



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

“Rediseño, validación y fabricación de una biela ligera de bicicleta con el empleo de tecnologías de fabricación aditiva”

MEMORIA PRESENTADA POR:

D. Raúl Pérez Pradillos

TUTOR/A:

Dr. Rafael Antonio Balart Gimeno

D. Juan Ivorra Martínez

GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESUMEN

“Rediseño, validación y fabricación de una biela ligera de bicicleta con el empleo de tecnologías de fabricación aditiva”

Este trabajo de final de grado explora las posibilidades de las tecnologías de fabricación aditiva para la realización de piezas tradicionalmente realizadas en materiales metálicos. Por ello, se plantea el rediseño de una biela de bicicleta. En este rediseño se va a tener en cuenta la fabricación personalizada mediante tecnologías aditivas con polímeros técnicos, no solo a nivel de prototipo, sino en la obtención de una pieza completamente funcional. El proyecto también aborda la validación FEM (“*finite element method*”) y posterior fabricación de la biela con materiales técnicos mediante el empleo de las tecnologías de fabricación aditiva más avanzadas. Este TFG tiene un enfoque multidisciplinar que cubre diversas competencias incluidas en el Grado de Ingeniería Mecánica; estudio del estado del arte, prediseño del prototipo de partida, definición de estados tensionales e hipótesis de carga, rediseño con materiales alternativos, validación estructural mediante FEM, estudio de costes y la fabricación de la pieza final.

SUMMARY

“Redesign, validation and manufacture of a lightweight bicycle crank with the use of additive manufacturing technologies”

This final degree project explores the possibilities of additive manufacturing technologies for the realization of pieces traditionally made of metallic materials. For this reason, the redesign of a bicycle crank is proposed. In this redesign, personalized manufacturing using additive technologies with technical polymers will be taken into account, not only at the prototype level, but also in obtaining a fully functional part. The project also addresses the FEM (finite element method) validation and subsequent manufacturing of the connecting rod with technical materials using the most advanced additive manufacturing technologies. This TFG has a multidisciplinary approach that covers various competencies included in the Degree in Mechanical Engineering; study of the state of the art, pre-design of the starting prototype, definition of stress states and load hypotheses, redesign with alternative materials, structural validation by FEM, cost study and manufacture of the final piece.

RESUM

“Redisseny, validació i fabricació d'una biela lleugera de bicicleta amb l'ocupació de tecnologies de fabricació aditiva”

Aquest treball de final de grau explora les possibilitats de les tecnologies de fabricació additiva per a la realització de peces tradicionalment realitzades en materials metal·lics. Per això, es planteja el redisseny d'una biela de bicicleta. En aquest redisseny es va a tindre en compte la fabricació personalitzada per mitjà de tecnologies additives amb polímers tècnics, no sols a nivell de prototip, sinó en l'obtenció d'una peça completament funcional. El projecte també aborda la validació FEM (finite element method) i posterior fabricació de la biela amb materials tècnics per mitjà de l'ocupació de les tecnologies de fabricació additiva més avançades. Aquest TFG té un enfocament multidisciplinari que cobrix diverses competències incloses en el Grau d'Enginyeria Mecànica; estudi de l'estat de l'art, predisseny del prototip de partida, definició d'estats tensionals i hipòtesi de càrrega, redisseny amb materials alternatius, validació estructural per mitjà de FEM, estudi de costos i la fabricació de la peça final.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	3
SUMMARY	5
RESUM.....	7
ABREVIATURAS.....	13
LISTADO DE FIGURAS	15
LISTADO DE TABLAS.....	19
I. INTRODUCCIÓN.....	21
I.1.La bicicleta.	23
I.1.1. Breve historia de la bicicleta.	23
1.1.2. Tipos de bicicleta.	26
1.1.2.1. Bicicletas de paseo.	26
1.1.2.2. Bicicletas deportivas.	26
I.1.3. Partes de la bicicleta.....	27
I.1.4. Sistemas de transmisión de la bicicleta.	28
I.2. La biela.....	30
I.2.1 Características diferenciadoras de las bielas.	31
I.2.1.1 Anclaje al pedalier.....	31
I.2.1.2 Anclaje a los platos.....	31
I.2.1.3 Longitud de las bielas.....	32
I.2.1.4 Curvatura de las bielas.....	33
I.2.1.5 Diámetro de las roscas de los pedales.	34
I.2.2 Materiales típicos para fabricación de bielas.....	35

