, asimismo, el software es capaz de seleccionar los parámetros de forma ajustada dependiendo de la pieza a imprimir.

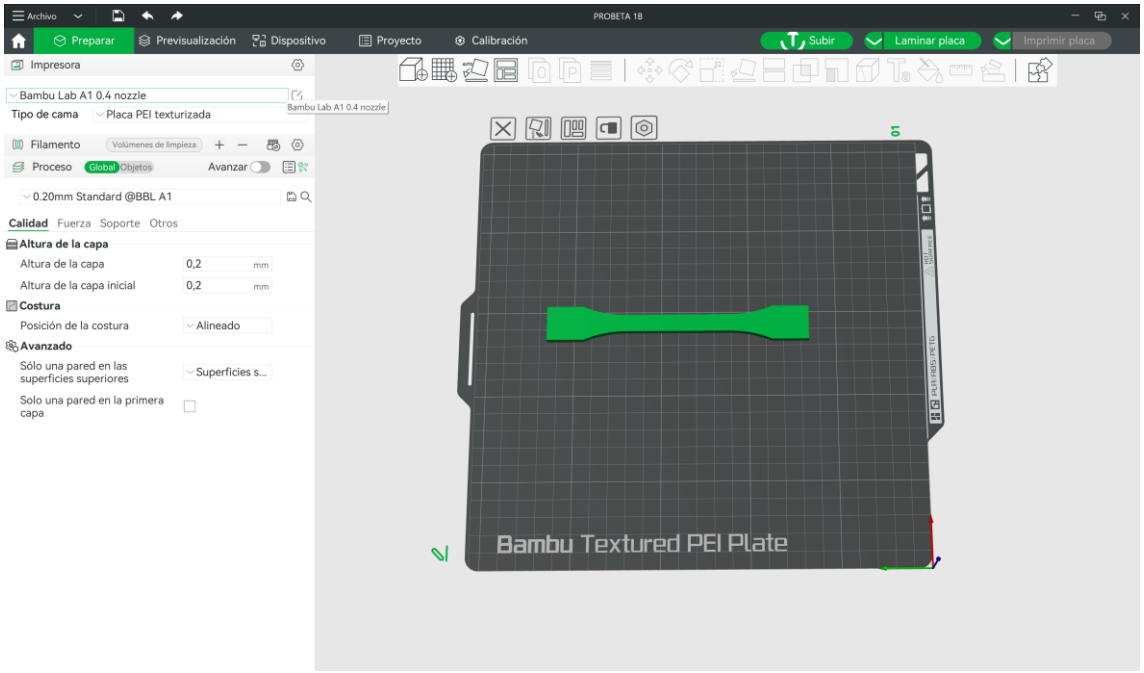


Ilustración 23 Entorno gráfico del Software: Bambu Studio

Esta figura muestra el entorno de trabajo del software utilizado en donde se puede ver el área de parametrización a la derecha y el entorno de trabajo tridimensional donde se muestra la pieza que se va a proceder a imprimir.

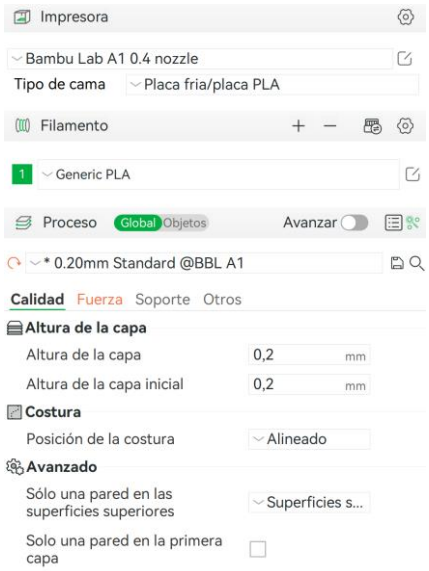


Ilustración 24 Zona de parametrización

En la zona de parametrización como ya hemos mencionado anteriormente se puede ajustar la calidad de la pieza, en donde se selecciona la altura de capa, la densidad de relleno, distintas velocidades de impresión (dependiendo de la zona de la pieza), el número de paredes internas y externas, el patrón de relleno, los soportes de la pieza (en caso de que sean necesarios) y otra serie de parámetros de impresión con valores recomendados por el software dependiendo del material y de la pieza a imprimir.

Materiales

Como ya se ha mencionado, los materiales seleccionados para este estudio son el ABS, PLA y PA6, a continuación se enumeran una serie de propiedades de los materiales obtenidas de las fichas técnicas correspondientes a cada material según la norma ISO 527, las cuales podremos comparar con los resultados obtenidos.

- ABS:
  - Densidad: 1.04 g/cm^3
  - Resistencia a tracción: 32.9 MPa
  - Alargamiento al esfuerzo máximo: 1.4%

- PLA
  - Densidad: 1.24 g/cm^3
  - Resistencia a tracción: 42.4 MPa
  - Alargamiento al esfuerzo máximo: 2.4%

- PA6
  - Densidad: 1.58 g/cm^3
  - Resistencia a tracción: 50.7 MPa
  - Alargamiento al esfuerzo máximo: 4.5%

3.4.2 Para Ensayo tracción

Para realizar el ensayo de tracción se ha hecho uso del equipo del laboratorio C004 de la universidad. Para realizar este tipo de ensayos debemos contar con el siguiente equipo necesario:

- Probetas
- Máquina de ensayos de tracción-compresión MUE 404 (SERVOSIS S.A)
- Software PCD2K (SERVOSIS S.A)

Máquina de ensayos ME 405

La máquina de ensayos de tracción, es un dispositivo productor de cargas servohidráulico que permite hacer ensayos estáticos de tracción, compresión, flexión y ensayos cíclicos, gracias a un cilindro de doble efecto controlado con servoválvula.

- Capacidad de carga entre 1-500 KN.
- Velocidad de los ensayos hasta 1000 mm/min.
- Ensayos para todo tipo de materiales.
- Medida de fuerza mediante una célula de carga.
- Medida de desplazamiento mediante captador lineal SSI
- Posibilidad de incorporar cualquier accesorio.

Ilustración 25 Maquina de ensayos SERVOSIS ME405

Ilustración 26 Placa Modelo

Ilustración 27 Equipo ensayo de Tracción

Software PCD2K

La máquina es controlada a través del software PCD2K el cual regula la aplicación de la carga y genera los diagramas que provoca el comportamiento de la probeta. Es un software de control mediante diagramas de bloques que nos permite configurar distintos parámetros de ensayo como velocidad, precarga o posición.

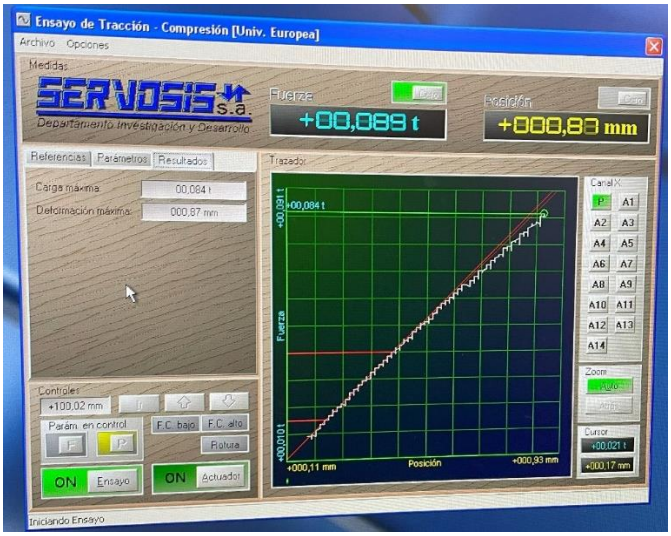


Ilustración 28 Software PDC2K

3.5 Parte experimental

3.5.1 Introducción

En este apartado se procede a aplicar lo expuesto en el apartado anterior de metodología para obtener las propiedades mecánicas de los materiales a evaluar.

Primero se presentara un diseño de la probeta seleccionada para este trabajo y los pasos a realizar para llevar a cabo su obtención mediante impresión 3D, así como su posterior ensayo de tracción. A continuación, se lleva a cabo cada una de las fases, describiendo con detalle el diseño experimental utilizado en cada una de ellas.

3.5.2 Probeta de ensayo

Para la elaboración de las probetas se ha realizado un diseño con el software SolidWorks. La normativa que especifica los métodos de preparación de probetas y los métodos de ensayo a utilizar en la determinación de las propiedades de los materiales en la fabricación por adición de capas, es la UNE 116005:2012, sin embargo, hemos optado por diseñar las probetas según la normativa ISO 294-1:2017 ISO 10724-1:2022, las cuales especifican los principios generales que deben seguirse al moldear por inyección probetas de materiales termoplástico Las dimensiones de la probeta de ensayo deben ser las mostradas en la siguiente ilustración y tabla.

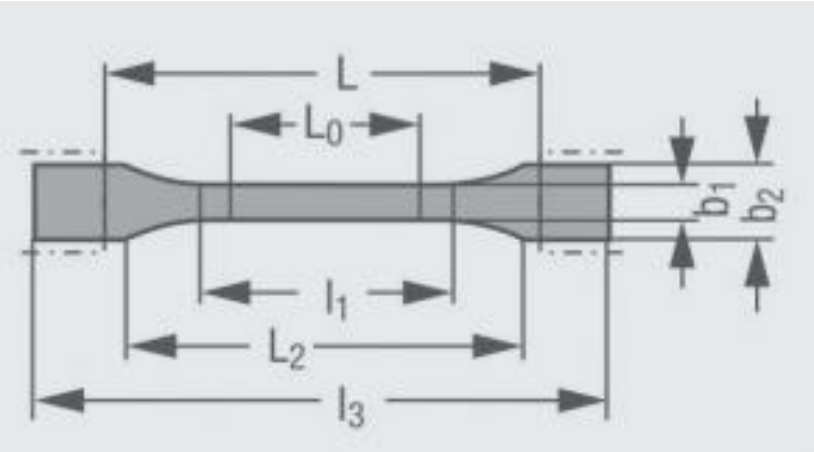


Ilustración 29 Plano de ayuda Probeta

		Medidas en milímetros	
Tipo probeta		1A	1B
L1	Longitud de la zona paralela estrecha	80 ± 2	60.0 ± 0.5
L2	Distancia entre zonas paralelas anchas	109.3 ± 3.2	108 ± 1.6
L3	Longitud total	170	≥150
r	Radio	20 a 25	
b	Anchura en la zona estrecha	10 ± 0.2	
b	Anchura en los extremos	20 ± 0.2	
h	Espesor recomendado	4.0 ± 0.2	
L0	Distancia entre marcas	50 ± 0.5	20 ± 0.5
L	Distancia inicial entre mordazas	150 ± 1	85 ± 1

Tabla 3 Medidas Probeta 1B

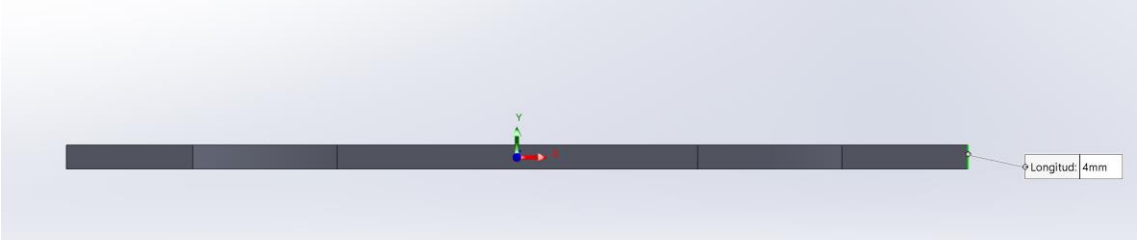


Tabla 4 Medidas probeta 1B 2

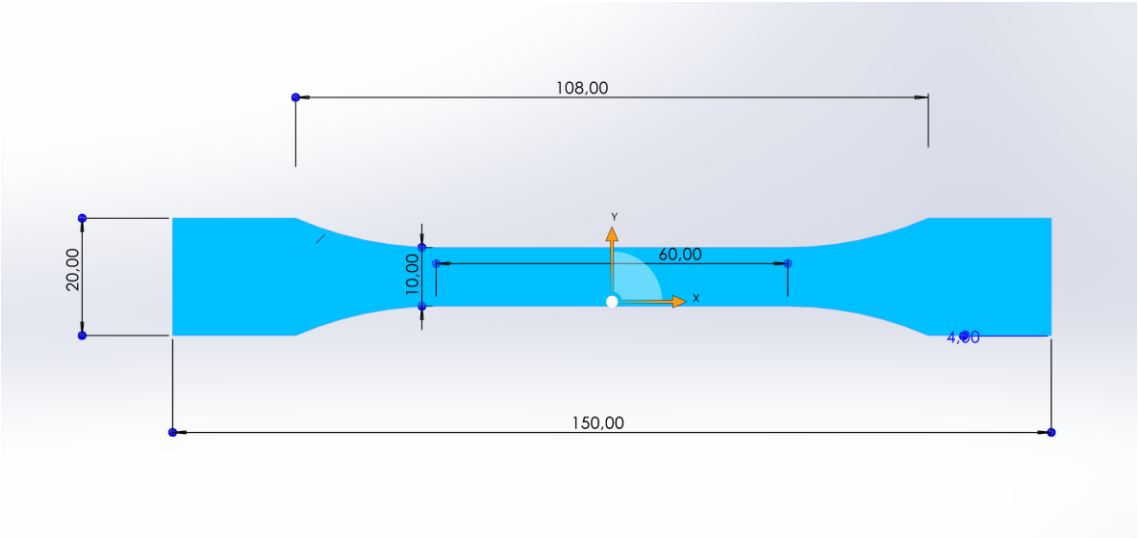


Ilustración 30 Medidas Probeta 1B 3

3.5.3 Actividades previas

Antes de comenzar con la impresión 3D y los ensayos, debemos realizar una serie de actividades previas para el correcto funcionamiento de los equipos, así como para una correcta realización de los mismos.

3.5.3.1 Impresión 3D

Antes de imprimir las probetas como hemos dicho anteriormente, se necesita un modelo CAD de la probeta, el cual se ha diseñado con el software SolidWorks. Este modelo Cad se debe convertir a formato STL en la mayoría de softwares de impresión, sin embargo con Bambu Studio, no es necesario. Para evitar errores, coste de material y tiempo, es necesario comprobar que los parámetros escogidos no excedan los rangos del programa.

3.5.3.2 Ensayo de tracción

Para realizar el ensayo de tracción, previamente hay que comprobar el correcto funcionamiento de las mordazas y de la máquina. Se deberá comprobar que no hay ningún objeto extraño que impida su correcto funcionamiento, choque o cause fallo. Para comprobar el correcto funcionamiento se arranca un ensayo sin probeta, se realiza una parada de emergencia, y asegura de que el software recoge datos.

3.5.4 Realización de ensayos

Una vez realizados las actividades descritas en los apartados previos, se puede comenzar con la impresión de las probetas para su posterior ensayo de tracción.

3.5.4.1 Impresión 3D

El procedimiento a seguir para la impresión de las probetas es el siguiente:

1. **Exportación del archivo:** El modelo CAD se exporta en formato STL al software de Bambu Studio.

2. **Configuración de la impresora:** Se configuran los parámetros de impresión óptimos para cada material.

Temperatura de extrusión (ºC)	ABS	240
	PLA	220
	PA6	250
Temperatura cama caliente (ºC)	ABS	100
	PLA	50
	PA6	80
Velocidad de impresión (mm/s)	ABS	50
	PLA	50
	PA6	50
Densidad de relleno (%)	ABS,PLA,PA6	100

Tabla 5 Parámetros de impresión

3. **Proceso de impresión:**
   - Primero se prepara la cama de impresión, limpiándola y aplicando adhesivo en caso de ser necesario.
   - Se carga el filamento correspondiente en la impresora.
   - Se guarda el archivo en una tarjeta con formato .gcode y se inserta en la impresora.
   - Se selecciona el archivo a imprimir, comenzando el proceso de impresión.

4. **Enfriamiento y retiro:** Una vez terminado el proceso, se dejan enfriar las probetas antes de retirar la cama de impresión.

3.5.4.2 Ensayo de tracción

El procedimiento a seguir para el ensayo de tracción es el siguiente:

1. **Encendido y preparación:** Se enciende la máquina y se arranca el software en el ordenador. Se nivelan las mordazas a la altura necesaria y se selecciona la velocidad de avance.

2. **Montaje de la probeta:** La pieza se coloca en posición vertical, colocando los extremos de las probetas en las mordazas, como se muestra en la figura 23, y se aprietan las mordazas desde el ordenador hasta que queden fijas.

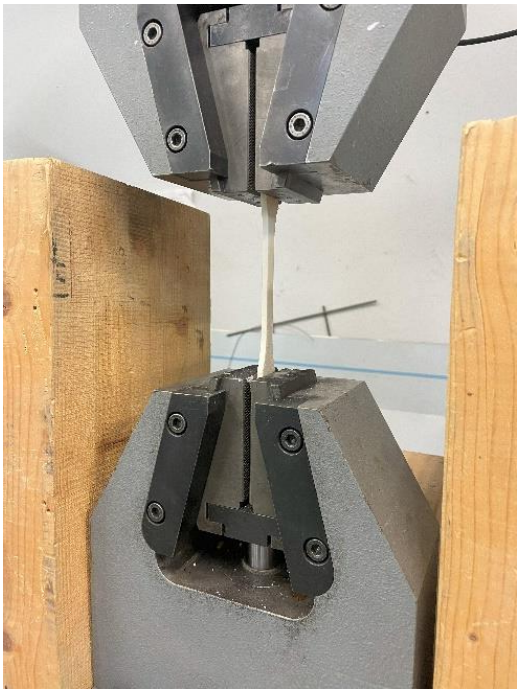


Ilustración 31 Probeta sujeta por mordazas

3. **Aplicación de la fuerza a tracción:** La máquina de ensayo aplica una fuerza a tracción controlada a la velocidad constante seleccionada.

4. **Fractura de la probeta:** El ensayo continúa hasta la fractura de la probeta quedando registradas la fuerza máxima aplicada y la elongación en el momento de fractura.

Ilustración 32 Fractura de la probeta (1PLA)

5. **Finalización del ensayo:** Tras acabar el ensayo, obtenemos la curva de tensión-deformación, se guardan los resultados obtenidos y se realizan los cálculos necesarios para determinar las propiedades de dicho material.

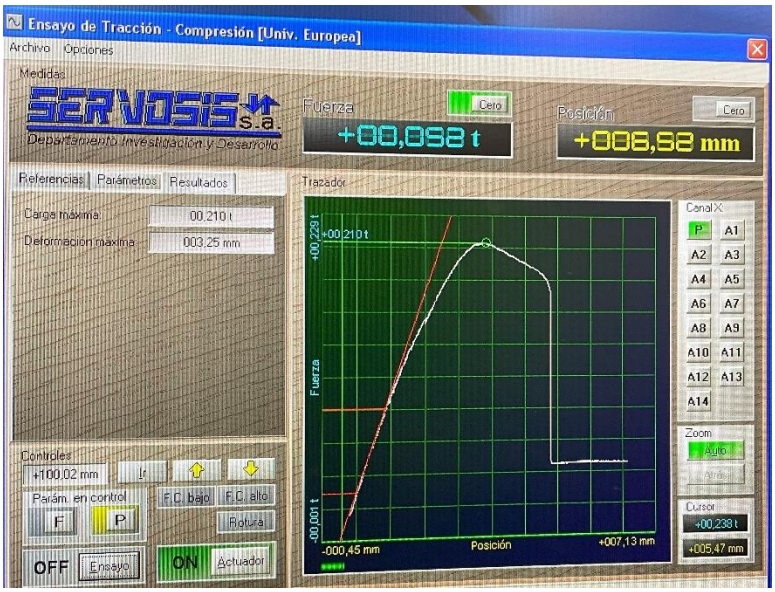


Ilustración 33 Grafica generada por el Software PCD2K (PLA)

3.6 Análisis

Una vez realizados los ensayos de tracción a cada una de las probetas, se exportan los datos generados por el software PCD2K a Excel y se generan las curvas de tensión-deformación. Estas curvas son una representación gráfica del comportamiento de un material cuando se somete a una carga.

- **Curva Tensión-Deformación**

  En la siguiente figura se muestra un ejemplo de curva tensión-deformación en la que se puede diferenciar en cada zona marcada, el comportamiento del material a medida que la carga aplicada aumenta a velocidad constante.