I.2.3 Métodos de fabricación convencionales de las bielas.....	36
I.3 Biomecánica de la pedalada.....	37
I.3.1 Esfuerzos en la biela.....	37
I.3.2 Estudio con potenciómetro.....	39
I.4 Fabricación aditiva.	41
I.4.1 Breve historia de la fabricación aditiva.....	42
I.4.2. Tipos de fabricación aditiva.....	43
I.4.3. Usos de la fabricación aditiva.....	44
I.4.4. Impresión 3D con materiales compuestos.....	46
II. OBJETIVOS.....	49
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	51
II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.	52
III. DESARROLLO DEL PROYECTO	53
III.1. Biela de partida.	55
III.1.1. Obtención del modelo 3D.....	55
III.1.2. Simulación mediante FEM de la biela de partida.	58
<i>III.1.2.1. Definición de cargas.</i>	<i>58</i>
<i>III.1.2.2. Modelo FEM proyecto mallado y material.</i>	<i>60</i>
<i>III.1.2.3. Sujeciones y cargas para análisis de 600N.</i>	<i>61</i>
<i>III.1.2.4. Resultados para análisis de 600N.....</i>	<i>62</i>
<i>III.1.2.4.1 Tensiones Von Mises.....</i>	<i>62</i>
<i>III.1.2.4.2. Desplazamiento</i>	<i>64</i>
<i>III.1.2.4.3. Factor de seguridad.</i>	<i>65</i>
<i>III.1.2.5. Sujeciones y cargas para el análisis de 1472 N.</i>	<i>66</i>
<i>III.1.2.6. Resultados para análisis de 1472 N.....</i>	<i>67</i>

III.1.2.6.1 Tensiones Von Mises.....	67
III.1.2.6.2. Desplazamiento	69
III.1.2.6.3. Factor de seguridad.	70
III.2. Estudio con materiales alternativos de fabricación.	72
III.2.1. Materiales disponibles.....	72
III.2.2. Simulación mediante FEM de la biela de partida con materiales disponibles.	76
III.3. Rediseño y estudio de la biela de partida.....	80
III.3.1. Rediseño.....	80
III.3.2. Simulación mediante FEM de biela rediseñada.	81
III.4. Estudio de la biela con materiales compuestos.	86
III.4.1. Obtención de las propiedades mecánicas del material compuesto..	86
III.4.2. Simulación mediante FEM de biela rediseñada con material compuesto.	90
III.5. Diseño final de la biela.	94
III.5.1. Diseño N°1.....	94
III.5.1. Diseño N°2.....	96
III.5.3. Diseño N°3.....	98
III.5.4. Diseño N°4.....	100
III.5.5. Análisis de los resultados.....	102
III.6. Fabricación.....	104
III.7. Estudio económico.	107
III.8. Conclusiones.	109
IV. APÉNDICES	112
IV.1. Planos acotados.....	114

IV.2. Bibliografía y referencias.....	115
--	------------

ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
BMX	<i>Bicycle Motocross</i>
DLMD	<i>Direct laser material deposition</i>
E_x	Módulo elástico en la dirección x
E_y	Módulo elástico en la dirección y
FDM	<i>Fused deposition modelling</i>
FEM	Método de los elementos finitos
G_{xy}	Módulo de rigidez
PLA	Ácido poliláctico
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective laser melting</i>

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de una bicicleta típica de carretera. https://www.santafixie.com/bicicletas/comprar-bicicleta-fixie.html	23
Figura 2. Representación artística de la bicicleta de Carl von Drais von Sauerbronn. http://maryluzsalmerlabicicleta.blogspot.com/2012/08/historia-de-la-bicicleta.html	24
Figura 3. Representación artística de la bicicleta de 1861 de Pierre Michaux. https://sites.google.com/site/labicicletadesdesuinicio/bicicleta-con-pedales-pierre-michaux	25
Figura 4. Representación artística de la primera bicicleta moderna “Rover” de 1885 de John Starley Kemp. https://www.timetoast.com/timelines/bicicleta-0ff365f0-fc42-4f11-91e3-9ebb081f3e77	25
Figura 5. Bicicleta deportiva del tipo montaña o MTB de la marca Conor. http://revistabici.blogspot.com/2015/08/es-la-conor-5400-la-mtb-con-mejor.html	27
Figura 6. Partes de una bicicleta de montaña. https://noticiasmtb.com/partes-basicas-de-una-bicicleta/	27
Figura 7. Bielas, pedalier y plato típicos de una bicicleta de montaña. https://www.bikeshop.es/pedalier-8v-sram-s600-3-0-22-32-42/107360.html	30
Figura 8. Anclaje de biela a plato con araña de 5 brazos. https://www.bikester.es/fsa-sl-k-modular-adventure-386evo-bielas-48-32-dientes-negro-793867.html	32
Figura 9. Anclaje de biela a plato con araña en cruz. https://www.deporvillage.com/bielas-shimano-zee-10v-170-plato-36-68-73-mm	32
Figura 10. A la izquierda tabla de longitudes de biela según la altura del ciclista y a la derecha tabla de longitudes según la altura de entrepierna. http://www.triatlonrosario.com/2009/04/longitud-de-biela-ideal-para-cada.html ...	33
Figura 11. Factor Q de las bielas. https://g-se.com/factor-q-bp-p57cfb26db9041	34

Figura 12. Diagrama de fuerzas descompuestas aplicadas sobre la biela. https://www.zikloland.com/eficiencia-pedaleo-maximo-partido-potenciometro/	37
Figura 13. Diagrama de situación de máxima eficiencia en la pedaleada. https://www.zikloland.com/eficiencia-pedaleo-maximo-partido-potenciometro/	38
Figura 14. Resultados potenciómetro. https://www.zikloland.com/eficiencia-pedaleo-maximo-partido-potenciometro/	39
Figura 15 . Gráfico que muestra la potencia en función del ángulo de la biela. https://www.zikloland.com/eficiencia-pedaleo-maximo-partido-potenciometro/	40
Figura 16. Impresora 3D de la marca Markforged. https://www.3dz.es/products/mark-two-3dz/	44
Figura 17. Antebrazo y mano ortopédicos realizados mediante impresión 3D. https://sevillaworld.com/una-estetica-funcional/	45
Figura 18. Piezas impresas con matriz polimérica y diferentes. fibras https://tecsol3d.com/es/impresion-3d-con-refuerzo-de-fibra-de-carbono/	47
Figura 19. Biela de la marca Shimano modelo FC-M442/443.....	55
Figura 20. Primera revolución y extrusiones del anclaje del pedalier.	56
Figura 21. Cuerpo de la biela formado mediante la función spline.	56
Figura 22. Diagrama de la fuerza aplicada en la biela.	58
Figura 23. Mallado del modelo.....	60
Figura 24. Fijación y carga de 600 N.....	61
Figura 25. Tensiones Von Mises con carga 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela.	62
Figura 26. Vista en detalle del eje del pedalier con carga de 600 N.	63
Figura 27. Desplazamientos con carga de 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela.	64
Figura 28. Factor de seguridad con carga de 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela.	65
Figura 29. Fijación y carga de 1472 N.....	66

Figura 30. Tensiones Von Mises con carga 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.....	67
Figura 31. Vista en detalle del eje del pedalier con carga de 1472 N.	68
Figura 32. Desplazamientos con carga de 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.....	69
Figura 33. Factor de seguridad con carga de 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.....	70
Figura 34. Vista trasera de la biela con factor de seguridad con carga de 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.	71
Figura 35. Vista trasera de la biela con factor de seguridad con carga de 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.	71
Figura 36. Propiedades mecánicas del Onyx.....	73
Figura 37. Propiedades mecánicas del Onyx FR y Onyx ESD en comparación al Onyx.	74
Figura 38. Propiedades mecánicas del Nylon.	75
Figura 39. Definición de propiedades mecánicas del Onyx en SolidWorks.	76
Figura 40. Tensiones Von Mises con carga 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela aplicando material Onyx.	77
Figura 41. Tensiones Von Mises con carga 1472 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela aplicando material Onyx.	78
Figura 42. Deformaciones con carga 1472 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela aplicando material Onyx.....	78
Figura 43. Rediseño de biela.	80
Figura 44. Rediseño de la biela.	81
Figura 45. Tensiones Von Mises en biela de Onyx ESD con carga de 1472 N en la zona del pedalier.....	83
Figura 46. Tensiones Von Mises en biela de Onyx ESD con carga de 1472 N en la zona del pedalier con las mejoras en esta zona incorporadas.	84
Figura 47: Propiedades mecánicas de la fibra de carbono.....	87