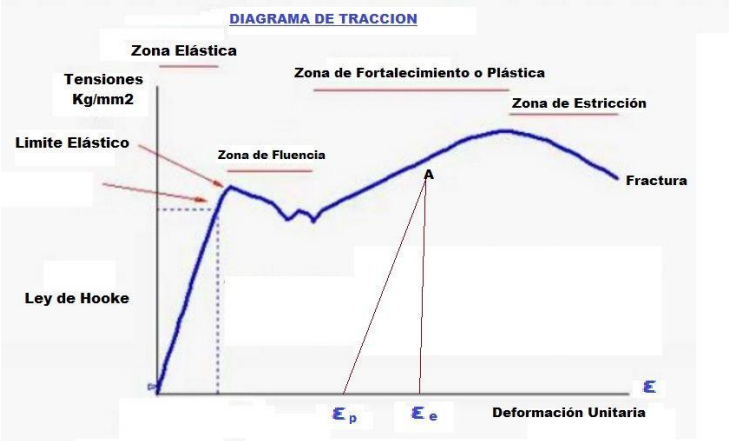


Ilustración 34 Curva tensión-deformación

- **Eje X (Deformación, ε):** Deformación unitaria
- **Eje Y (Tensión, σ):** Fuerza aplicada por unidad de área.
- **Zona Elástica:** En esta región, la relación entre la tensión y la deformación es lineal y sigue la Ley de Hooke ($\sigma = E \times \varepsilon$). El material es capaz de recuperar su forma original.
- **Límite Elástico:** Punto en el que el material deja de comportarse elásticamente y comienza a deformarse plásticamente, es decir, donde es el punto en el que la probeta ya no recupera su forma original.
- **Zona Plástica:** En esta región, material se deforma permanentemente.
- **Punto de Fractura:** El punto en el que el material se rompe.

3.6.1 Resultados ensayo Tracción

Para el ensayo de tracción realizado, se han establecido los siguientes parámetros comunes para los tres materiales a ensayar.

Parámetros

Sentido	Tracción
Límite superior (%)	38.41
Límite inferior (%)	8.02
Velocidad (mm/s)	0.05
Destino relativo (mm)	360
Muestras	1024

Tabla 6 Parámetros de ensayo tracción

A continuación, se muestra en cada tabla la carga máxima a la que ha sido sometida la probeta, la deformación máxima que ha sufrido antes de la rotura y el tiempo transcurrido hasta la rotura.

PLA

Resultados 1º Ensayo

Carga máxima (t)	0.197
Deformación máxima (mm)	3.04
Tiempo (s)	89.94

Tabla 7 Resultados 1º ensayo PLA

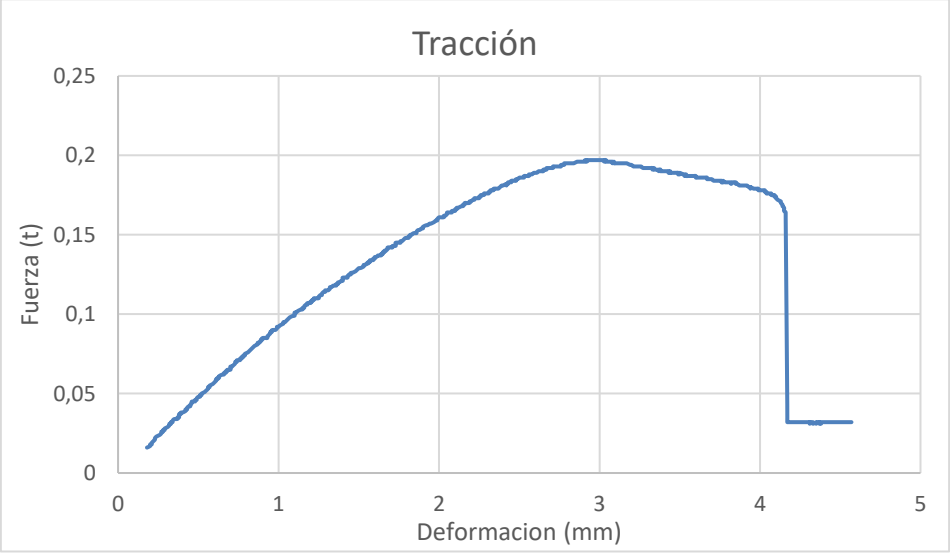


Ilustración 35 Curva Fuerza-Deformación PLA

En este ensayo la probeta de PLA tiene un punto de rotura de 197 Kg y una deformación de 3.04 mm.

Resultados 2º Ensayo

Carga máxima (t)	0.21
Deformación máxima (mm)	3.25
Tiempo (s)	129.98

Tabla 8 Resultados 2º ensayo PLA

En el segundo ensayo realizado al PLA, se produjo un fallo en el software de modo que no se recogieron ni los datos de carga aplicada ni los de deformación del material. A pesar de este error del programa, el ensayo se realizó experimentalmente con éxito quedando registradas una carga máxima de 210 Kg y una deformación de 3.25 mm, valores muy similares a los de la primera probeta ensayada.

ABS

Resultados 1º Ensayo

Carga máxima (t)	0.181
Deformación máxima (mm)	3.58
Tiempo (s)	86.04

Tabla 9 Resultados 1º ensayo ABS

Ilustración 36 Curva Fuerza-Deformación ABS 1

La probeta de ABS tiene el punto de rotura menor al PLA, 181 Kg pero una deformación mayor, 3.58 mm.

Resultados 2º Ensayo

Carga máxima (t)	0.186
Deformación máxima (mm)	3.38
Tiempo (s)	98.9

Tabla 10Resultados 2º ensayo ABS

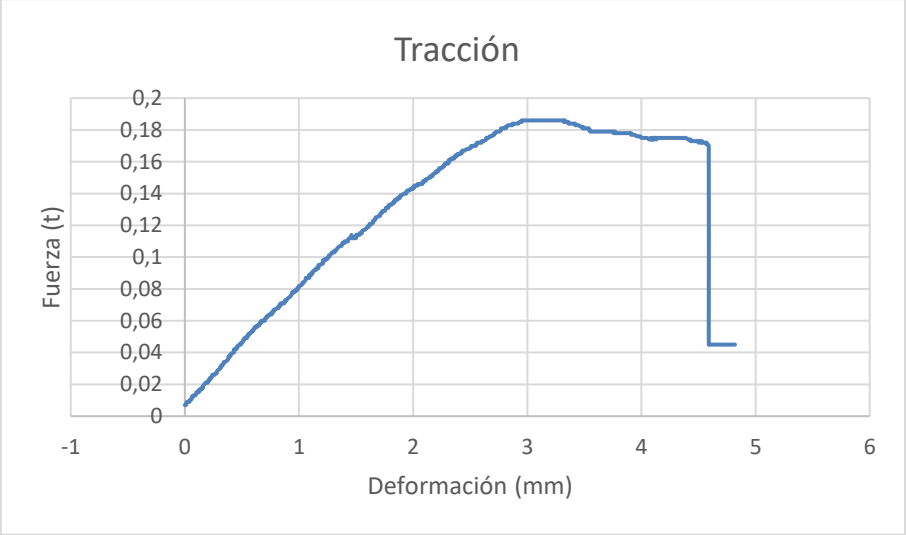


Ilustración 37 Curva Fuerza-Deformación ABS 2

En este segundo ensayo se muestra un punto de rotura en 186 Kg y una deformación de 3.38 mm, datos muy similares al primer ensayo.

PA6

Resultados 1º Ensayo

Carga máxima (t)	0.256
Deformación máxima (mm)	7.70
Tiempo (s)	164.78

Tabla 11 Resultados 1º ensayo PA6

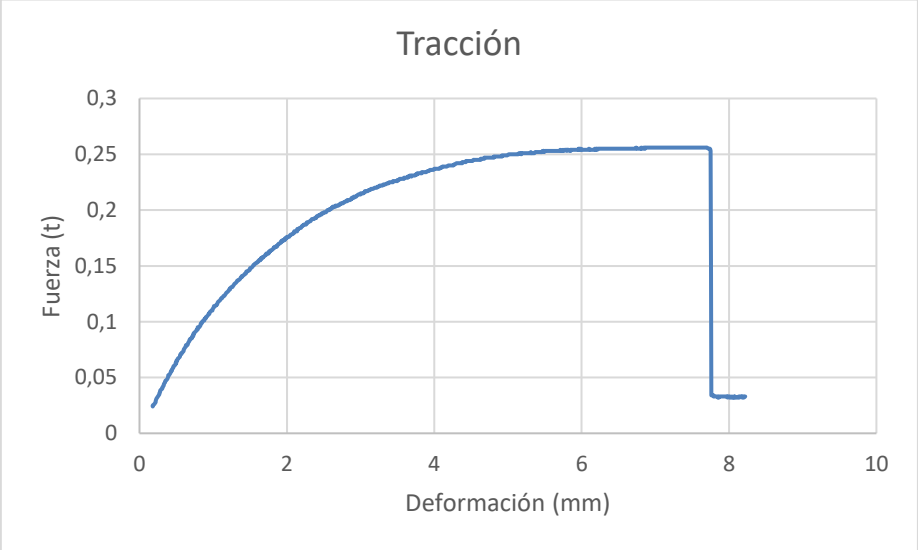


Ilustración 38 Curva Fuerza-Deformación PA6 2

El PA6 muestra el punto de rotura en 256 Kg y una deformación de 7.7 mm

Resultados 2º Ensayo

Carga máxima (t)	0.27
Deformación máxima (mm)	8.14
Tiempo (s)	167

Tabla 12 Resultados 2º ensayo PA6

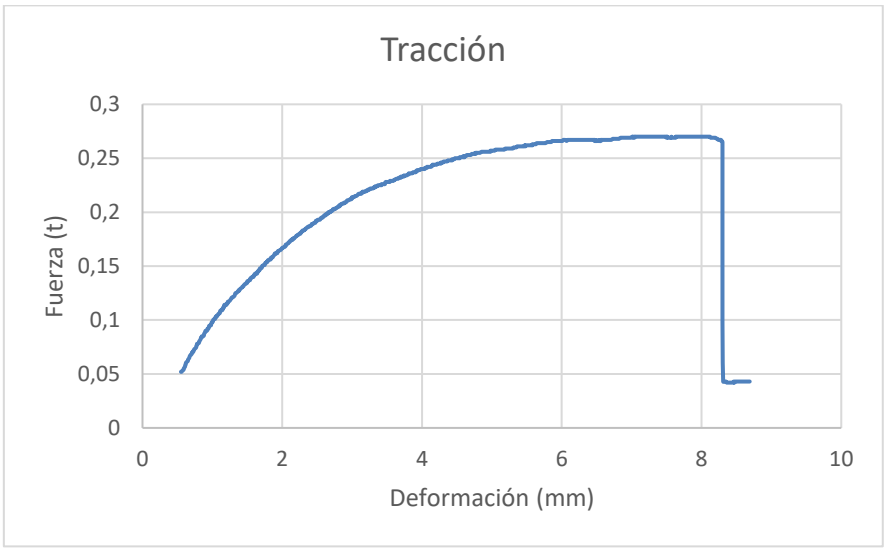


Ilustración 39 Curva Fuerza-Deformación PA6 2

El segundo ensayo del PA6 muestra valores de punto de rotura y deformación mayores al primer ensayo 270 Kg y 8,14 mm.

3.6.2 Cálculo propiedades mecánicas

Para completar el estudio de los materiales, se calculan las propiedades mecánicas de cada uno ellos para más adelante introducir los valores en la simulación del sistema de engranajes diseñado.

- **Cálculo resistencia a tracción (σ_t)**

$$\sigma_t = \frac{F_{máx}}{A_0}$$

Donde $F_{máx}$ es la carga máxima antes de la ruptura y A_0 es el área inicial de la sección de la probeta.

- **Módulo de elasticidad (Modulo de Young)**

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde σ es la la tensión (carga/unidad de área) y ϵ es la deformación unitaria (alargamiento/ longitud inicial).

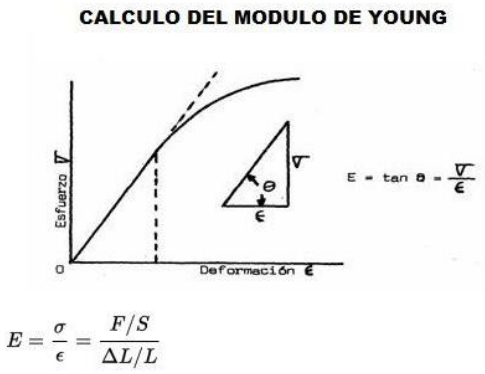


Ilustración 40 Representación gráfica Modulo de Young

- **Elongación a la Fractura**

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

Donde $L_f$es la longitud final de la probeta después de la fractura y L_o es la longitud original de la probeta.

PLA

Ensayo	**1º**	**2º**
Fuerza (N)	1930.6	2058
Área transversal (mm^2)	40	
L(mm)	150	
ΔL (mm)	3.04	3.25
Elongación (%)	2.02	2.17
Módulo de Young (MPa)	2901.32	-
Tensión de rotura (MPa)	48.26	51.45
Limite elástico (MPa)	40.425	-

Tabla 13 Propiedades PLA

Ilustración 41 Probetas PLA

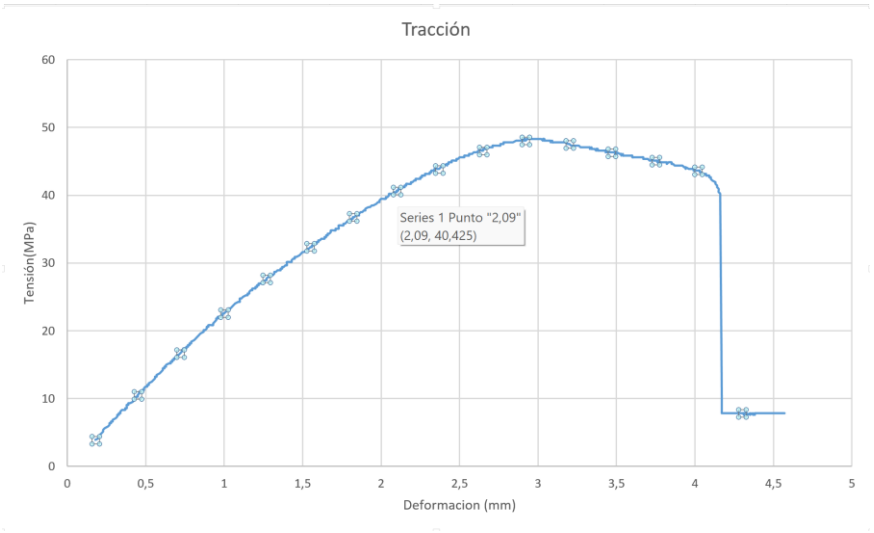


Ilustración 42 Límite elástico PLA

En los ensayos hechos a las probetas de PLA, el material muestra comportamiento elástico alcanzando una tensión de 40.425 MPa y una deformación de 2.09 mm, obteniendo un Módulo de Young de 2901.32 MPa lo que sugiere buena rigidez. Tras pasar el límite elástico, el material entra en la región de deformación irreversible alcanzando una tensión de rotura de 48.26 MPa y llegándose a deformar 3.04 mm lo que nos indica que no es un material dúctil.

ABS

Ensayo	1º	2º
Fuerza (N)	1773.8	1822.8
Área transversal (mm^2)	40	
L(mm)	150	
ΔL (mm)	3.58	3.38
Elongación (%)	2.39	2.25
Módulo de Young (MPa)	2478.18	2507.85
Tensión de rotura (MPa)	44.34	45.57
Limite elástico (MPa)	38.99	40.46

Tabla 14 Propiedades ABS

Ilustración 43 Probetas ABS

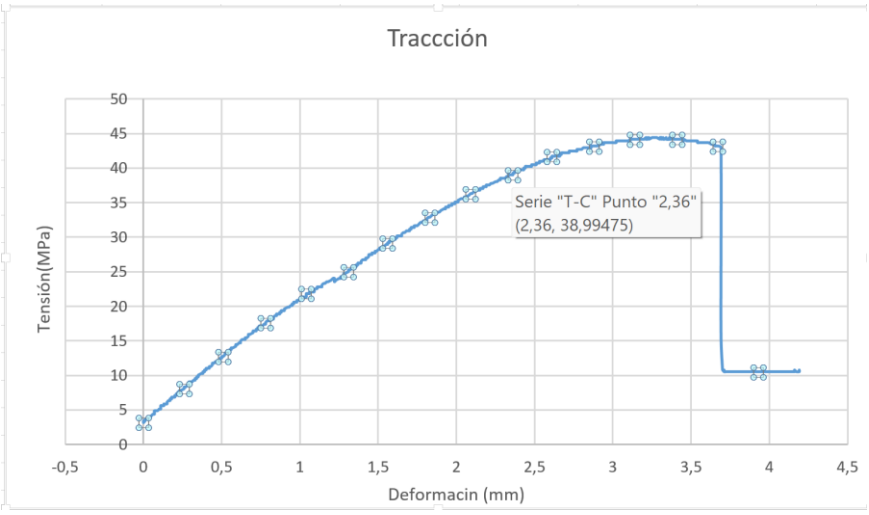


Ilustración 44 Límite elástico ABS 1

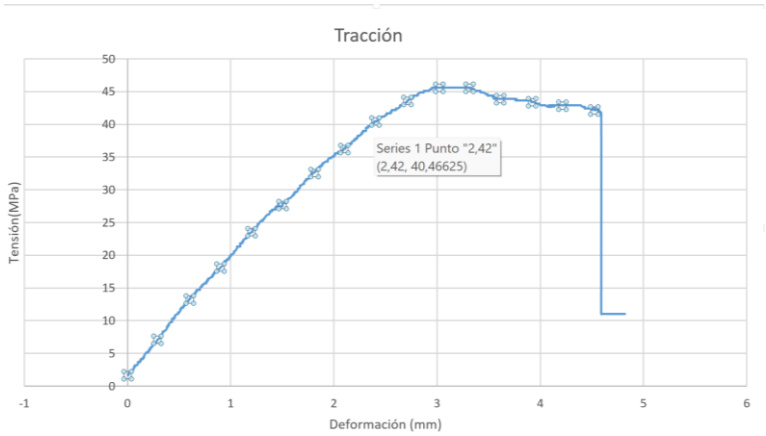


Ilustración 45 Límite elástico ABS2

En el caso del ABS, ambos ensayos muestran un límite elástico cercano a los 40 MPa y a los 2.5 mm obteniendo un Módulo de Young de 2500 MPa. El ABS muestra menor rigidez que el PLA, pero mayor plasticidad. Por otro lado la tensión de rotura también es menor que la del PLA, alcanzando los 45 MPa de modo que presenta una menor resistencia mecánica.

	PA6	
Ensayo	**1º**	**2º**
Fuerza (N)	2508.8	2646
Área transversal (mm^2)	40	
L(mm)	150	
ΔL (mm)	7.7	8.14
Elongación (%)	5.13	5.42
Módulo de Young (MPa)	3579.55	3199.41
Tensión de rotura (MPa)	62.72	66.15
Limite elástico (MPa)	36.75	36.26

Tabla 15 Propiedades PA6

Ilustración 46 Probetas PA6

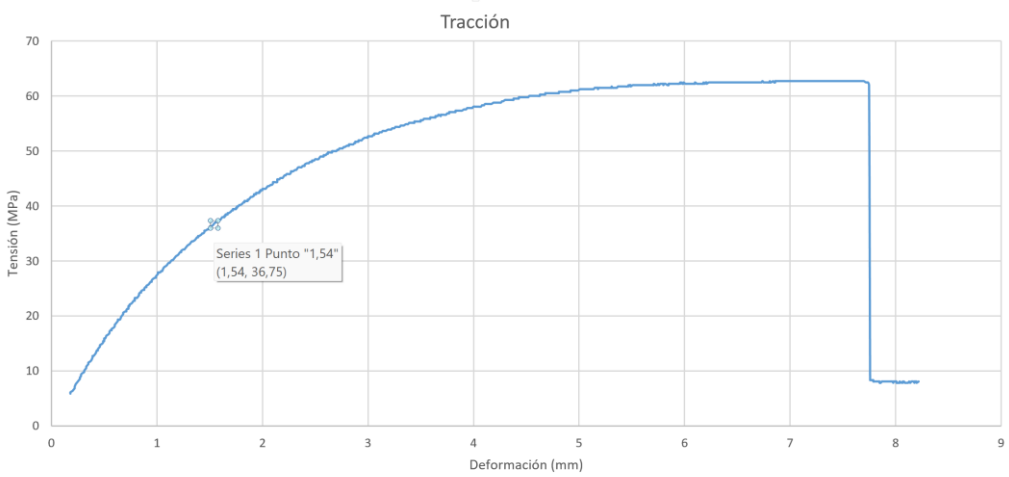


Ilustración 47 Límite elástico PA6 1

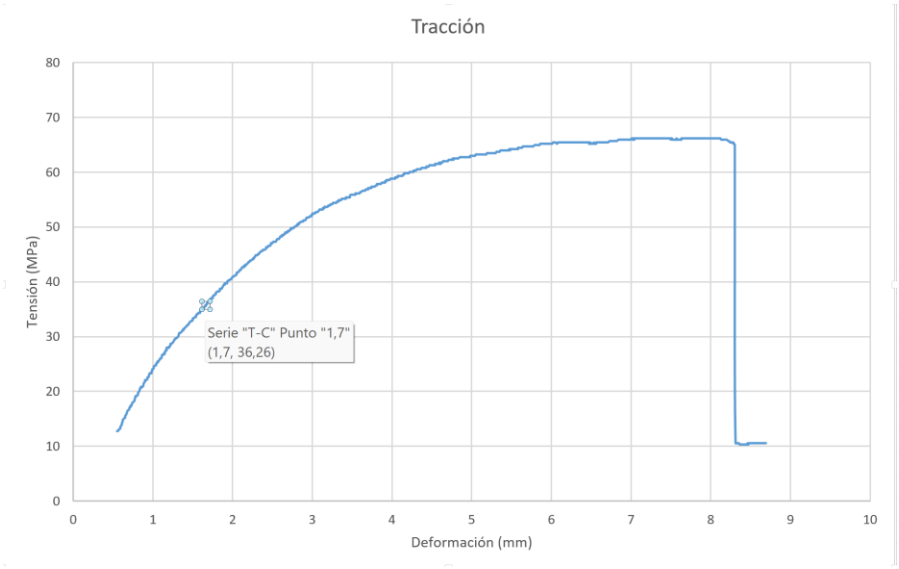


Ilustración 48 Límite elástico PA6 2

El Nylsrtrong o PA6, es el material que muestra la mayor rigidez y resistencia mecánica, alcanza su límite elástico en los 36 MPa con una deformación de 1.54 mm obteniendo un Módulo de Young de 3579.55 MPa. A partir de ese punto el material comienza a deformarse plásticamente hasta los 7.7 mm hasta que parte, alcanzando un tensión de rotura de 62.7 MPa.