Figura 48. Introducción de los datos de ambos materiales en el software.....	88
Figura 49. Disposición y grosores de las capas del material compuesto.....	88
Figura 50. Tensiones Von Mises en biela de Onyx ESD con fibra de carbono con carga de 600 N.	90
Figura 51. Deformaciones en la biela rediseñada con carga de 600 N.....	91
Figura 52. Deformaciones unitarias en la biela rediseñada con carga de 600N.	92
Figura 53. Diseño N.º 1.	94
Figura 54. Diseño N.º 1.	95
Figura 55. Diseño N.º 2.	96
Figura 56. Diseño N.º 2.	97
Figura 57. Diseño N.º 3.	98
Figura 58. Diseño N.º 3.	99
Figura 59. Diseño N.º 4.	100
Figura 60. Diseño N.º 4.	101
Figura 61. Pieza a trabajar cargada dentro del software e introducción de datos iniciales.	104
Figura 62. Vista de la disposición de las fibras a -45°	105
Figura 63. Datos técnicos de la impresión y vista de la pieza en la cama de la impresora.	106

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas de materiales empleados en la fabricación de bielas..	36
Tabla 2. Comparativa de distintas posibilidades de cadencia y fuerza para una misma potencia.....	59
Tabla 3. Fuerza más desfavorable aplicada en la biela.	59
Tabla 4. Resultado análisis estático 600N.	79
Tabla 5. Resultado análisis estático 1472 N.	79
Tabla 6. Resultados análisis estático 600 N con biela rediseñada.....	82
Tabla 7. Resultados análisis estático 600 N con biela rediseñada.....	82
Tabla 8. Constantes ingenieriles obtenidas del software ElamX.	89
Tabla 9. Resultados del análisis estático de 1472 N sobre el rediseño de la biela con material compuesto.....	92
Tabla 10. Resultados análisis 600 N.	102
Tabla 11. Resultados análisis 1472 N.	102
Tabla 12. Estudio económico por pieza producida.	108

I. INTRODUCCIÓN

I.1.La bicicleta.

La bicicleta se define como un medio de transporte terrestre el cual es impulsado por el esfuerzo humano. La propia palabra bicicleta proviene del antiguo latín y se descompone en “bi” que se define como dos, y “cyclos” lo cual quiere decir rueda. Esta posee dos ruedas normalmente del mismo diámetro y es impulsada por la transmisión de fuerza de los pedales a la rueda trasera mediante un sistema de piñón, cadena y plato. La dirección y frenos son controlados desde la parte del manillar por el conductor. En la **Figura 1** se observa una bicicleta típica de carretera.



Figura 1: Imagen de una bicicleta típica de carretera.

I.1.1. Breve historia de la bicicleta.

Ya en el siglo XV Leonardo da Vinci dibujó lo que para muchos se considera la primera bicicleta, aunque nada tiene que ver como se conocen estas a día de hoy, ya que carecía de dirección y la tracción era llevada a cabo mediante poleas.

La primera bicicleta tal y como se conoce hoy en día apareció en el siglo XIX, allá por el año 1818 cuando el alemán Carl von Drais von Sauerbronn patentó una máquina

de correr llamada *vélocipède* (**Figura 2**). Este artilugio se impulsaba con los pies, ya que no contaba con pedales y la dirección era muy rudimentaria.



Figura 2: Representación artística de la bicicleta de Carl von Drais von Sauerbronn.

Fue allá por el 1839 cuando el escocés Kirkpatrick MacMillan mejoró el diseño de von Drais añadiéndole pedales. Las ruedas eran muy peculiares ya que estas eran de madera y desiguales entre sí, siendo la rueda delantera más pequeña que la trasera.

En el año 1861 Pierre Michaux patentó los pedales en la rueda delantera, hecho por el que se le conoce como precursor de la bicicleta. En la **Figura 3** se puede apreciar esto. Este invento popularizó las bicicletas en Francia provocando que se empezaran a fabricar en serie para la población. Tres años más tarde, en el 1864, James Slater fabricaba la primera bicicleta con transmisión por cadena. James Starley dotó a esta misma rueda con radios metálicos seis años después.

En 1885 John Starley Kemp construyó la primera bicicleta moderna (**Figura 4**). Esta era muy similar a las bicicletas que se conocen hoy en día. Se llamó la bicicleta Rover, la cual era mucho más cómoda, segura, rápida y manejable que los anteriores diseños. Se le llama la primera bicicleta moderna ya que ambas ruedas eran del mismo tamaño, tenía transmisión por cadena, poseía un cuadro romboidal, pedales y bielas, por

lo que se puede decir que Kemp fue el padre de las bicicletas tal y como se conocen hoy en día.

Con la llegada del neumático en 1888 las bicicletas y el ciclismo entraron en una vorágine de esplendor hasta que en 1896 el ciclismo se declaró deporte olímpico.



Figura 3: Representación artística de la bicicleta de 1861 de Pierre Michaux.



Figura 4: Representación artística de la primera bicicleta moderna "Rover" de 1885 de John Starley Kemp.

Ya en el siglo XX pocos son los cambios significativos a los que han sido sometidos las bicicletas. Estos cambios ya son más específicos y para mejorar un tipo de bicicleta concreta para una especialidad concreta, de las cuales se hablarán posteriormente. Un cambio bastante significativo del siglo XXI es la llegada de las bicicletas eléctricas, lo cual revoluciona completamente la visión que se han tenido de estas, ya que la fuente de energía humana se sustituye completamente por un motor eléctrico.

1.1.2. Tipos de bicicleta.

En la actualidad existen muchos tipos de bicicleta, prácticamente un tipo por cada modalidad o submodalidad existente. Esto se debe al desarrollo de nuevas tecnologías, materiales y técnicas que se han ido desarrollando durante todo el siglo XX y XXI. La principal categoría en la que se pueden enmarcar las bicicletas es en paseo y deportivas, dentro de las cuales hay muchos tipos.

1.1.2.1. Bicicletas de paseo.

Estas son muy útiles para las ciudades y pueblos y son las más utilizadas como medio de transporte en vez de instrumento deportivo. La gran mayoría de estas se pueden encontrar en países en vías de desarrollo, ya que es un medio de transporte muy barato y eficaz. Dentro de esta modalidad hay muchos tipos. La más conocida de estas es la bicicleta inglesa y holandesa, las cuales son las más tradicionales y las que mejor conservan el diseño de la bicicleta Rover de Kemp. También encontramos bicicletas tipo playeras, eléctricas y plegables.

1.1.2.2. Bicicletas deportivas.

Las bicicletas deportivas son las que se utilizan con fines deportivos o de recreo deportivo. Dentro de esta modalidad encontramos diferentes tipos de bicicleta como las bicicletas de montaña, las *cross country*, las *all mountain*, las *down hill*, las *e-bike* de montaña, las bicicletas de pista, las de carretera o las *BMX*.

Profundizando más en el tema de las bicicletas deportivas, las bicicletas de montaña o *mountain bike* son bicicletas pensadas y diseñadas para viajes por terrenos montañosos. Estas bicicletas cuentan normalmente con suspensión en la horquilla o incluso doble suspensión en la horquilla y debajo del sillín (Figura 5). Las ruedas suelen ser de perfil grueso para poder recorrer diferentes tipos de terreno. Dado que son bicicletas pensadas para rodar por todo tipo de terreno se suelen construir de materiales rígidos que soporten todo tipo de inclemencias.