3.7 Conclusiones

Análisis comparativo entre resultados obtenidos (E) y valores de la ficha técnica (F):

Material	ABS (E)	ABS (F)	PLA (E)	PLA (F)	PA6 (E)	PA6 (F)
Resistencia a tracción max (MPa)	45.57	32.9	51.45	55.5	66.15	50.7
Elongación máxima (%)	2.39	1.4	2.17	1	5.42	4.5

Tabla 16 Comparación de propiedades entre ensayos y ficha técnica de los materiales

Puesto que los resultados de los ensayos son muy similares a los de la ficha técnica de cada material, se puede interpretar que los ensayos se han realizado correctamente y se han verificado las propiedades a tracción de cada uno de ellos.

Curvas Tensión-Deformación

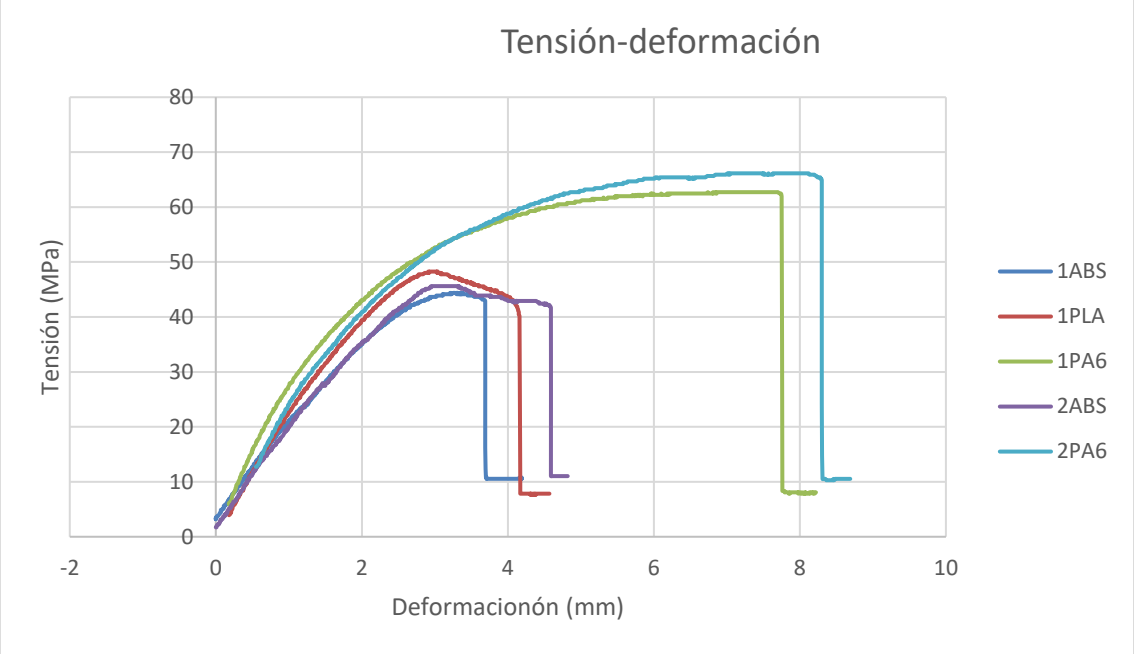


Ilustración 49 Curvas Tensión-Deformación

El material con las mejores propiedades es el PA6, ya que presenta mayor rigidez y resistencia mecánica en comparación con el PLA y el ABS, lo que lo hace el material más adecuado para aplicaciones que requieren estas propiedades. En segundo lugar se encuentra el PLA, siendo una opción viable cuando se requiere rigidez. Finalmente el ABS muestra las peores propiedades, sin embargo a presar de tener una resistencia baja, es un material equilibrado.

Capítulo 4. Diseño de engranajes

4.1 Introducción

En esta sección del proyecto, se abordará el diseño detallado de engranajes de plástico utilizando la fabricación aditiva. Se hará una explicación de las referencias tomadas, los cálculos necesarios para su diseño, las medidas resultantes, el modelado e impresión 3D y las simulaciones correspondientes para validar su funcionamiento.

4.2 Referencias de diseño

Para el diseño del sistema de engranajes, se ha tomado de referencia los engranajes de una réplica de airsoft, conocida por su exigencia en términos de durabilidad debido a las fuerzas internas del mecanismo. Los engranajes de este tipo de mecanismo requieren una alta resistencia y fiabilidad por lo que es un ejemplo excelente para estudiar la resistencia de los materiales.

Una réplica de airsoft está compuesta por varias partes internas que trabajan juntas para disparar bolas de plástico. En este proyecto nos centraremos en la parte de la caja de engranajes (gearbox) compuesta por los siguientes componentes:

- **Carcasa de la caja de engranajes**: Contiene los componentes internos y los mantiene alineados y protegidos para su correcto funcionamiento.
- **Engranajes:** Contiene los engranajes que transmiten la energía del motor al pistón.
- **Rodamientos:** Permiten a los engranajes girar suavemente.

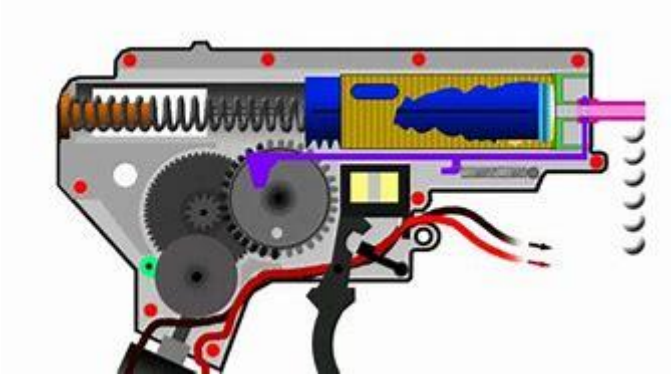


Ilustración 50 Gearbox replica

En el anterior capitulo se ha visto el comportamiento de los materiales a tracción y se han descrito cada una de sus propiedades. Para el diseño de este sistema de transmisión se deberían tener en cuenta las fuerzas ejercidas por el motor para la transmisión del movimiento, las fuerzas resultantes de la tensión del muelle y la temperatura de trabajo que pueden llegar a alcanzar los engranajes. Este trabajo se centra únicamente en el estudio de la resistencia mecánica de ciertos engranajes del sistema de transmisión. Se analizará la resistencia ejercida por los engranajes al aplicar la fuerza de movimiento ejercida por el motor eléctrico.

Ejemplo de motor de airsoft:

Ilustración 51 Motor eléctrico

Este tipo de motores tienen velocidades de entre 10000- 40000 rpm y torques que van desde los 50 a los 500 Nmm.

4.3 Descripción del sistema de engranajes

El sistema de engranajes mostrado en la figura anterior, es un conjunto de engranajes rectos y cónicos que trabajan en conjunto convirtiendo la energía eléctrica del motor en movimiento rotacional para transmitir movimiento y fuerza entre diferentes ejes. Esta configuración de engranajes es un mecanismo de reducción de velocidad y aumento de torque, esencial en diversas aplicaciones mecánicas.

En este proyecto, tomaremos de referencia los cuatro primeros conjuntos de engranajes que componen el sistema de transmisión de movimiento de una réplica de airsoft.

4.4 Medición de los engranajes de referencia

Con ayuda de un calibre (herramienta de medición) se toman las medidas de cada uno de los engranajes que se van a modelar. Puesto que no se pueden medir los engranajes con exactitud, se toman algunas medidas de referencia:

- Numero de dientes
- Diámetro exterior
- Diámetro interior
- Altura del diente
- Espesor del engranaje
- Distancia entre centros

Engranajes de referencia:

Ilustración 52 Sistema de engranajes

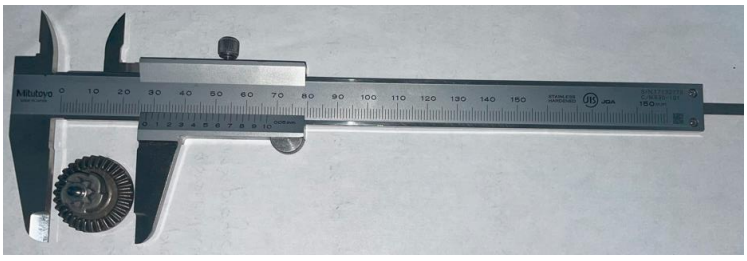


Ilustración 53 Medición del diámetro externo

4.5 Cálculo de engranajes:

Una vez tomadas las medidas de referencia y junto a la teoría de cálculo y diseño de engranajes que se ha explicado anteriormente, se calculan todos los parámetros necesarios para modelar la transmisión de este proyecto.

4.5.1 Cálculo de engranajes rectos

Para el cálculo de los engranajes rectos se han utilizados las siguientes ecuaciones:

- **Paso diametral (Dp):** $D_p = \frac{Z}{d}$

- **Diámetro Primitivo (d):** $d = Z \times m$
- **Paso circular (p):** $p = \pi \times m$

- **Módulo (m):** $m = \frac{d}{Z}$

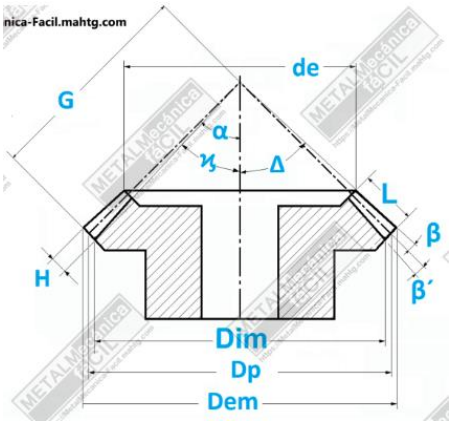
- **Altura de pie (hf):** $h_f = 1.25 \times m$
- **Diámetro exterior (De):** $D_e = d + (2m)$
- **Diámetro interior (Di):** $D_i = d - (2h_f)$

Medidas engranajes rectos

Nº Engrane	1	2	2,1	3
Nº dientes(Z)	8	39	20	32
Paso (Dp)	1,21	1,21	1,25	1,25
Diámetro primitivo (d)	6,61	32,23	16,00	25,60
Paso circular (p)	2,60	2,60	2,51	2,51
Modulo(m)	0,83	0,83	0,80	0,80
Altura de pie (hf)	1,03	1,03	1,00	1,00
Diámetro Exterior (De)	8,26	33,88	17,60	27,20
Diámetro Interior (Di)	4,96	30,58	14,40	24,00
Espesor del diente (S)	2,50	2,50	2,50	2,50

4.5.2 Cálculo de engranajes cónicos

Para el cálculo de los engranajes cónicos se han utilizados las siguientes ecuaciones:



- **Diámetro primitivo (Dp):** $D_p = m \times N$
- **Diámetro exterior mayor (Dem):** $Dem = D_p + (2m \times cos\alpha)$
- **Diámetro interior mayor (Dim):** $Dim = D_p - ((1.157) \times 2m \times cos\alpha))$
- **Longitud de la generatriz sobre el cono primitivo (G):** $G = \frac{D_p}{(2sen\alpha)}$
- **Ángulo correspondiente al módulo (β):** $tan\beta = \frac{m}{G}$
- **Altura del diente en el diámetro exterior (H):** $H = 2.167m$

Medidas engranajes cónicos

Nº Engrane	1	2
Modulo(m)	0,80	0,80
Nº dientes(Z)	10	30
Longitud del diente (L)	3,80	3,80
Ángulo al centro del engranaje (α)	18,40	71,60
Diámetro primitivo (Dp)	8,00	24,00
Diámetro Exterior (Dem)	9,52	24,52
Diámetro Interior (Dim)	6,25	23,39
Longitud generatriz (G)	12,68	12,68
Ángulo correspondiente al módulo (β)	3,61	3,61
Altura del diente en el diámetro exterior (H)	1,73	1,73

Relación de transmisión:

Para calcular la relación de transmisión (*i*) utilizaremos los números de dientes de cada engranaje:

$$i = \frac{Z(conductora)}{Z(conducida)}$$

- Engranes 1 y 2 (cónicos):

$$\boldsymbol{i_{1-2}} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{10}{30} = \mathbf{0.33}$$

- Engrane 1 y 2 (rectos):

$$\boldsymbol{i_{1-2}} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{8}{39} = \mathbf{0.20}$$

- Engrane 2.1 y 3 (rectos):

$$\boldsymbol{i_{2.1-3}} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{20}{32} = \mathbf{0.625}$$

- Relación de transmisión total:

$$\boldsymbol{i_t} = i_{1-2}(conicos) \times i_{1-2}(rectos) \times i_{2.1-3} = 0.33 * 0.20 * 0.625 = \mathbf{0.04}$$

La relación de transmisión final es de 25:1, es decir, por cada 25 veces que gira el motor, el engranaje final girará una vez.

4.6 Diseño CAD

Una vez definidas las medidas exactas de cada componente de los engranajes, se procede a la creación de los modelos 3D mediante diferentes softwares de diseño asistido por computadora (CAD). El modelado 3D permitirá visualizar el diseño y realizar ajustes antes de la fabricación física.

4.6.1 Software de diseño 3D

Para realizar los modelos 3D se emplearán dos herramientas principales: SolidWorks y Fusion 360. Para el diseño de los engranajes se ha utilizado el software Fusion 360 de autodesk, este programa es ideal para el diseño de engranajes debido a sus potentes herramientas de modelado. Por otro lado para el ensamblaje de los engranajes y para la carcasa se ha utilizado el programa SolidWorks por su capacidad para manejar ensamblajes de manera eficiente y precisa.

4.6.2 Modelado de los engranajes

A continuación se presenta el procedimiento detallado para modelar engranajes utilizando Fusion 360.

4.6.2.1 Engranajes cónicos

El primer engrane del sistema, está formado por dos engranajes cónicos de dientes rectos y ejes no paralelos, un engranaje de 10 dientes y otro de 30. EL primer engranaje es el piñón del motor, este es el encargado de transmitir la energía desde el motor eléctrico al resto de los engranajes del sistema cambiando la dirección del movimiento rotacional 90 grados.

A continuación se hace una descripción paso a paso del modelado del piñón y de la corona utilizando el software Fusion 360.

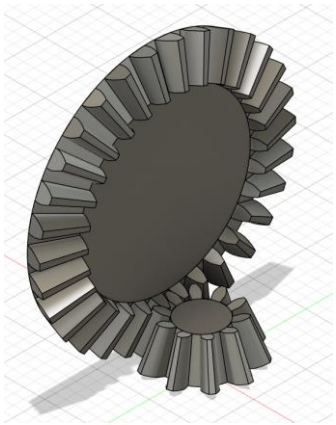


Ilustración 54 Engranajes cónicos de dientes rectos

1. **Abrir Fusion 360**

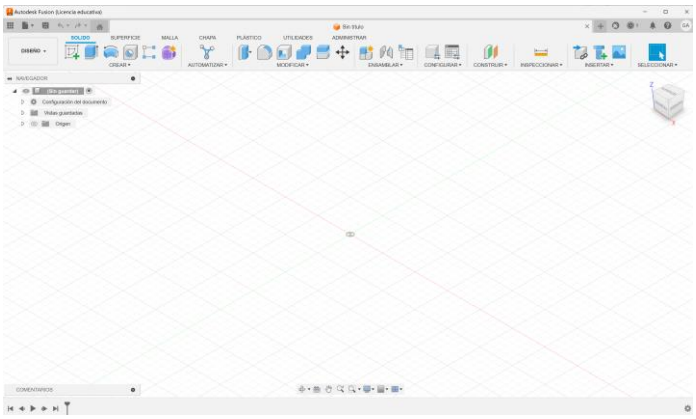
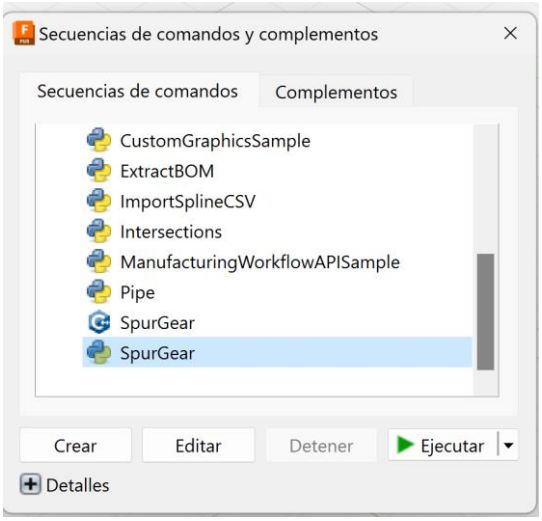


Ilustración 55 Espacio de trabajo de Fusion 360

2. **Acceder a la función de Spurgear**
   Este comando es una herramienta de generación de engranajes rectos.



3. **Configurar los parámetros del engranaje**

   Se introducen los parámetros necesarios como el número de dientes, el módulo, ángulo de presión, y otros detalles específicos.

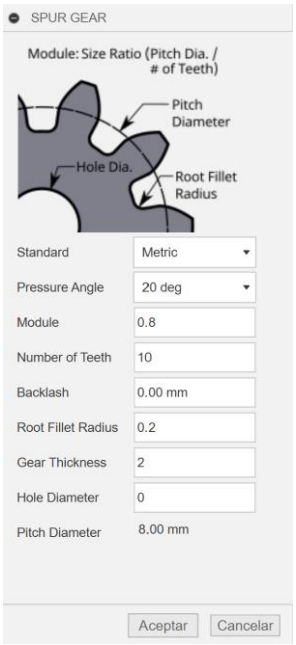


Ilustración 56 Ventana de Configuración de engranajes rectos

4. **Generación del engranaje**
   Tras haber configurado los parámetros del engranaje, se genera el modelo 3D.

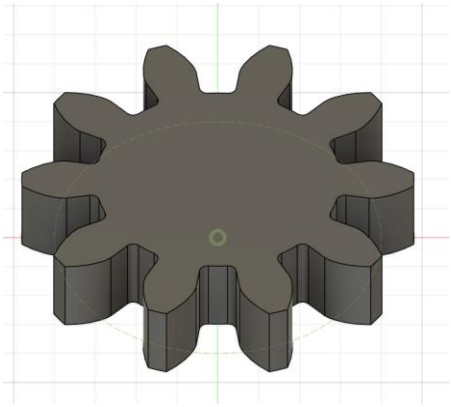


Ilustración 57 Engranaje recto generado

5. **Modificación del engranaje original**
   El Programa Fusion 360 carece de herramientas específicas para generar engranajes cónicos, por lo que se utiliza el engranaje recto generado como base para modelar el engranaje cónico.

   - Una vez se ha generado el engranaje recto, se eliminan componentes innecesarios como el boceto de la rueda y del resto de dientes dejando solo uno.

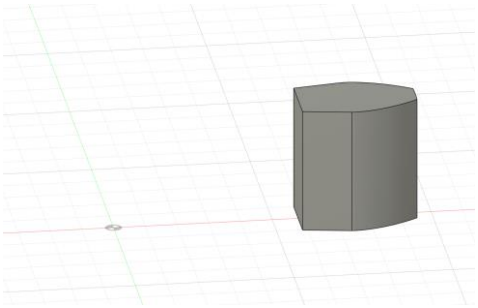


Ilustración 58 Diente engranaje recto

   - Con el diente aislado, se crean bocetos de referencia para definir la geometría cónica del diente como ángulos y dimensiones.