Figura 5: Bicicleta deportiva del tipo montaña o *MTB* de la marca Conor.

I.1.3. Partes de la bicicleta.

En este caso se van a exponer las partes de una bicicleta de montaña, ya que es el tipo de bicicleta más común entre la gente. La *MTB* o bicicleta de montaña se compone



Figura 6: Partes de una bicicleta de montaña.

de varias partes principales que a su vez se descomponen en diferentes piezas que conforman estas. Estas partes son el sillín, las ruedas, los frenos, el cuadro, la horquilla, el manillar y el sistema de transmisión. En la **Figura 6** se observan todas las partes perfectamente nombradas.

La parte que más interesa en este estudio es la biela, la cual se engloba en el sistema de transmisión de la bicicleta. Este sistema se encarga de transmitir la fuerza de las piernas del ciclista a las ruedas motrices. La biela se encarga de conectar el pedal al plato de la bicicleta, lo cual proporciona una amplitud de movimiento para que el propio pedaleo pueda existir.

I.1.4. Sistemas de transmisión de la bicicleta.

Se define como transmisión en la bicicleta como el transmisor de la fuerza ejercida por el ciclista al piñón de la rueda trasera. Existen formas de llevar esta fuerza de la pierna del ciclista a la rueda trasera muy diversas, sin embargo, se van a mencionar las 3 formas más utilizadas: la transmisión por cadenas, la transmisión a correa y la transmisión Cárden.

La transmisión por cadenas es la forma de transmisión más utilizada y extendida por todas las marcas de bicicleta, ya sea para bicicletas de paseo o para las bicicletas deportivas para las más altas exigencias. Esta consiste en una cadena que une el plato, situado siempre concéntrico al pedalier, y el piñón, concéntrico a la rueda trasera. Se trata del sistema más eficiente de transmisión, ya que tan solo se llega a perder un 1 % de la potencia suministrada por el ciclista. Existen transmisiones por cadenas con diversos platos y piñones para así poder ajustar la fuerza de la pedaleada dependiendo de las circunstancias del terreno, a esto se le conocen como las "marchas" de la bicicleta.

La transmisión por correa es utilizada en bicicletas de tipo urbano y plegables. Al igual que la cadena, la correa está dentro de un plato y un piñón. La ventaja frente a la cadena es el bajo mantenimiento, la resistencia a la climatología adversa y la fácil limpieza. Sin embargo, presenta bastantes desventajas, ya que no se le pueden

incorporar cambios de marchas y tienden a resbalar, por lo que no es nada práctica para bicicletas deportivas.

Por último, la transmisión Cárden consiste en una serie de engranajes enfrentados entre sí con un plato dentado que transmite energía a un engranaje cónico situado concéntrico a la rueda trasera. Es el menos eficiente de los 3 mencionados aquí y el más caro, por lo que su uso es muy restringido. Además, los cuadros tienen que ser completamente adaptados, por lo que poco a poco este sistema de transmisión está destinado a desaparecer.

I.2. La biela.

La biela de la bicicleta es el elemento que transmite la fuerza desde los pedales hasta el plato para poder mover la cadena que, a su vez, mueve los piñones que ponen en marcha a la rueda. Siempre existen dos bielas, una para cada pedal y cada pie, como es lógico. Se sitúan a 180 grados la una de la otra conectándose ambas por el eje del pedalier. En la **Figura 7** se observa la biela junto a las partes donde se unen.

Las bielas varían en longitud dependiendo del propio ciclista o del tipo de ciclismo que se esté practicando. La longitud de esta se mide desde el centro del eje del pedalier hasta el centro del eje donde va situado el pedal. Normalmente las longitudes varían desde los 165 mm hasta los 180 mm con incrementos cada 2.5 mm. Comúnmente las bielas más utilizadas y extendidas son las de 170 mm. En los siguientes apartados se estudiará que tamaño es el indicado según el ciclista y el tipo de ciclismo que se practique.