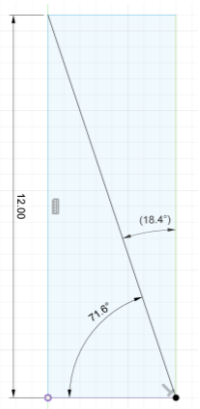


Ilustración 59 Ángulo al centro del engranaje (α)

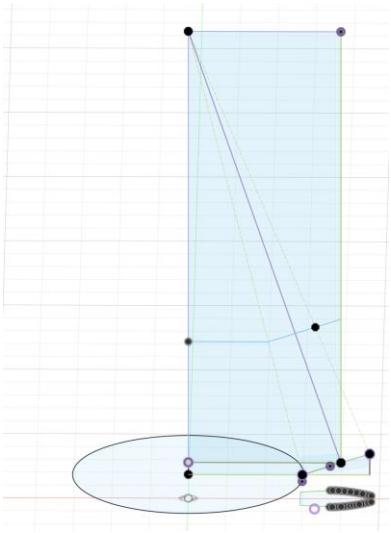
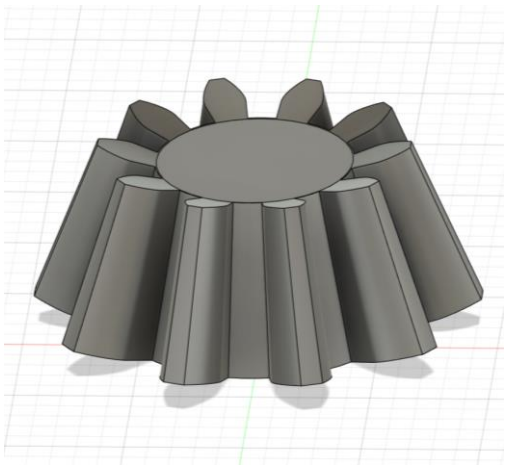


Ilustración 60 Bocetos geometría

- Haciendo uso de las herramientas de extrusión, revolución, recorte y patrón circular, finalmente podemos generar el engranaje cónico final.



6. **Generar el engranaje final**
   Finalmente se ajusta la geometría del engranaje para su posterior ensamble.

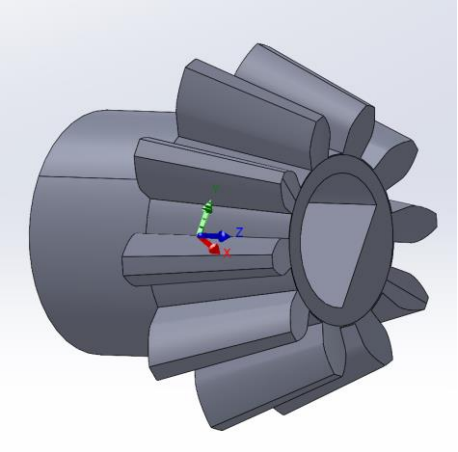


Ilustración 61 Engranaje cónico final

4.6.2.2 Engranaje doble conico-recto

Para el modelado de este engranaje se sigue el mismo procedimiento explicado anteriormente con la diferencia de que es un engranaje doble formado por un engranaje cónico (el cual engrana con el piñon conico anterior) y un engranaje recto montado sobre un eje central que transmite el movimiento al engranaje menor del sistema.

1. **Configuración de parametros del engranaje**

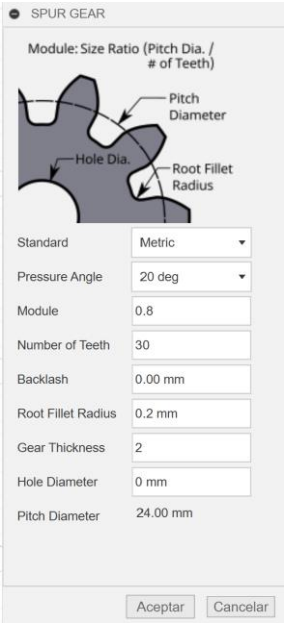


Ilustración 62 Ventana de configuración 2

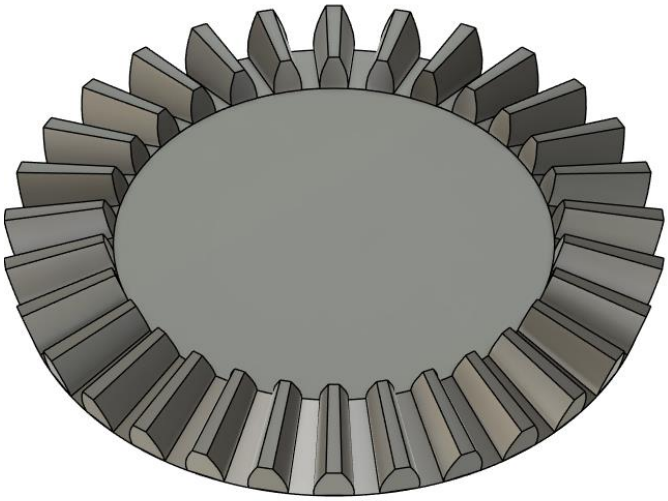


Ilustración 63 Engranaje cónico

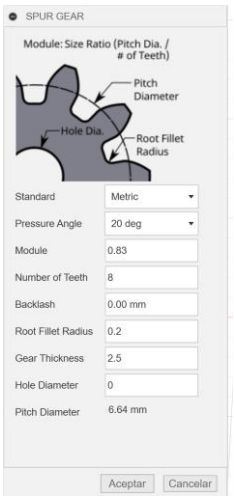


Ilustración 64 Ventana de configuración 3

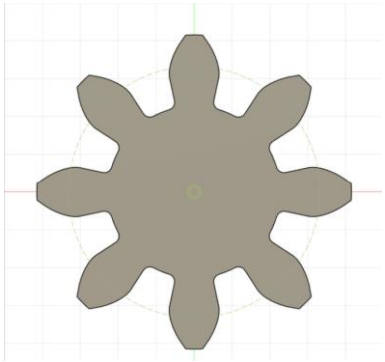


Ilustración 65 Engranaje recto superior

2. **Generar el engranaje final**

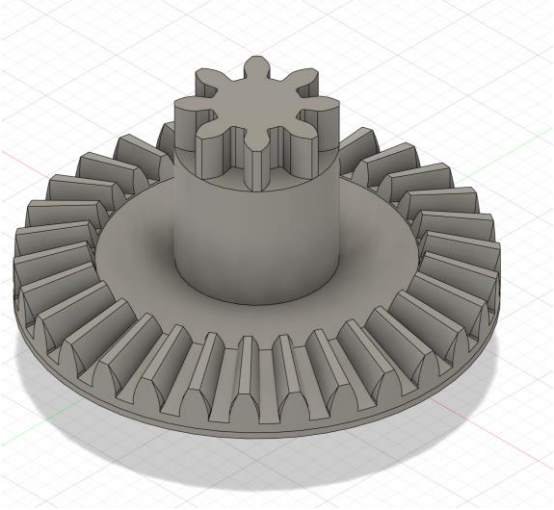


Ilustración 66 Engranaje doble cónico-recto

4.6.2.3 Engranaje doble 1-2

El siguiente engranaje del sistema es un engranaje doble formado por dos engranajes de 39 y 20 dientes rectos acoplados de manera coaxial. El movimiento entre ambos engranajes se transmite mediante el eje aumentando la velocidad del sistema ya que el engranaje conductor en mayor que el conducido.

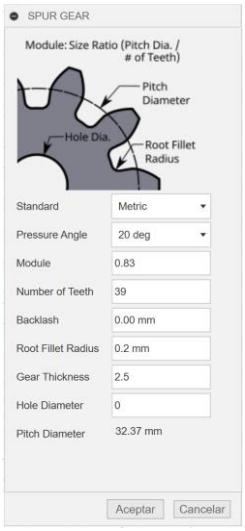


Ilustración 67 Ventana de configuración 4

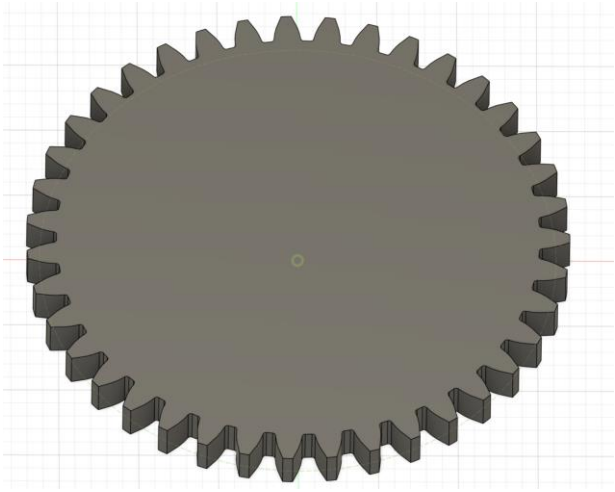


Ilustración 68 Engranaje recto 39 dientes

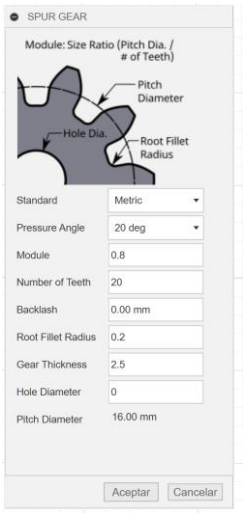


Ilustración 69 Ventana de configuración 5

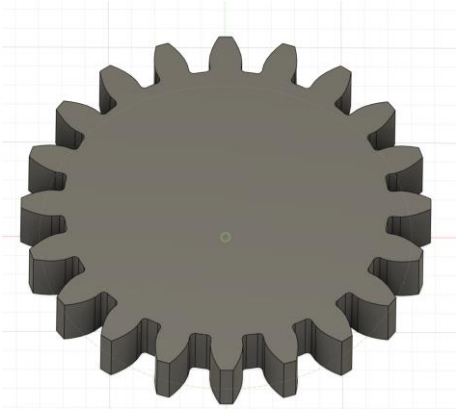


Ilustración 70 Engranaje recto 20 dientes

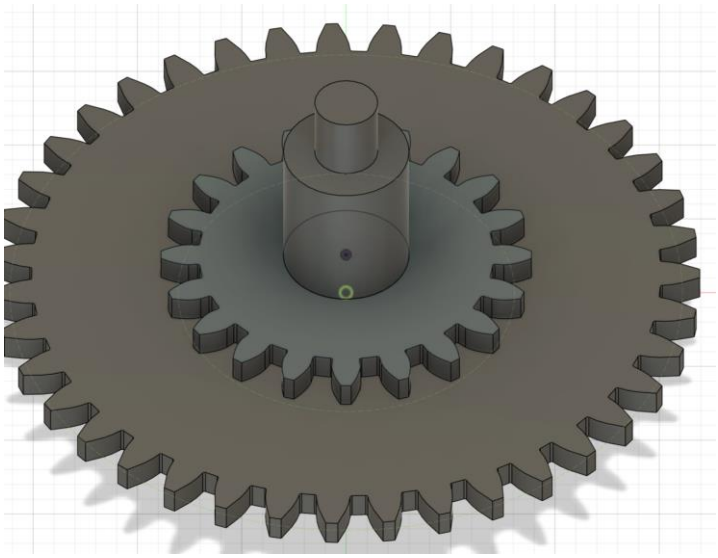


Ilustración 71 Engranajes rectos acoplados

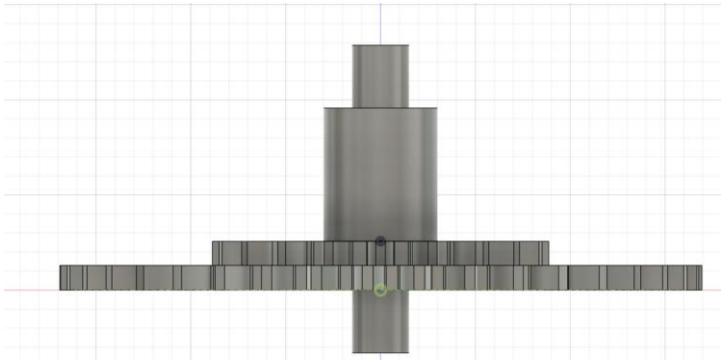


Ilustración 72 Vista lateral engranaje doble 39-20

4.6.2.4 Engranaje recto

El último elemento del sistema es un engranaje de 32 dientes rectos que cuenta con un eje que mueve y alinea el engranaje con el resto del sistema.

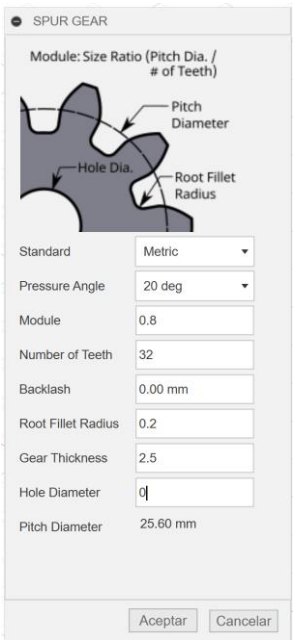


Ilustración 73 Ventana de configuración 6

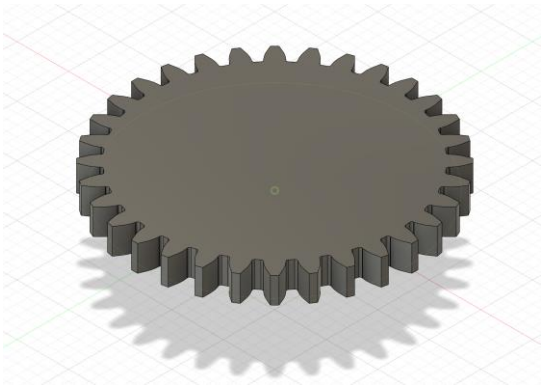


Ilustración 74 Engranaje 32 dientes

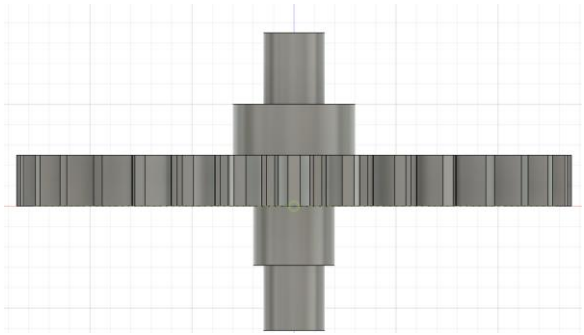


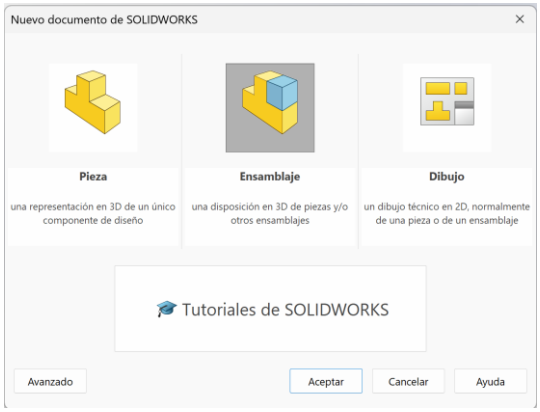
Ilustración 75 Vista lateral engranaje recto 32 dientes

4.7 Ensamblaje

A continuación se presenta el procedimiento detallado para realizar el ensamblaje hace mediante la herramienta CAD SolidWorks:

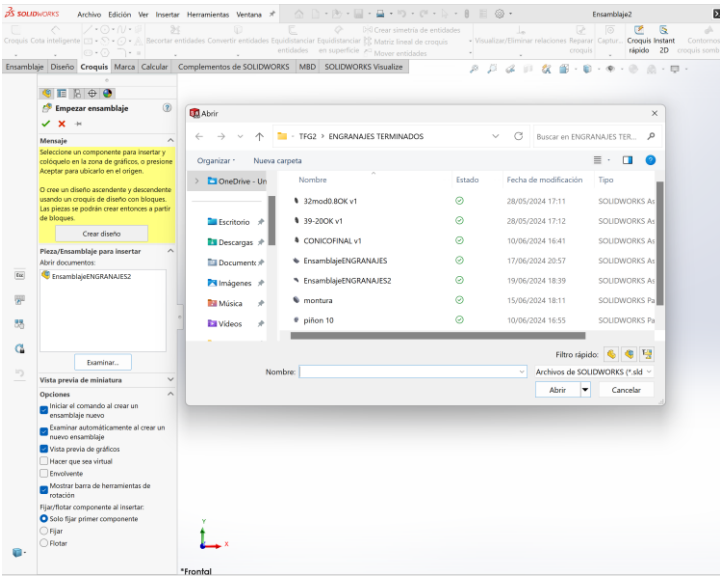
1. Crear un nuevo ensamblaje

Se abre un nuevo documento de ensamble en solidworks.



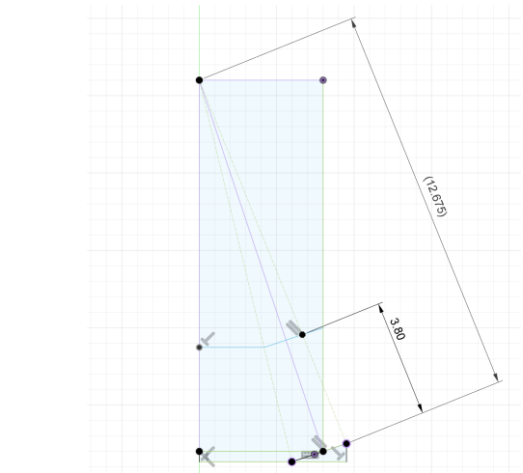
2. Insertar componentes

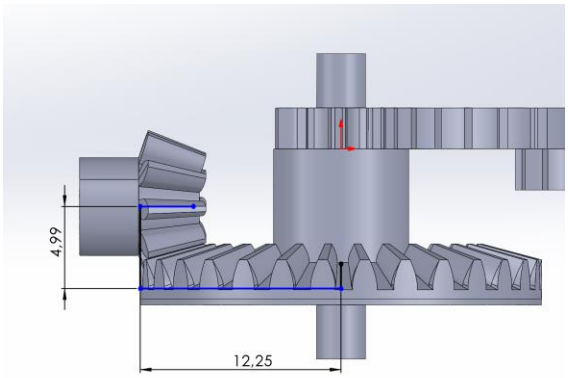
Se insertan los modelos CAD generados anteriormente en Fusion 360.



3. Calculo de la distancia entre centros

- Para calcular la distancia entre centros (C) de dos engranajes cónicos acoplados, se utiliza las longitudes de las generatrices de los dos engranajes en contacto.





- Para calcular la distancia entre centros (C) de dos engranajes rectos acoplados, se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Donde d_1 y d_2 son los diámetros primitivos de los engranajes acoplados

$$C_{1-2} = \frac{6.61 + 32.23}{2} = 19.42$$

$$C_{2.1-3} = \frac{16 + 25.6}{2} = 20.8$$

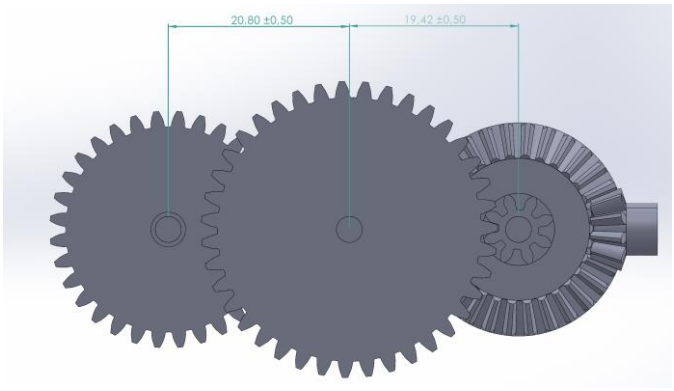


Ilustración 76 Distancia entre centros

4. Definir relaciones de posición

Para posicionar los engranajes, alinear y verificar que las distancias entre centros coincidan con los cálculos teóricos, se utilizan restricciones y relaciones de ensamblaje.

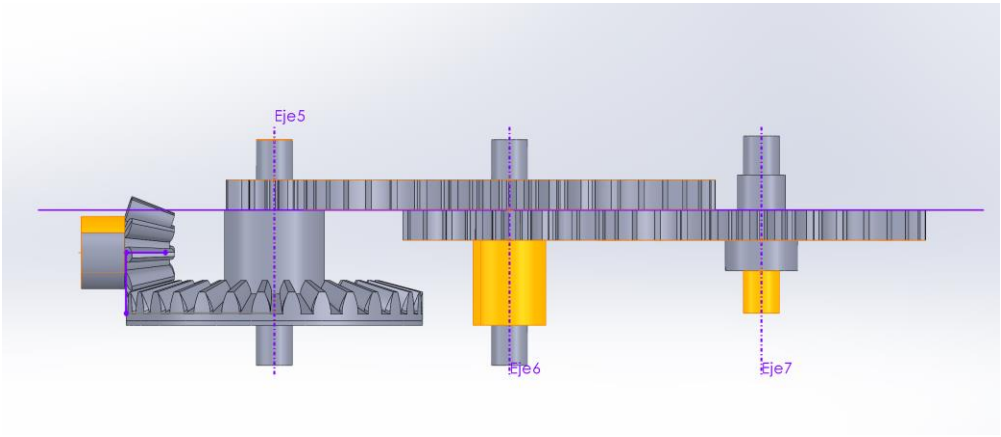


Ilustración 77 Vista de las relaciones de posición

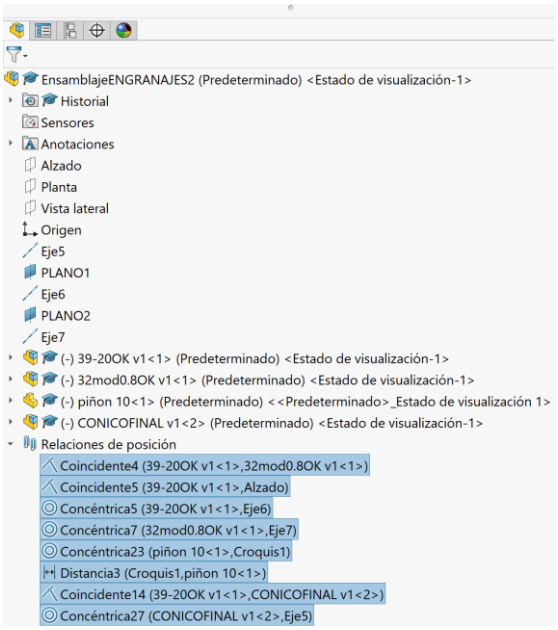


Ilustración 78 Relaciones de posición utilizadas

5. Ensamble final

Para el ensamble final de la transmisión de engranajes, se ha modelado una montura con las medidas específicas de engrane. El ensamble final estará formado por el siguiente conjunto de piezas:

- Caja de montura
- Tapa
- Engranajes (x4)
- Rodamientos (x6)

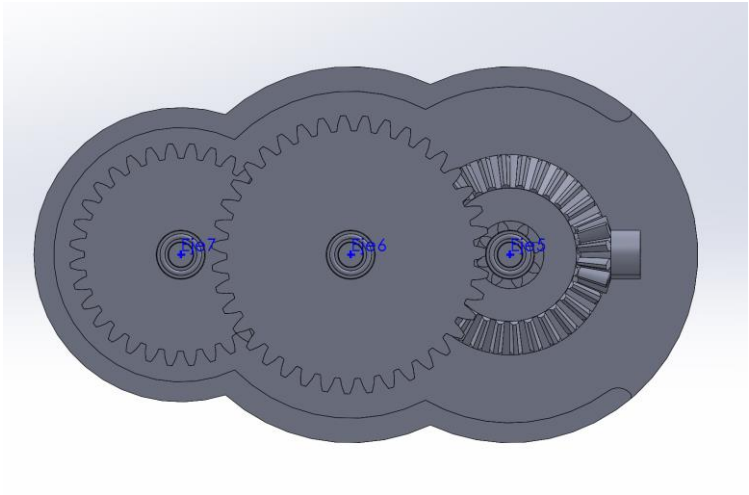


Ilustración 79 Vista superior ensamble sin tapa

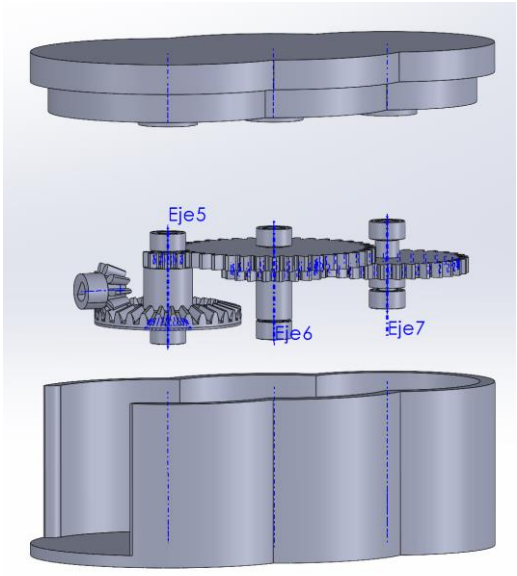


Ilustración 80 Ensamble separado con ejes de referencia

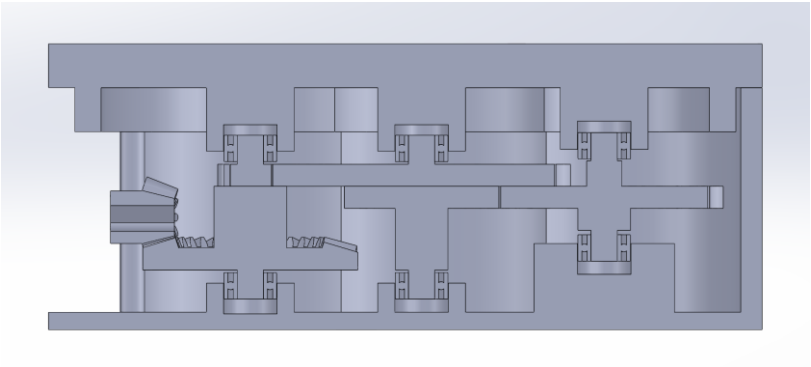


Ilustración 81 Corte ensamble

4.8 Simulación y Verificación

En este proyecto se ha llevado a cabo una simulación detallada del sistema de engranajes mediante el software ANSYS Workbench. El objetivo de la simulación es realizar un análisis estático de elementos finitos, evaluando el comportamiento mecánico del sistema de engranajes diseñado anteriormente y aplicando la tecnología de impresión 3D FDM. Los materiales seleccionados para esta simulación son ABS, PLA y PA6, estudiados anteriormente mediante ensayos de tracción y de los cuales se han obtenido las propiedades mecánicas necesarias para la realización de este estudio.

La simulación incluye un análisis de esfuerzos, deformaciones y el comportamiento bajo carga de los engranajes, obteniendo una visión completa del rendimiento del sistema. El proceso de simulación sigue una serie de pasos que incluyen la importación de la geometría desde el software Solidworks, la definición de las propiedades de los materiales, la configuración de las condiciones de contorno y la ejecución del análisis estático estructural.

Como resultado de este estudio se obtendrán los resultados de cada material para después hacer una comparación e identificar sus ventajas y limitaciones en aplicaciones prácticas. La validación de estos resultados es esencial para asegurar que los engranajes impresos en 3D cumplen con los requisitos de durabilidad y funcionabilidad establecidos.

4.8.1 Análisis de los parámetros seleccionados

1. Equivalent (Von-Mises) Stress (MPa)

   La tensión equivalente de Von Mises es un criterio de fluencia que se utiliza para predecir el inicio de deformación plástica en materiales dúctiles, es decir, permite identificar los puntos críticos en donde se concentran los esfuerzos, lo que es crucial para determinar la resistencia y durabilidad del diseño.
   (Ansys, s.f.)

2. Total Deformation (mm)

   La deformación total nos indica el desplazamiento de un punto en el material desde su posición inicial hasta su posición final después de haber aplicado la carga.

3. Safety Factor

   El factor de seguridad indica la relación entre la resistencia máxima de un material y la carga máxima esperada. Para que un elemento se considere seguro

y pueda soportar una carga aplicada sin fallar, el factor de seguridad debe ser mayor a 1.

$$SF = \frac{Resistencia\ maxima\ del\ material}{Carga\ maxima\ aplicada}$$

4. Life (ciclos)

La vida nos indica el número de ciclos de carga que puede soportar un elemento bajo carga antes de fallar debido a fatiga. Para este estudio es necesario conocer la vida a fatiga de los materiales, la curva S-N, las cuales hemos obtenido de diferentes estudios.

- Curva S-N ABS

Ciclos	Tensión Alternante (MPa)
2E+05	32
3E+05	27
5E+05	25
8E+05	20
1,2E+06	15
1,7E+06	10

Tabla 17 Datos curva S-N ABS (Seol Kyeong-su, 2018)

- Curva S-N PLA

Ciclos	Tensión Alternante (MPa)
10000	70
100000	55
5E+05	35
1E+06	18
1E+07	18
2,5E+07	18

Tabla 18 Datos curva S-N PLA (Ezzeddine Ftoutou, 2024)

- Curva S-N PA6

Ciclos	Tensión Alternante (MPa)
100	65
1000	60
10000	55
1E+05	50
1E+06	45
1E+07	42

Tabla 19 Datos curva S-N PA6 (Dr. Touhid Alam Ansari, 2018)

4.8.2 Procedimiento del estudio en ANSYS

A continuación se explica detalladamente el procedimiento a seguir para el estudio del sistema de engranajes:

1. **Creación del proyecto**

   Se abre el módulo Static Structural, una herramienta diseñada específicamente para realizar análisis estructurales estáticos.

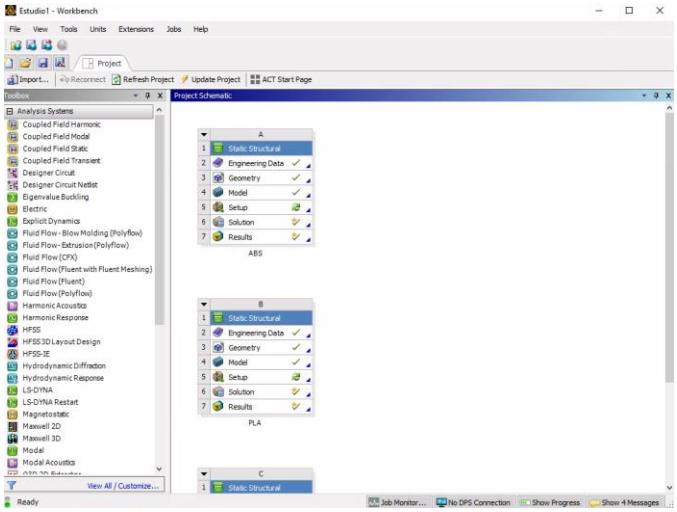


Ilustración 82

2. Definición de materiales

En el módulo de “Engineering Data”, se añaden los materiales que se van a utilizaren el estudio (ABS, PLA y PA6) y se introducen las propiedades de cada material previamente calculadas:
Densidad, módulo de Young, limite elástico, tensión de rotura, curva S-N.

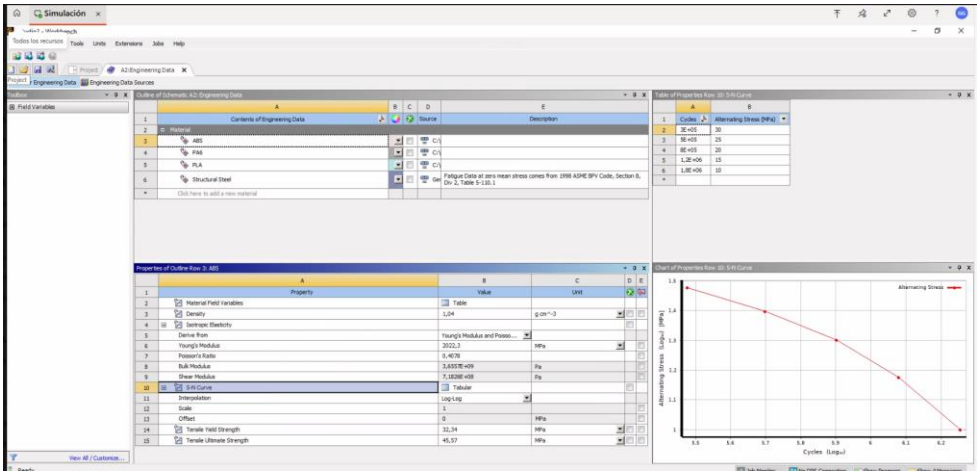


Ilustración 83 Definición de materiales

3. Importación de la geometría

Se importa la geometría del sistema de engranajes realizado en el SolidWorks, en forma de ensamblaje y se comprueba que se ve correctamente.

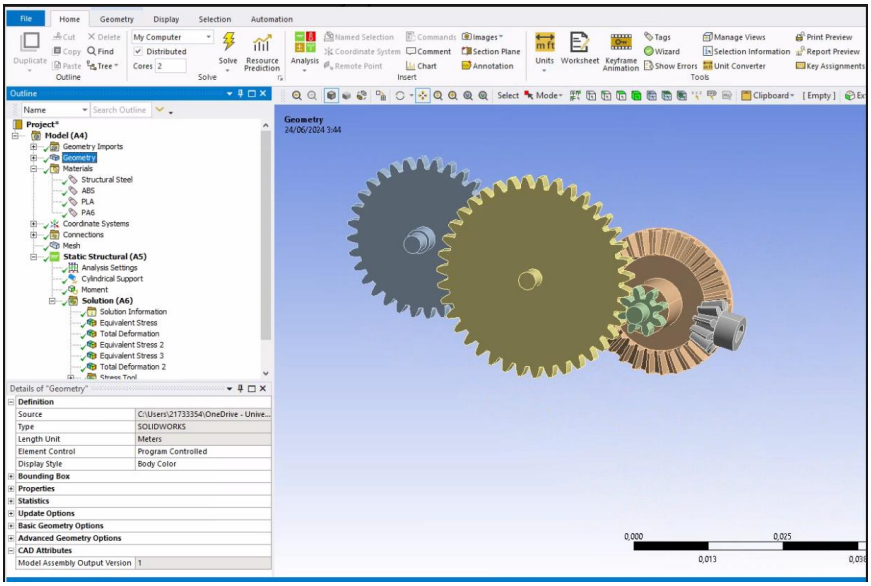


Ilustración 84 Geometria importada

4. Configuración del modelo

Una vez importada la geometría, se abre el módulo de “Mechanical” en donde se configura el estudio. Se definen las conexiones entre los diferentes componentes del sistema, en este caso, las conexiones serán entre dientes de cada par de engranajes. Por otro lado se aplican los soportes cilíndricos en las caras correspondientes a los ejes en donde irían los rodamientos que permiten movimiento de los engranajes.

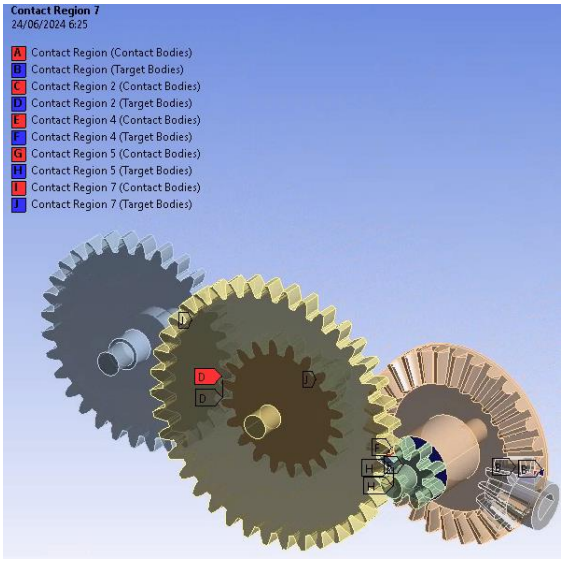


Ilustración 85 Contacto entre engranajes

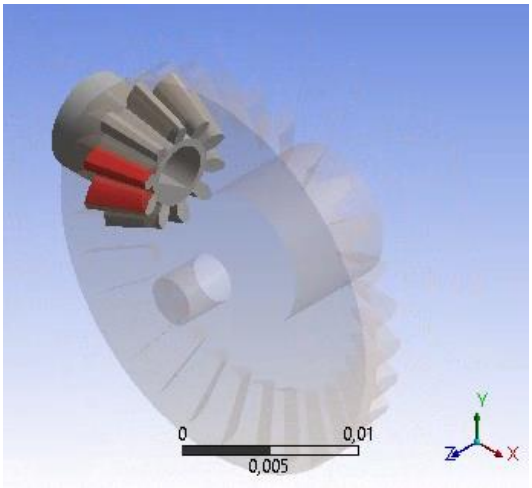


Ilustración 86 Caras del engranaje en contacto

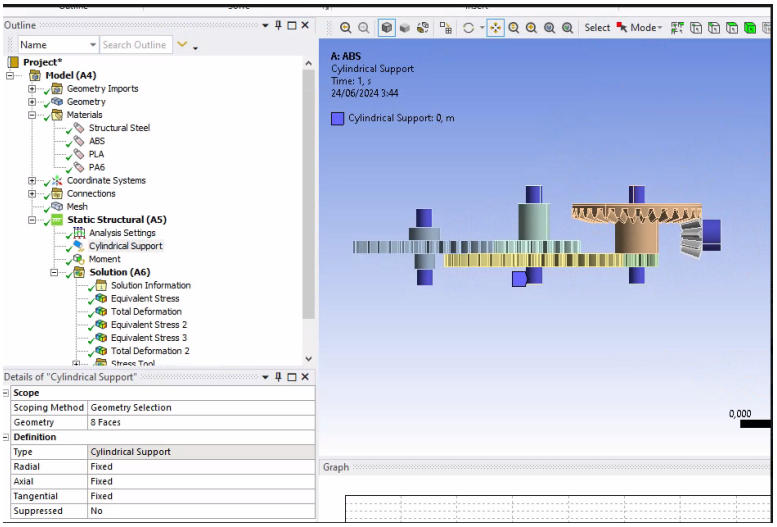


Ilustración 87 Aplicación de sujeciones

5. Generar malla

Se genera una malla, con la operación de automallado se crea una malla lo suficientemente fina como para capturar los detalles impotantes del sistema.

- Elementos: 61650
- Nodos: 110977

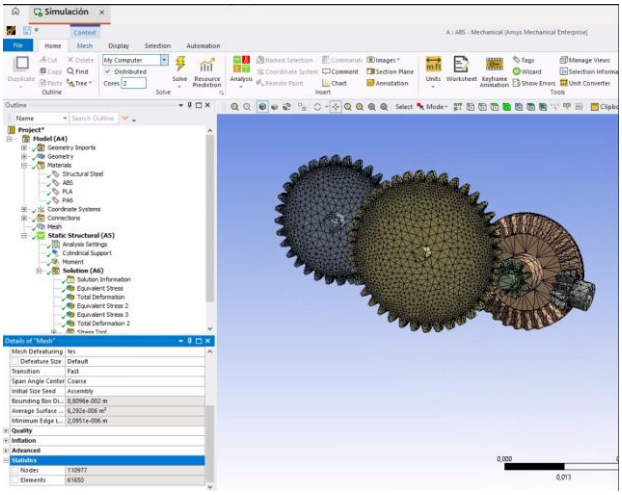


Ilustración 88 Mallado

6. Aplicación de cargas

Se aplica un momento de 0.5Nm al engranaje de entrada para simular la torsión transmitida a través del sistema.

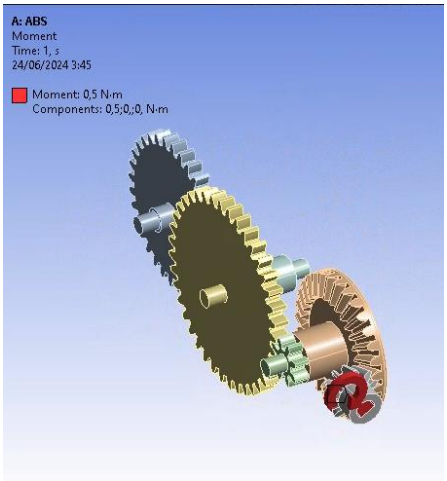


Ilustración 89 Momento aplicado

7. Configuración de la solución

Una vez definidas las condiciones del estudio, se configuran los parámetros de análisis para calcular el estrés equivalente, la deformación total, el factor de seguridad y la vida a fatiga.

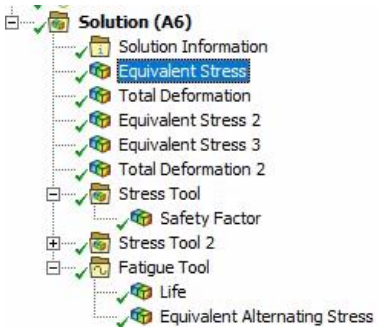


Ilustración 90 Árbol de soluciones

8. Ejecución de del análisis

Tras configurar el estudio se corre la simulación y se obtienen los siguientes resultados:

- **Equivalent (Von-Mises) Stress (MPa)**

En las siguientes figuras se pueden observar las zonas en donde se concentra el mayor y menor número de tensiones. En los tres casos la tensión máxima se genera en los mismos puntos, debido a la geometría del diseño. Como ya se ha visto, el momento se ha aplicado en el primer engranaje en donde se ubicaría el motor en un caso práctico, esto genera que este engranaje este sometido a mayores tensiones que los demás. La tensión máxima se produce en zonas en donde los dientes rectos se unen con el cuerpo cónico del engranaje, como se

puede apreciar en el diseño son regiones en las que existen aristas las cuales son más propensas a estas concentraciones de tensiones.
Este resultado nos sugiere aplicar un cambio en el diseño del engranaje, haciendo un cuerpo con más redondeos y evitando estas aristas más delicadas.