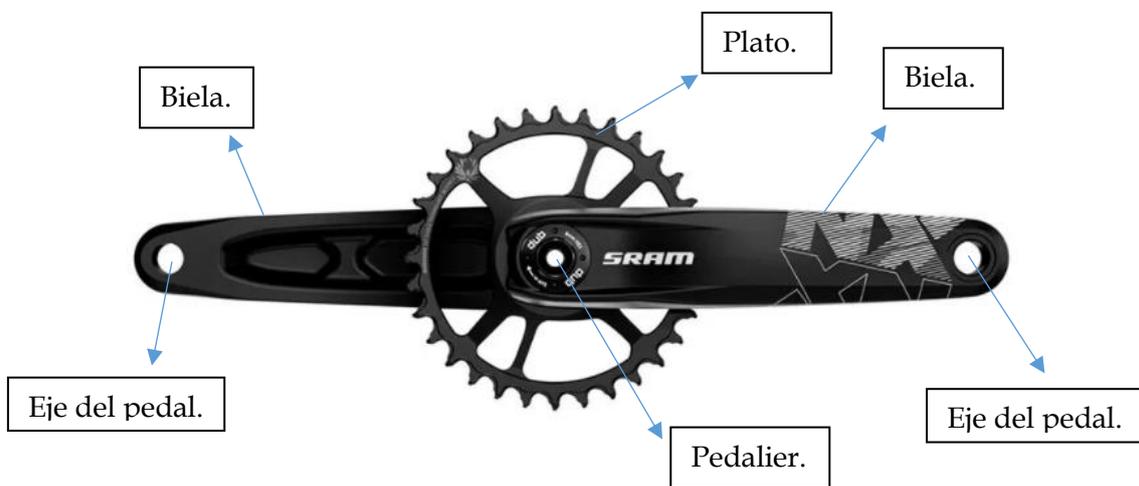


Figura 7: Bielas, pedalier y plato típicos de una bicicleta de montaña.

I.2.1 Características diferenciadoras de las bielas.

Hay muchas características que hacen diferenciar las bielas las cuales van desde su tamaño hasta el tipo de anclaje. A continuación, se van a presentar brevemente todas ellas para poder hacer un estudio exhaustivo.

I.2.1.1 Anclaje al pedalier.

Depende del tipo de eje del pedalier que la bicicleta disponga, se podrán montar un tipo de biela u otro. Por ejemplo, si el pedalier es de tipo roscado se tendrán que instalar bielas de este tipo, las cuales irán independientes de los platos y se tendrán que anclar mediante tornillos al pedalier. Por otro lado, existen las bielas donde la que va situada en la parte derecha, que es la que acopla al plato, va directamente cogida al pedalier. Por lo tanto, estas irán en función al pedalier. También existen otro tipo de bielas en las cuales el pedalier va pegado directamente a la biela izquierda, es decir, de la parte contraria al plato.

I.2.1.2 Anclaje a los platos.

Dependiendo del tipo de bicicleta que se utilice o el tipo de ciclismo que se quiera practicar, encontramos varios tipos de platos. Se encuentran bicicletas monoplato, de dos platos o de tres platos. Esto permitirá poder tener más "marchas" o velocidades y poder ir más cómodos por subidas y bajadas jugando con platos y piñones.

También dependiendo del tipo de bicicleta se pueden encontrar diferentes configuraciones por lo que respecta al anclaje de las bielas a los platos. Normalmente las bielas llevan una "araña", que son los brazos que anclan la biela. Hay varios tipos de araña, desde los anclajes en cruz (**Figura 9**), en aspa, con tornillos, hasta los que llevan 5 brazos (**Figura 8**). También se encuentran sistemas directos que no cuentan con araña y el plato o los platos van anclados al pedalier, aunque es menos típico.



Figura 8: Anclaje de biela a plato con araña de 5 brazos.



Figura 9: Anclaje de biela a plato con araña en cruz.

I.2.1.3 Longitud de las bielas.

Como se mencionó anteriormente, existen varias longitudes para las bielas. Esto afecta en gran medida a la pedaleada que el ciclista puede dar, ya que contra más larga sea la biela mayor momento se va a aplicar con la misma fuerza y por lo tanto más se va a avanzar con menos esfuerzo físico. Por el contrario, no se pueden tener bielas excesivamente grandes ya que esto acarrea una serie de problemas. Estos van desde la reducción de cadencia, lo que supone que el ciclista pueda transmitir menos rpm, hasta tener un accidente, ya que al ser más larga la biela el pie del ciclista se encontrará más cerca del suelo, por lo que podría tocar este y tener una caída.