ABS

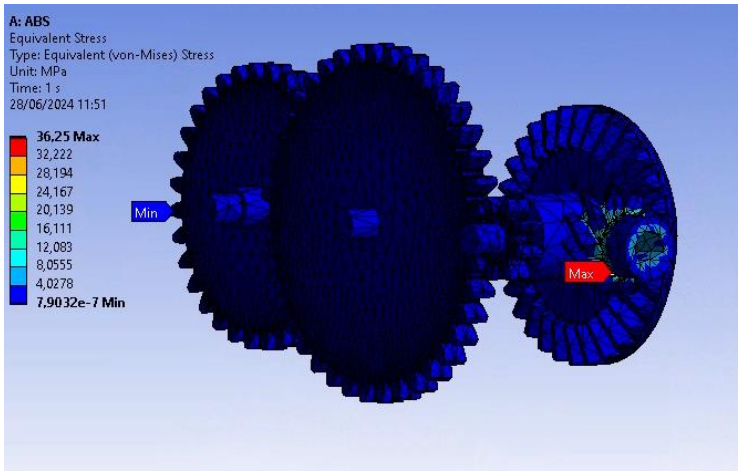


Ilustración 91 Equivalent stress ABS

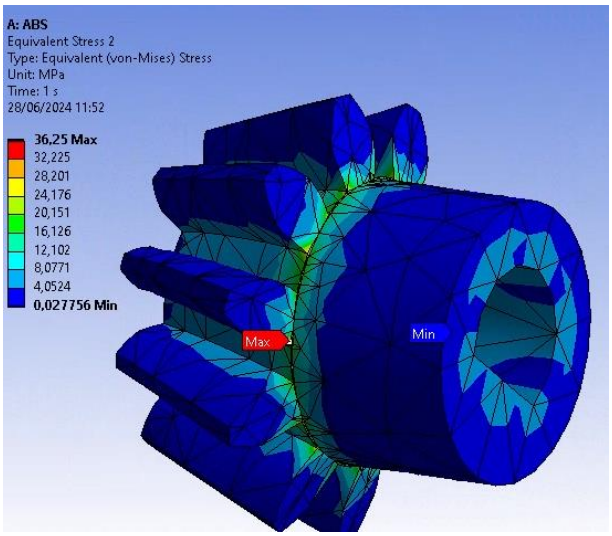


Ilustración 92 Zona de máxima tensión ABS

PLA

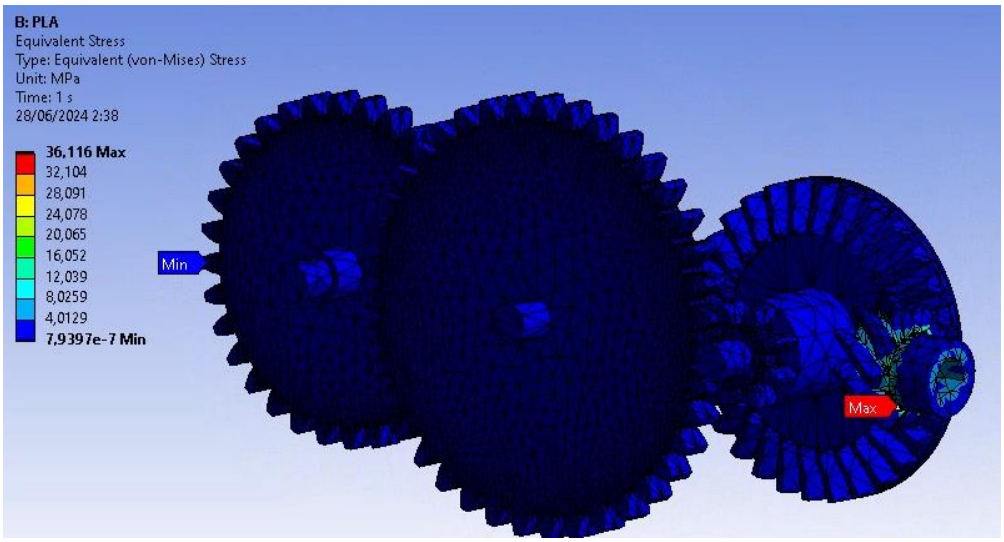


Ilustración 93 Equivalent stress PLA

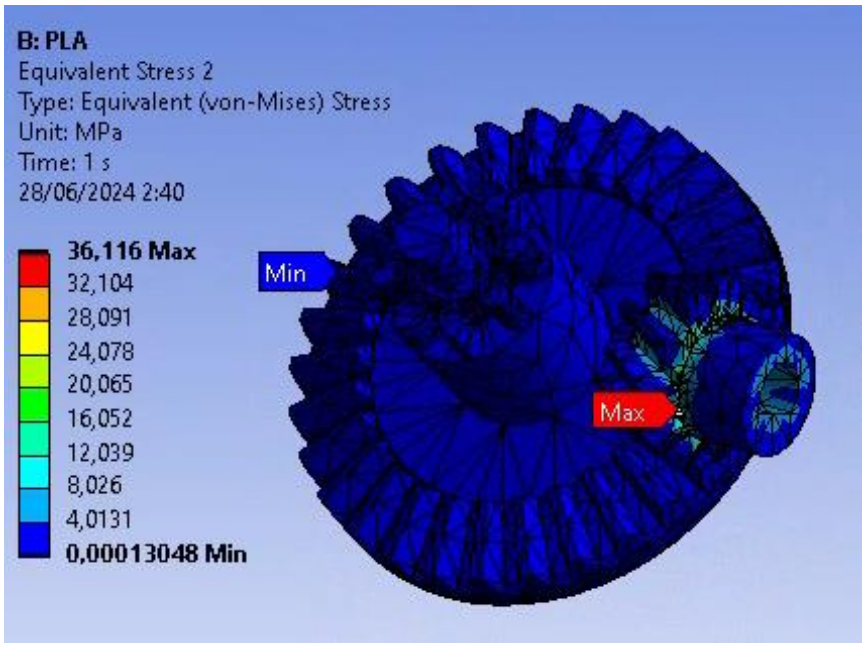


Ilustración 94 Zona de máxima tensión PLA

PA6

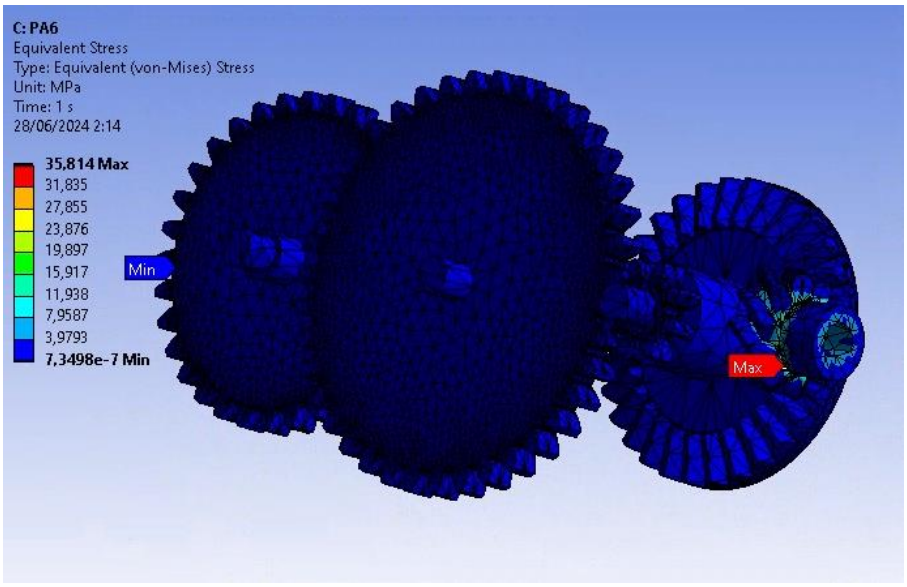


Ilustración 95 Equivalent stress PA6

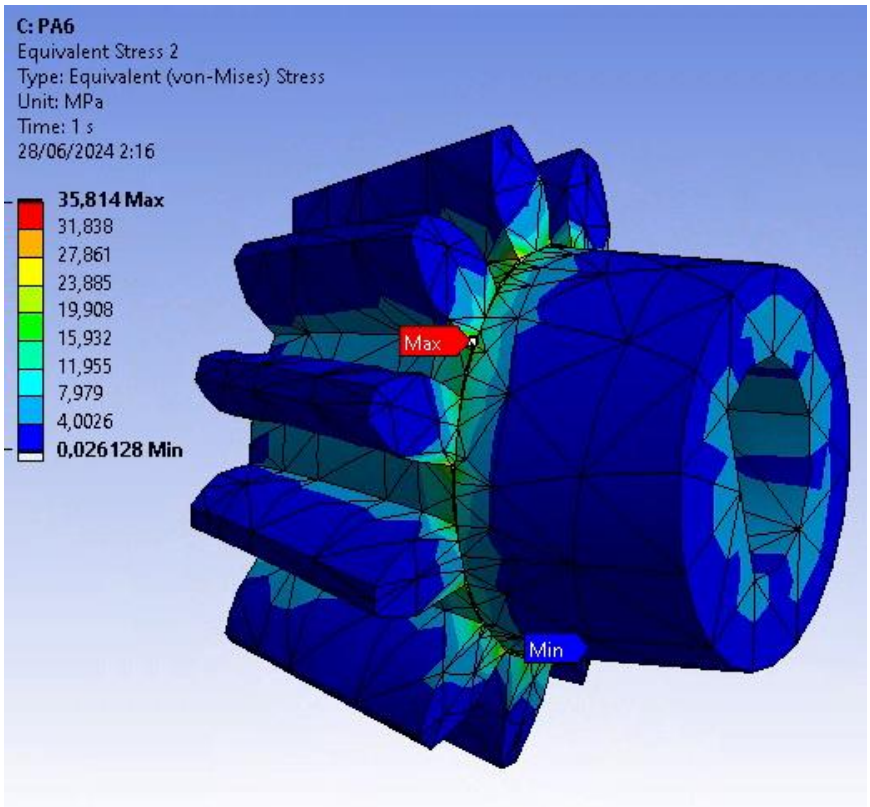


Ilustración 96 Zona de máxima tensión PA6

- **Total Deformation (mm)**

  Al aplicar un momento de 500Nmm, los materiales sufren una mínima deformación, como hemos estudiado anteriormente con los ensayos de tracción pudimos observa que el material más rígido es el PA6 seguido del PLA y ABS. A diferencia de la tensión máxima que se encontrada en la parte inferior del engranaje, la máxima deformación se presenta en las regiones superiores de los dientes con valores entre 0.015 0.023 mm.

ABS

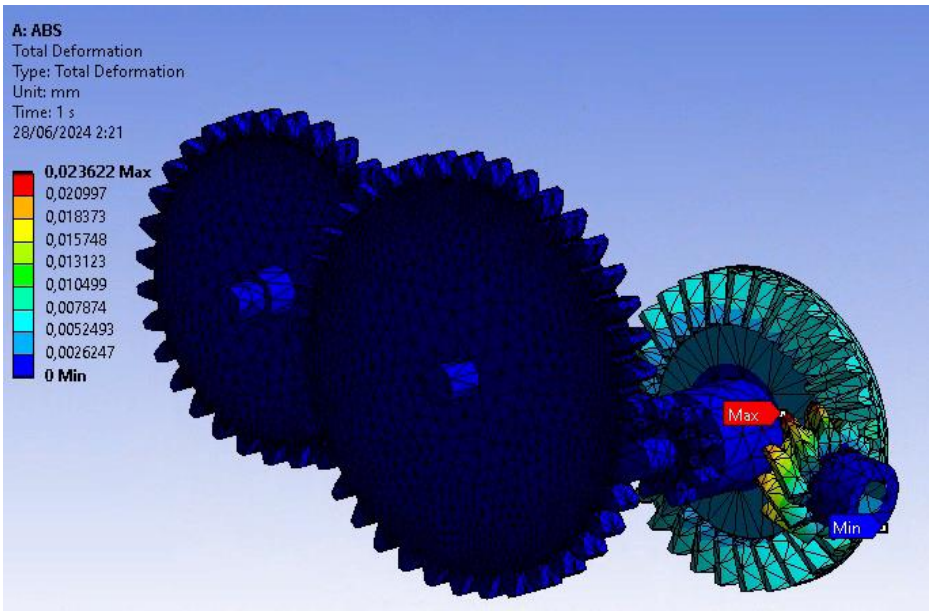


Ilustración 97 Deformación total del sistema ABS

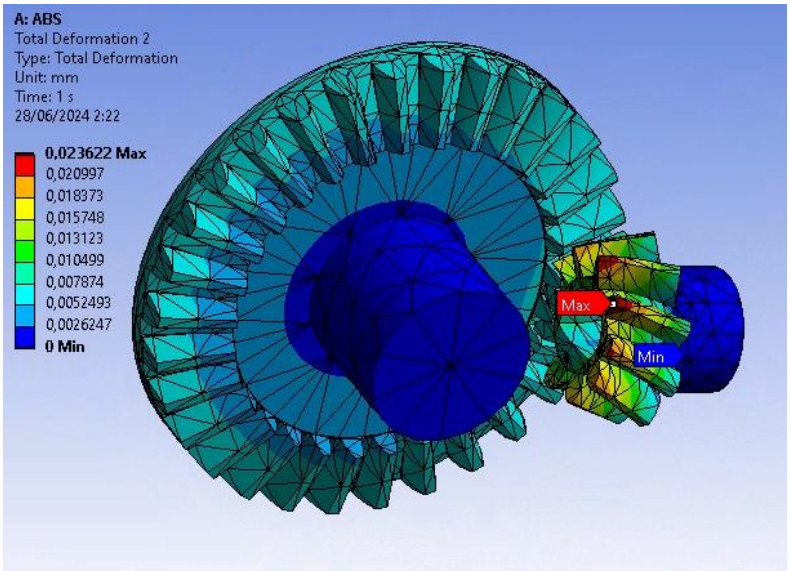


Ilustración 98 Zona de máxima deformación ABS

PLA

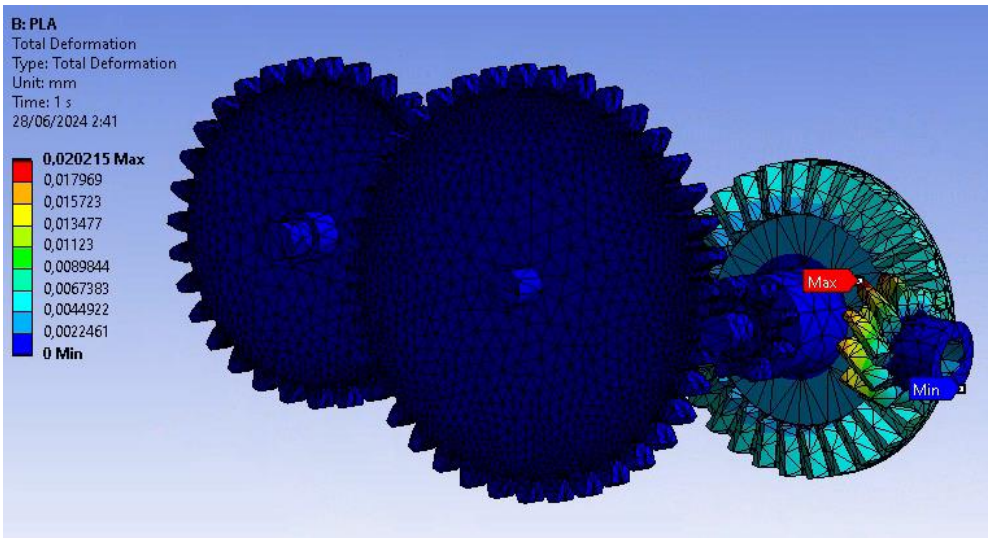


Ilustración 99 Deformación total del sistema PLA

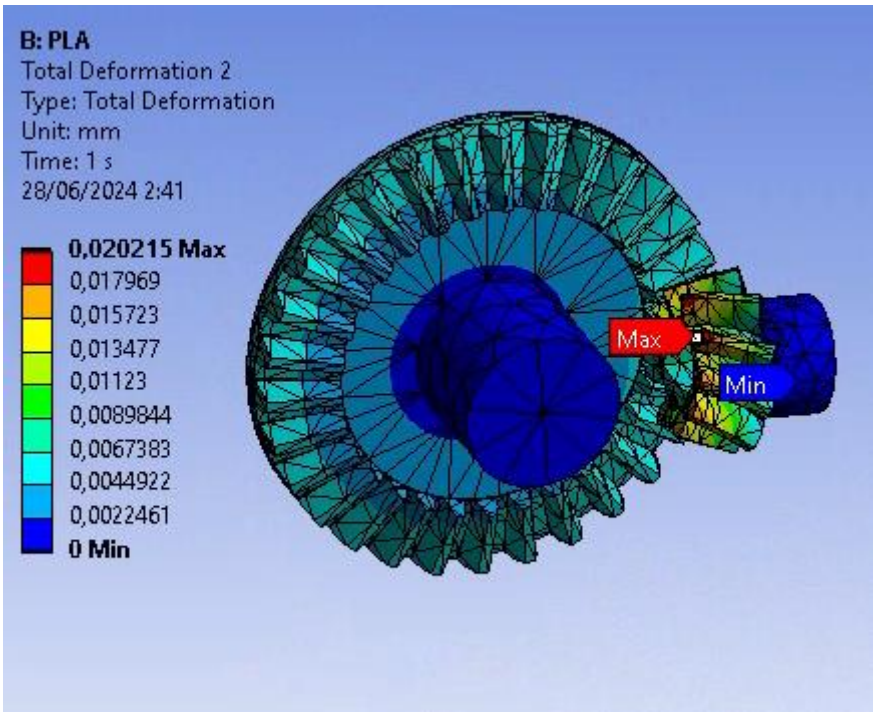


Ilustración 100 Zona de máxima deformación PLA

PA6

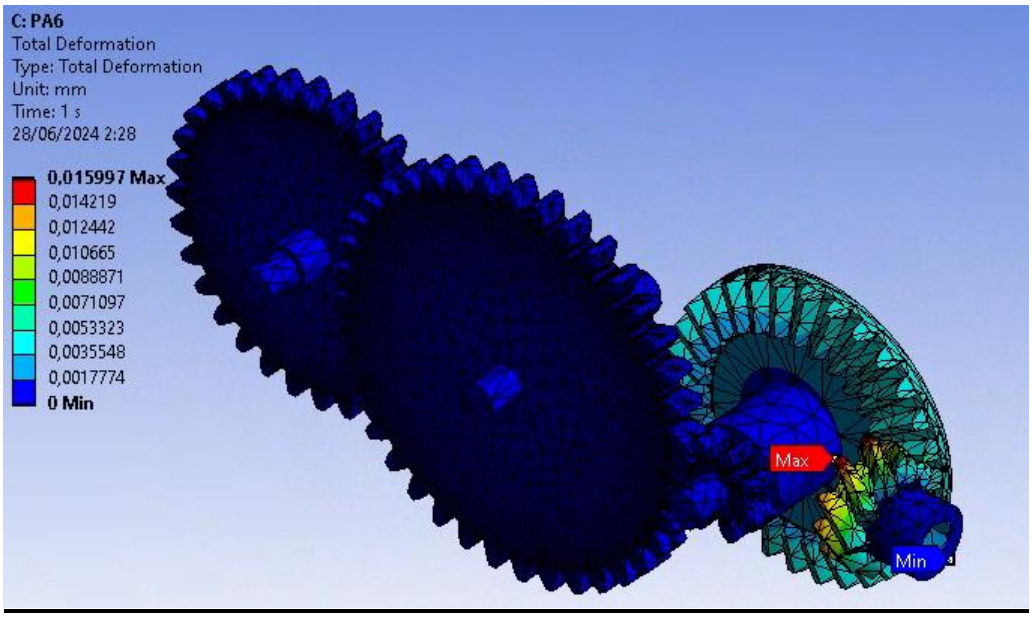


Ilustración 101 Deformación total del sistema PA6

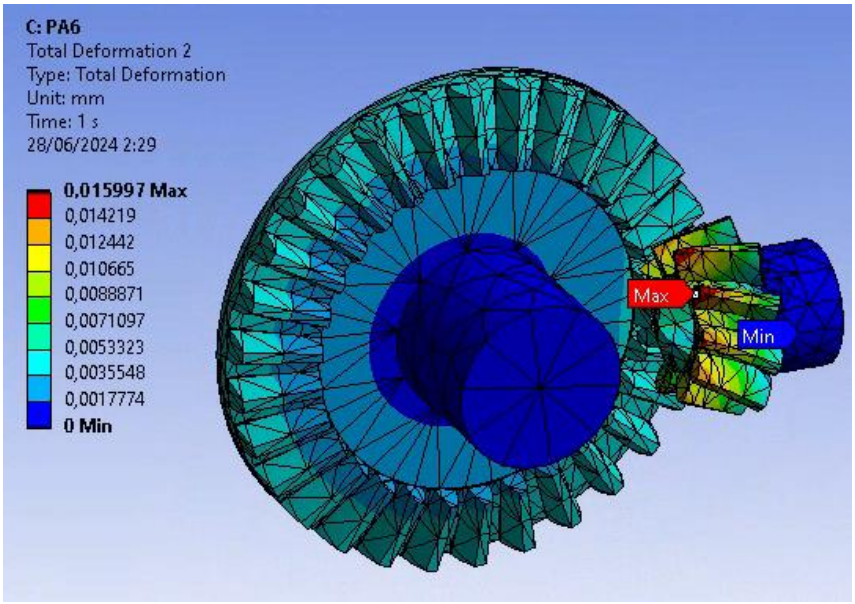


Ilustración 102 Zona de máxima deformación PA6

- **Safety Factor**

Como ya se ha explicado, el factor de seguridad es unnrelcaion entre la carga maxima que aguanta el material y la aplicada. Las tensiones aplicadas en el sistema de engranajes varian entre 35 y 36 MPa, mientras que la resistencia de los materiales es ligeramente superior como en el caso de la poliamida la cual tiene un limite elastico de 36.75 MPa, dando como resultado factores de seguridad mayores que 1.

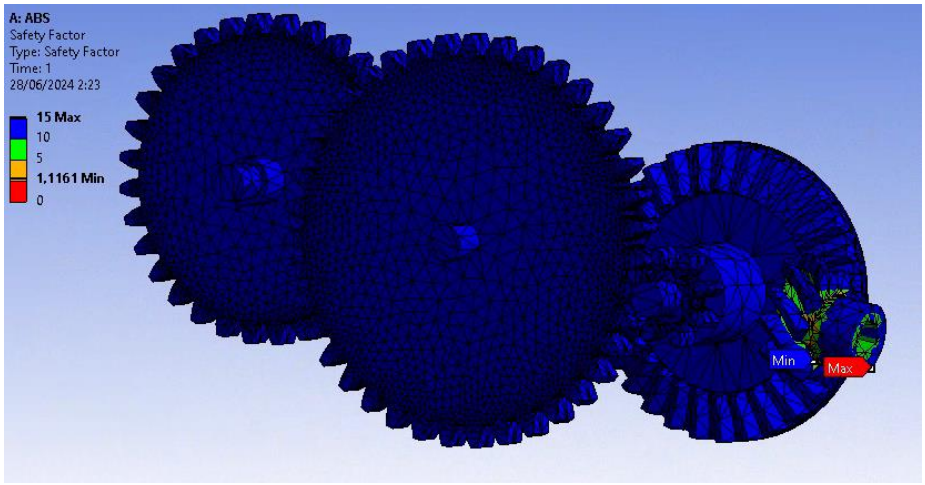


Ilustración 103 Factor de seguridad ABS

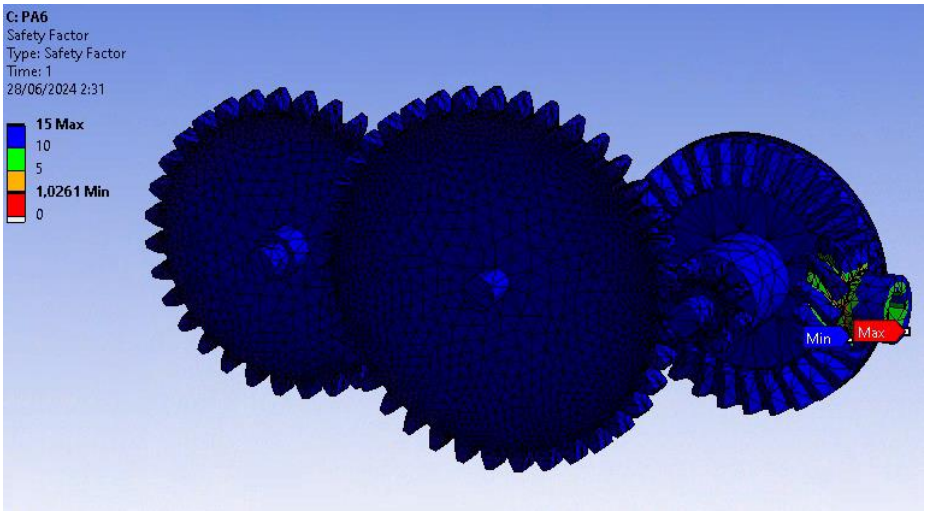


Ilustración 104 Factor de seguridad PLA

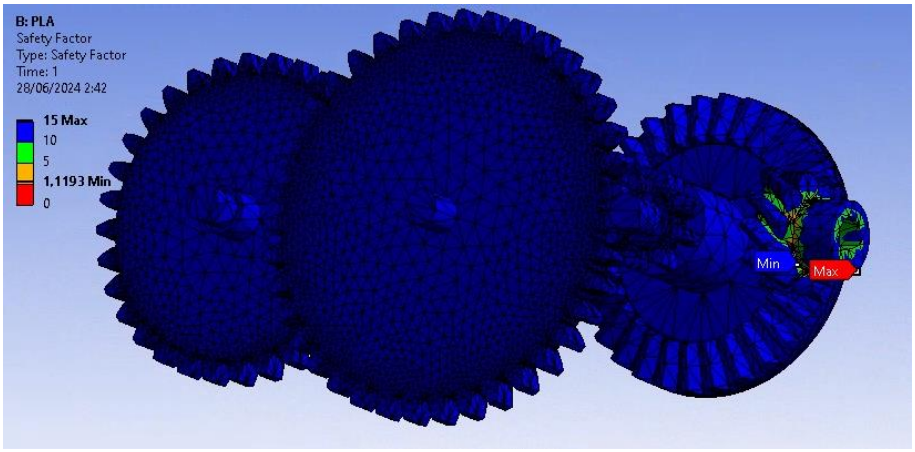


Ilustración 105 Factor de seguridad PA6

- **Life (ciclos)**

  Según las curvas S-N importas de diferentes estudios de vida a fatiga de cada material, utilizando estos materiales la vida del sistema de engranajes seria infinita en

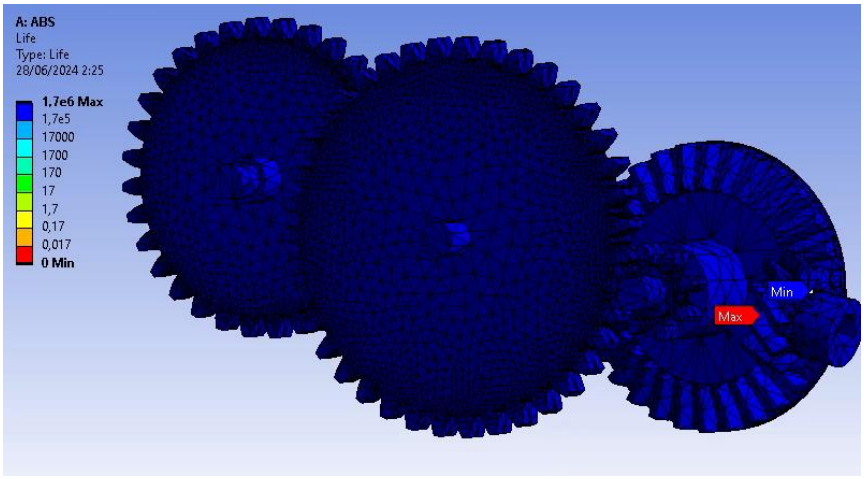


Ilustración 106 Ciclos de vida ABS

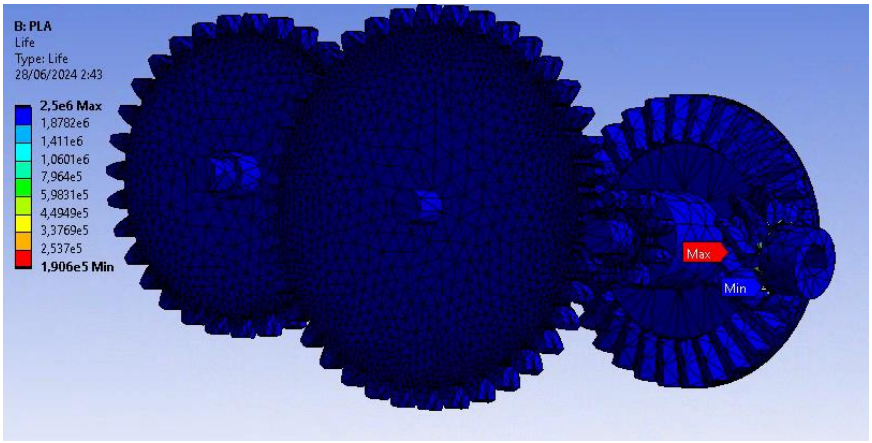


Ilustración 107 Ciclos de vida PLA

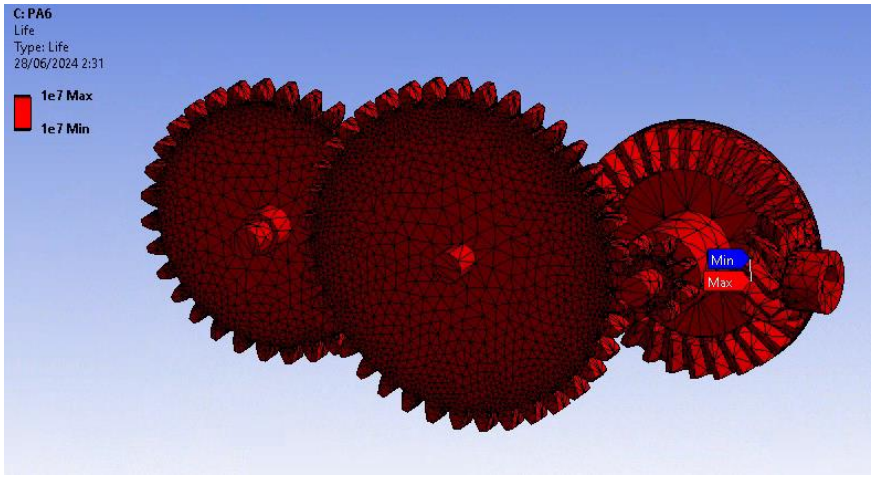


Ilustración 108 Ciclos de vida PA6

9. Conclusiones

Material	**ABS**		**PLA**		**PA6**	
Equivalent Stress (Mpa)	Max	Min	Max	Min	Max	Min
	36,25	7,9043 E-07	36,11	7,93 E-07	35,81	7,3515 E+07
Total deformation (mm)	0,2362		0,0202		0,0159	
Safety Factor	1,1161		1,1193		1,0261	
Life	1,7 E+06	0	2,5 E+07	1,906 E+05	1 E+07	1 E+07

Según los resultados recogidos en la tabla anterior, en cuanto a resistencia mecánica, los tres materiales aguantarían las condiciones de uso establecidas. EL material más adecuado para este tipo de aplicación es el PA6 del cual hemos podido observa a lo largo de estos estudios que se trata de un polímero reforzado con fibras de vidrio las

cuales aportan un aumento en la resistencia de este material. El PLA y el ABS pueden utilizarse también pero serian materiales más propensos a fallar en estas condiciones de uso.

4.9 Impresión 3D de engranajes

Para la impresión 3D de los engranajes se sigue el mismo procedimiento que en la impresión de las probetas, haciendo uso del Software Bambu Studio y de la impresora Bambu Lab X1-Carbon. Se configuran las impresiones dé cada material según las especificaciones recomendadas por cada fabricante.

4.9.1 Impresión en PLA

- Parámetros de impresión:

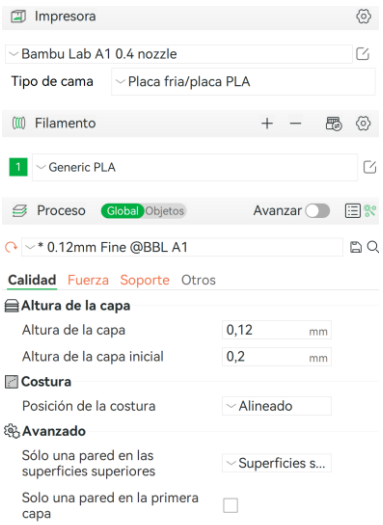


Ilustración 109 Parámetros impresión PLA

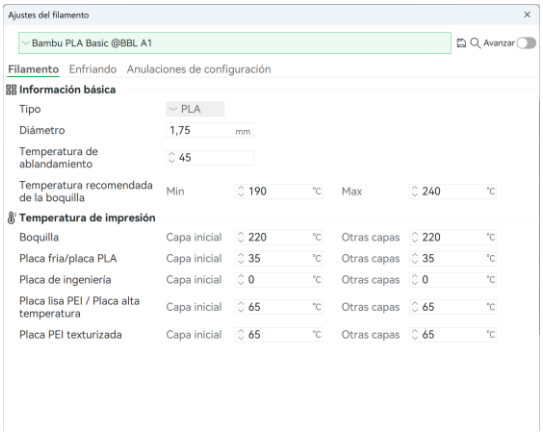


Ilustración 110 Parámetros impresión PLA 2

4.9.2 Impresión en ABS

- Parámetros de impresión:

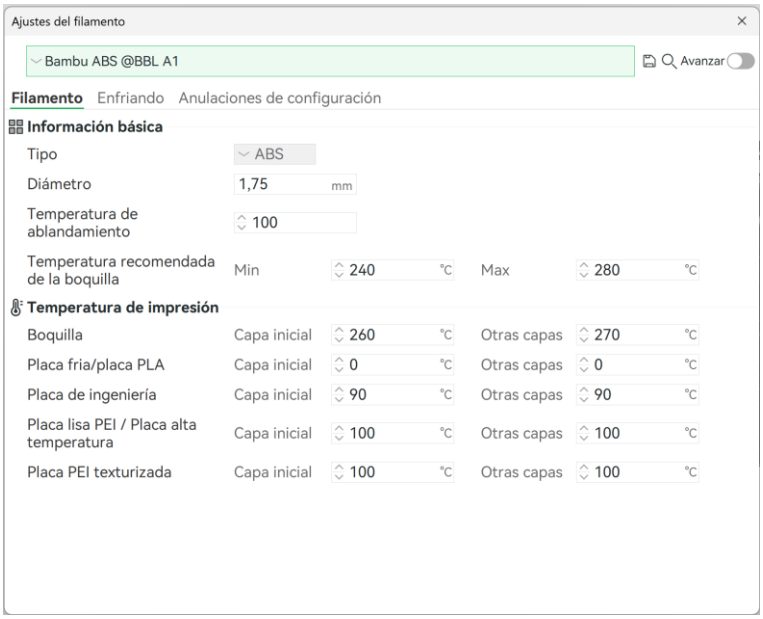


Ilustración 111 Parámetros impresión ABS

4.9.3 Impresión en PA6

- Parámetros de impresión:

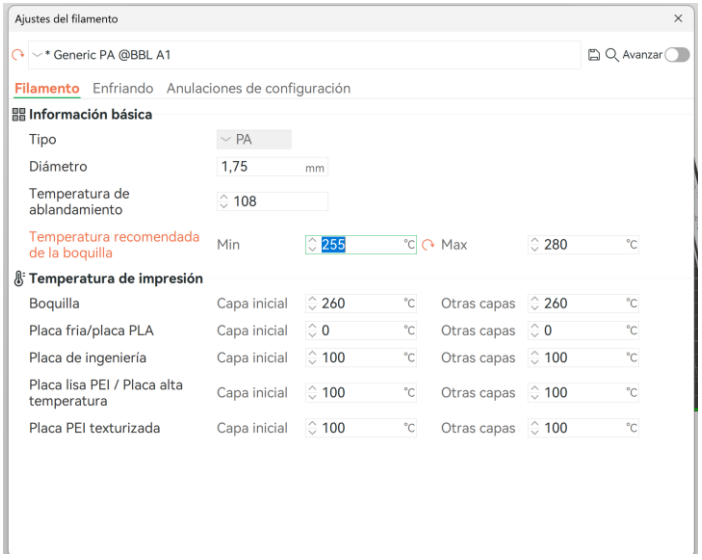


Ilustración 112 Parámetros impresión PA6

4.9.4 Previsualización

Tras configurar los parámetros de impresión, se colocan los modelos en la cama de la forma deseada para su impresión.

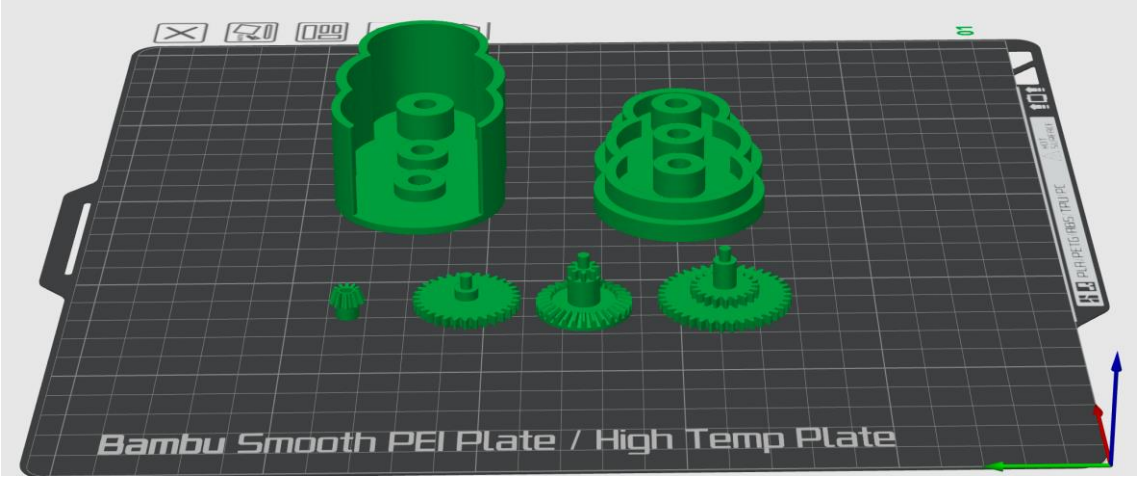


Ilustración 113 Previsualización del sistema

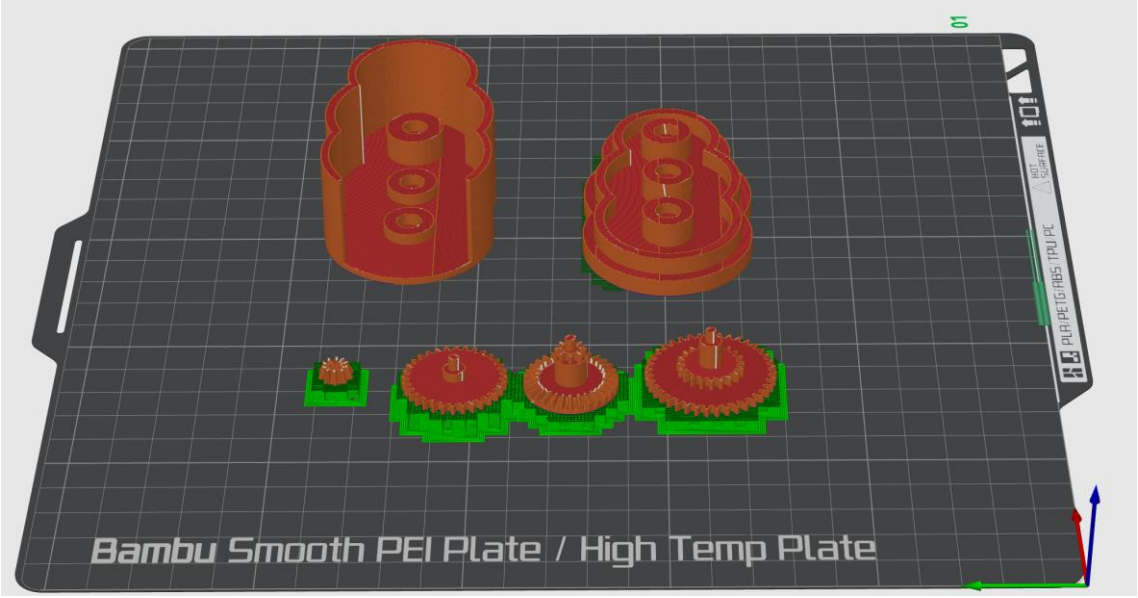


Ilustración 114 Previsualización del sistema con soportes

4.9.5 Impresión por capas

En este apartado se enseña una función del programa Bambu Studio que nos proporciona una visión clara del proceso de impresión al dividir el modelo en diferentes capas, mostrando el tiempo y la cantidad de material utilizados en cada una de ellas.

Esquema de colores Tipo de línea

Tipo de línea	Tiempo	Porcentaje	Filamento usado	Pantalla
Pared interior	27m56s	17,9%	5,15 m 15,36 g	✓
Pared exterior	19m52s	12,7%	2,61 m 7,80 g	✓
Pared de voladizo	23s	0,3%	0,02 m 0,07 g	✓
Relleno poco denso	40m13s	25,7%	6,96 m 20,76 g	✓
Relleno sólido interno	17m35s	11,2%	2,86 m 8,52 g	✓
Superficie superior	4m31s	2,9%	0,39 m 1,17 g	✓
Superficie inferior	2m58s	1,9%	0,45 m 1,34 g	✓
Puente	1m11s	0,8%	0,07 m 0,20 g	✓
Relleno de huecos	5m35s	3,6%	0,49 m 1,48 g	✓
Soporte	5m24s	3,5%	0,73 m 2,17 g	✓
Interfaz de soporte	1m20s	0,9%	0,23 m 0,68 g	✓
Personalizado	5m58s	3,8%	0,02 m 0,05 g	✓
Recorrido	23m33s	15,1%		
Plegar				
Desplegar				
Limpiar				
Costuras				✓

Estimación total

Total Filament:	19,98 m	59,59 g
Model Filament:	19,02 m	56,73 g
Coste:	1,19	
Planificar tiempo:	5m44s	
Tiempo de impresión del modelo:	2h31m	
Tiempo total:	2h36m	

Ilustración 115 Esquema de impresión por capas

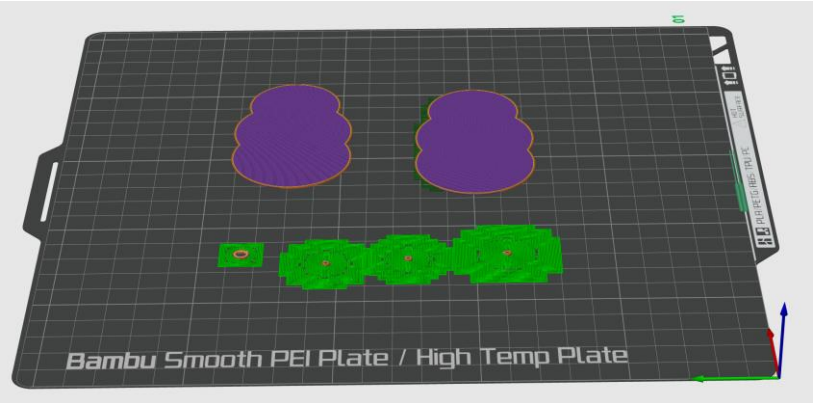


Ilustración 116 Capa 1

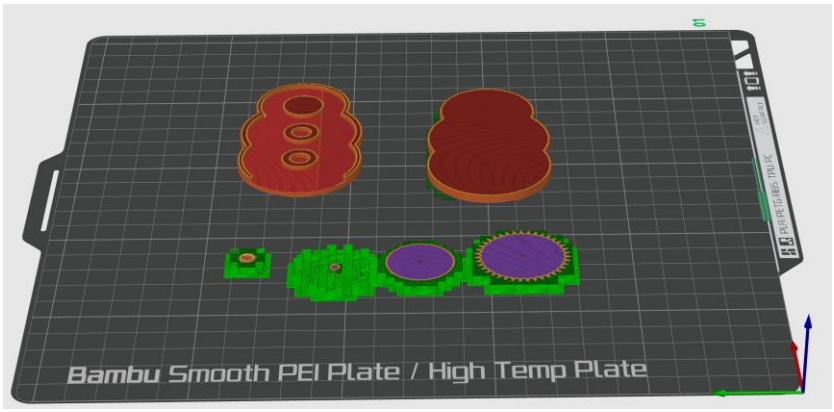


Ilustración 117 Capa 2

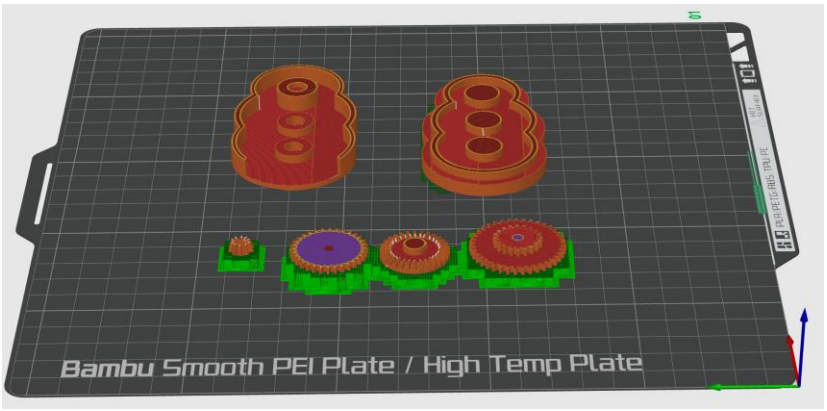


Ilustración 118 Capa 3

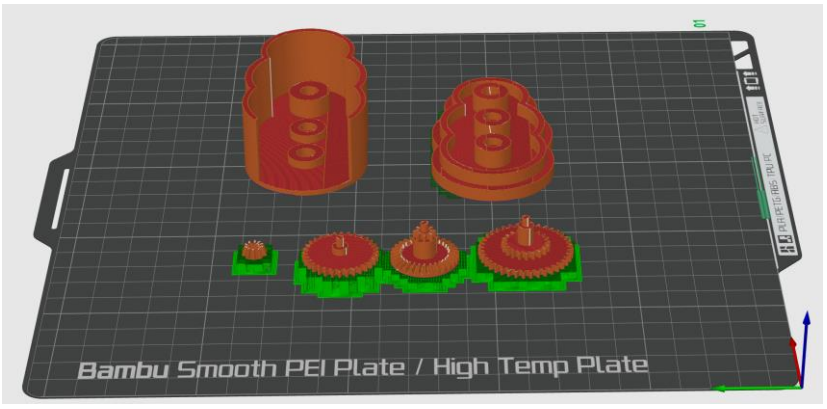


Ilustración 119 Previsualización del conjunto

4.9.6 Engranajes impresos

- PLA

  El primer material impreso es el PLA, es un material como ya hemos dicho fácil de imprimir, en las imágenes se puede apreciar la calidad de la impresión ya que son piezas de pequeño tamaño.

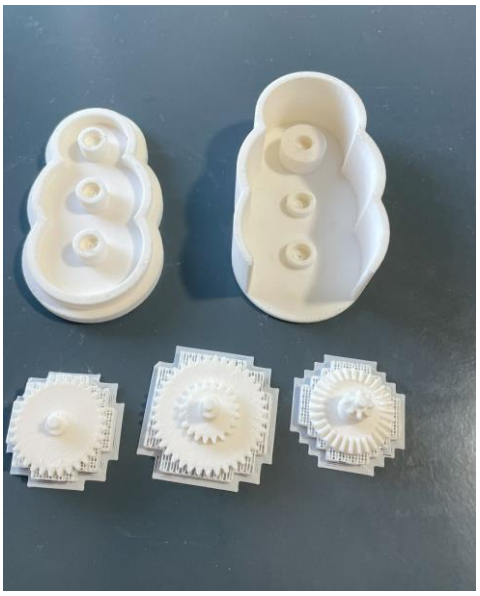


Ilustración 120 Impresión 3D del sistema de engranajes en PLA con soportes

Ilustración 121 Caja del sistema con rodamientos

Una vez se han impreso todas las piezas del sistema de transmisión, se realiza el ensamble del conjunto para verificar que las medidas y distancias son correctas.

Ilustración 122 Sistema montado sin tapa

- ABS

Al igual que el PLA, el ABS es un material sencillo de imprimir y se puede apreciar la precisión de impresión.

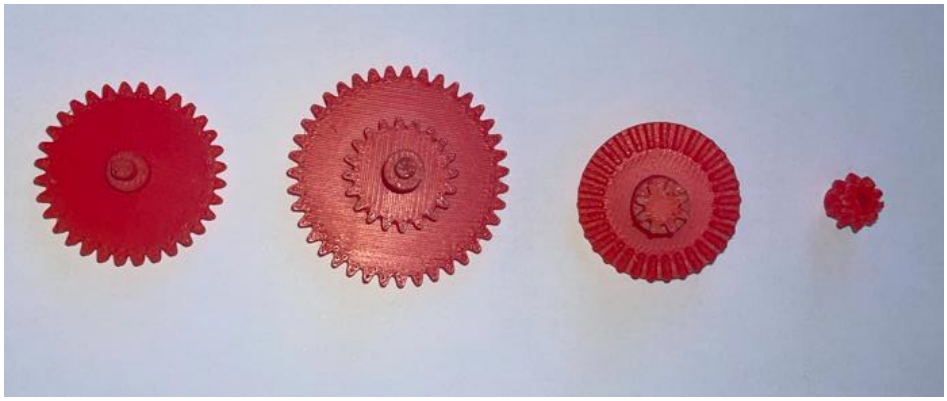


Ilustración 123 Impresión 3D del sistema de engranajes en ABS

- PA6

A diferencia de los materiales impresos anteriormente, el Nylstrong es un material más complicado de imprimir. Este material requiere de una alta temperatura de impresión, tanto de la boquilla extrusora como de la cama caliente. Al intentar imprimir los engranajes, la primera capa de la corona se despegaba del soporte, por lo que no se fijaba correctamente y, en consecuencia se movía durante el proceso de impresión. Se hicieron numerosos intentos de impresión de los engranajes con este material, cambiando los parámetros de impresión como la velocidad, la temperatura y el uso de adhesivos, aunque los resultados no fueron los esperados. Por lo que se puede observar este material presenta propiedades beneficiosas para la impresión de engranajes, sin embargo no presenta tanta precisión a la hora de realizar piezas de menor tamaño.

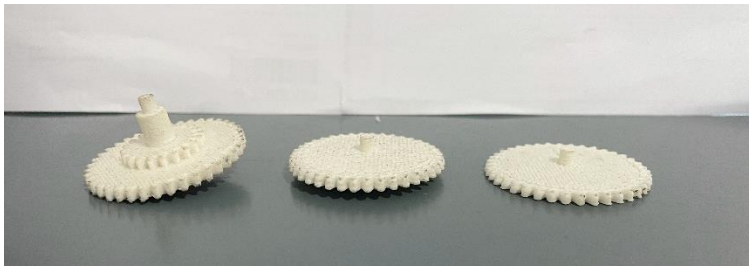


Ilustración 124 Fallo en la Impresión de engranajes PA6 1

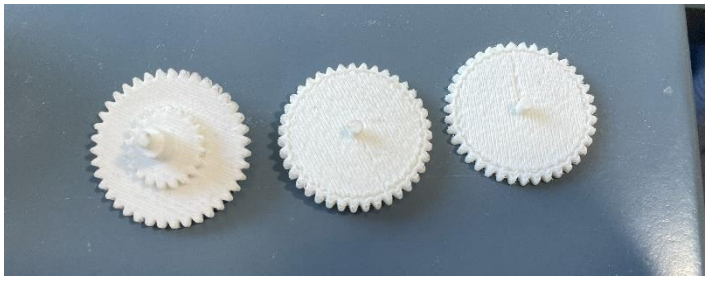


Ilustración 125 Fallo en la Impresión de engranajes PA6 2

Capítulo 5. PRESUPUESTO

En el siguiente capítulo se realiza un presupuesto detallado incluyendo la preparación e impresión de las probetas, los ensayos de tracción, impresión de los engranajes y otros gastos asociados.

5.1 Equipo de investigación

- **Ordenador**
  - Costo: 2000 €

5.2 Materiales de Impresión

- **Impresora 3D**
  - Costo : 1371.67 €
- **Programa de impresión 3d**
  - Costo: 0 €
- **Filamento ABS**
  - Costo por kg: 22.6 €
- **Filamento PLA**
  - Costo por kg: 31.27 €
- **Filamento PA6 (Nylon)**
  - Costo por kg: 47.93 €

- **Subtotal Materiales de Impresión: 1473.47 €**

5.3 Impresión de Probetas

- **Costo cantidad de material utilizado**
  - Peso probetas ABS: 8.27 g(0.186€) x2
  - Peso probetas PLA: 10.27 g(0.321€) x2
  - Peso probetas PA6: 10.85 g(0.52) x2
  - **Total Impresión**: 2 €

- **Adhesivos y Productos Auxiliares**
  - Pegamento para cama de impresión: 20 €
  - Laca para la cama de impresión: 4€
  - Alcohol isopropílico para limpieza: 10 €
  - **Total Auxiliares**: 34 €

- **Subtotal Impresión de Probetas: 36 €**

5.4 Material de ensayos

- **Equipo de Tracción**
  - Costo maquina universal: 2000-6000 €

5.5 Equipo de diseño

- Software Autodesk Fusion: 0 €
- Software Solid Works Student: 0€

5.6 Impresión de engranajes

- Peso engranajes PLA: 10.41 g (0.32€)
- Peso engranajes ABS : 8.47 g (0.19 €)
- Peso engranajes PA6: 8.91 g (0.42€)

- **Subtotal Impresión de Engranajes: 0.93 €**

Total Presupuesto

- **Equipo de investigación: 2000 €**
- **Materiales de Impresión**: **1473.47 €**
- **Impresión de Probetas**: **34 €**
- **Material de ensayos**: **4000 €**

Total General: **7507.47 €**

En conclusión, este presupuesto refleja una inversión significativa en equipo de investigación, materiales de impresión y en la adquisición de una impresora 3D de calidad y de un equipo de ensayo de materiales. Por otro lado se puede observar un mínimo costo en la impresión de los engranajes, lo que sugiere una fabricación económica.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En función de los objetivos planteados al inicio de este Trabajo Fin de Grado, a continuación se presentan las conclusiones principales derivadas de los estudios efectuados, los diseños desarrollados y los resultados obtenidos a lo largo del proyecto.

El estudio técnico de la impresión 3D ha demostrado que es una tecnología viable para la fabricación de engranajes, permitiendo la creación de componentes con geometrías complejas y personalizadas. Los ensayos y simulaciones realizados han demostrado que con una selección adecuada de materiales y parámetros de impresión, es una tecnología funcional y precisa.

La fabricación de los engranajes mediante impresión 3D y su posterior ensamblaje ha permitido evaluar la precisión y calidad del proceso. Se ha observado que esta tecnología aun presenta limitaciones en términos de tolerancias y acabado superficial, las cuales deben corregirse mediante postprocesamiento y ajustes en los parámetros de impresión.

Este proyecto se ha centrado en el estudio de la resistencia mecánica de materiales impresos mediante modelado por deposición fundida aplicados a engranajes con resultados favorables, sin embargo no se han tenido en cuenta factores como el desgaste o las temperaturas de trabajo a las que pueden ser sometidos y por las cuales pueden fallar. Sería beneficioso explorar mejor las propiedades mecánicas y térmicas de estos elementos al igual que nuevos materiales compuestos.

Estos factores se deberían estudiar en futuras investigaciones al igual que se recomienda mejorar la calidad de impresión mediante el desarrollo de técnicas avanzadas de impresión y postprocesamiento que permitan mejorar la precisión dimensional y el acabado superficial, lo cual podría ampliar las aplicaciones industriales de los engranajes impresos en 3D.

Por último, haber realizado este TFG me ha permitido adquirir amplios conocimientos de esta tecnología que es la impresión 3D. A través de este proyecto que ha requerido investigación literaria, investigación técnica y aplicación de conocimientos de diseño e impresión 3D, he podido aprender desde cero todos los tipos de fabricación aditiva, conocer las aplicaciones que tiene cada material, estar al tanto de las investigaciones que aún siguen en desarrollo y los más importante, he podido experimentar todo el proceso que conlleva la fabricación de un producto.

Este TFG, no solo me ha proporcionado un conocimiento profundo de esta tecnología, sino que también me ha permitido desarrollar competencias técnicas y analíticas que serán de gran valor en mi futura carrera profesional.

Capítulo 7. Bibliografía

3Dnatives. (14 de 1 de 2023). *Impresión 3D FDM o modelado por deposición fundida*. Obtenido de 3Dnatives: https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/#!

ABAX. (s.f.). *La historia de la impresora 3D: los orígenes de las primeras máquinas*. Obtenido de https://abax3dtech.com/2020/07/24/historia-de-la-impresora-3d/

additive-x. (s.f.). *Cómo imprimir engranajes en 3D como un profesional*. Obtenido de https://www.additive-x.com/blog/how-to-3d-print-gears-like-a-pro-7-design-tips-and-advice/

ALL3DP. (2024). *Tipos de impresoras 3D*. Obtenido de https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/

Angis. (s.f.). *Engranajes: definición, tipos y aplicaciones*. Obtenido de https://angis.es/engranajes-definicion-aplicaciones/

Ansys. (s.f.). Obtenido de https://www.ansys.com/

BITFAB. (2024). *La Historia de la impresión 3D*. Obtenido de https://bitfab.io/es/blog/historia-impresion-3d/

bitlaf. (s.f.). Obtenido de https://bitfab.io/es/blog/fabricacion-aditiva/

Capa sobre capa. (s.f.). *¿Qué parámetros afectan a la calidad de la impresión 3D?* Obtenido de https://capasobrecapa.com/parametros-calidad-fdm/

capasobrecapa. (s.f.). *¿Que materiales existen para imprimir en FDM?* Obtenido de https://capasobrecapa.com/materiales-fdm/

Chil-Chyuan Kuo, *. D.-Y.-C.-F. (2021). *Characterizations of polymer gears fabricated by differential pressure vacuum casting and fused deposition modeling.* . Obtenido de https://doi.org/10.3390/polym13234126

Dassault Sistemes. (s.f.). *Los principales retos de la fabricación aditiva y cómo superarlos*. Obtenido de https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/top-challenges-additive-manufacturing-and-how-overcome-them

Dr. Touhid Alam Ansari, K. K. (2018). *Análisis de daños por fatiga de compuestos.* journal of REINFORCED PLASTICS & COMPOSITES.

El rincón del badget. (s.f.). *IMPRESIÓN 3D: TRANSFORMANDO EL PRESENTE Y EL FUTURO DE LA FABRICACIÓN*. Obtenido de EL RINCÓN DEL BADGET:

https://elrincondelgadget.es/impresion-3d-transformando-el-presente-y-el-futuro-de-la-fabricacion

Ezzeddine Ftoutou, L. A. (2024). *Comportamiento de fatiga por flexión de productos fabricados con aditivos polimeros PLA.* Obtenido de MDPI: https://www.mdpi.com/journal/materials

Formlabs. (s.f.). *Guía de impresión 3D por sinterizado selectivo por láser (SLS)*. Obtenido de https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/

Haykel Marouani, L. A. (s.f.). *Comportamiento de fatiga por flexion de productos fabricados con aditivos .*

InfoCNC. (s.f.). *Guía básica de impresión 3D: Parte 1 – Fundamentos de la impresora 3D*. Obtenido de https://infocnc.net/guia-basica-de-impresion-3d-parte-1-fundamentos-de-la-impresora-3d/

Ingemecánica. (s.f.). *Fundamentos de las Transmisiones por Engranajes*. Obtenido de https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn150.html

Ingenierizando. (s.f.). Obtenido de https://www.ingenierizando.com/maquinas-y-mecanismos/tipos-de-engranajes/

Laboratorios 3D. (s.f.). Obtenido de https://laboratorios3d.es/blog/fabricacion-aditiva-beneficios-procesos-aplicaciones/

mentira, J. (s.f.). *Fabricación de engranajes: definición, procesos y materiales*. Obtenido de Precisión Runsom: https://www.runsom.com/es/technology/guide-to-gear-manufacturing/#materials-available-for-gear-manufacturing

Mintforpeople. (8 de 8 de 2022). *¿Qué aplicaciones tiene la Fabricación aditiva?* Obtenido de https://mintforpeople.com/noticias/que-aplicaciones-tiene-fabricacion-aditiva/

polaridad. (s.f.). *Las propiedades mecánicas de los materiales: fundamentos y aplicaciones*. Obtenido de https://polaridad.es/propiedad-mecanica-de-los-materiales/

Polaridad.es. (s.f.). *Las propiedades mecánicas de los materiales: fundamentos y aplicaciones*. Obtenido de https://polaridad.es/propiedad-mecanica-de-los-materiales/

Seol Kyeong-su, S. B.-c. (2018). *Prueba a fatiga de piezas de ABS impresas en 3D, Modelado de deposición.*

zwick Roell. (s.f.). *ISO 527-1 e ISO 527-2 ensayo de tracción plástico*. Obtenido de https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/ensayo-de-traccion-iso-527-1-2/#c218