Normalmente se utilizan dos tipos de tablas para elegir correctamente la longitud de la biela. Dependiendo de la longitud de la entrepierna, que es la distancia del suelo hasta donde acaban las piernas y empieza la entrepierna del ciclista, o la altura del ciclista se obtienen los datos de la **Figura 10**.

Talla	Longitud Biela
< Menos de 152 cm	160 mm
Entre 152 y 168 cm	Entre 165 y 167,5 mm
Entre 168 y 183 cm	170 mm
Entre 183 y 189 cm	172,5 mm
Entre 189 y 195 cm	175 mm
Más de 195 cm	Entre 180 y 185 mm

Longitud de entrepierna (cm.)	Longitud de biela (mm.)
35-36-37	132,5
38-39-40	135
41-42-43	137,5
44-45-46	140
47-48-49	142,5
50-51-52	145
53-54-55	147,5
56-57-58	150
59-60-61	152,5
62-63-64	155
65-66-67	157,5
68-69-70	160
71-72-73	162,5
74-75-76	165
77-78-79	167,5
80-81-82-83*	170
83-84-85-86*	172,5
86-87-88-89	175
90-91-92-93	177,5

Figura 10: A la izquierda tabla de longitudes de biela según la altura del ciclista y a la derecha tabla de longitudes según la altura de entrepierna.

Aunque estos son los valores más estandarizados por todos los fabricantes, la mejor forma de encontrar la longitud de biela que mejor se adapta al ciclista es realizar un estudio biomecánico. Este busca estudiar de forma exhaustiva y exacta las condiciones fisiológicas de la persona y adaptar la mecánica de la bicicleta a estas, para que se encuentren en equilibrio y poder tener el rendimiento máximo en la bicicleta. De esta manera se encontrará no solo el tamaño de biela exacto que se adapte al cuerpo del ciclista, sino otros muchos factores como la altura del sillín, del manillar, el tamaño de rueda, etc.

I.2.1.4 Curvatura de las bielas.

La curvatura de las bielas tiene como función mejorar el "Factor Q" intentando mantener las piernas lo más paralelas posibles. El Factor Q es la medida que hay entre la parte exterior de las roscas de los pedales (**Figura 11**). Para que este factor sea óptimo debe tener la misma longitud que las crestas ilíacas de la cadera del ciclista.



Figura 11: Factor Q de las bielas.

Por lo tanto, dependiendo el tipo de curvatura que posea una biela será óptimo para el ciclista o no, según su anatomía. También afecta a este factor el grosor de las mismas y la distancia que tengan de la parte más externa al anclaje con el pedalier.

I.2.1.5 Diámetro de las roscas de los pedales.

Los pedales de las bicicletas se diferencian por derecho e izquierdo, lo que quiere decir que enroscan a la biela de forma distinta uno del otro. El derecho rosca siempre en sentido normal o horario y el izquierdo antihorario. Hay tres tipos de roscas comúnmente utilizadas. La rosca americana (ISO) que mide $\frac{1}{2} \times 20$ hilos por pulgada de rosca, la rosca inglesa (BSA) que mide $\frac{9}{16} \times 20$ TPI y tiene 14,3 mm de diámetro de rosca y la francesa que se diferencia de la inglesa únicamente en que el paso de la rosca es inferior a 14 mm.

Normalmente en la mayoría de las bicicletas modernas de hoy en día se encuentra la rosca americana, o métrica siendo la menos típica o ya prácticamente en desuso la rosca inglesa y la francesa.

I.2.2 Materiales típicos para fabricación de bielas.

Las bielas están fabricadas de diversos tipos de materiales, dependiendo del tipo de ciclismo que se practique, del presupuesto del comprador o de las características que se quieran obtener.

El material más usado en las bielas es el acero inoxidable 316. Este presenta un beneficio económico muy claro contra sus contrincantes, además de ser altamente resistente y de fácil reparación y fabricación. La desventaja de este es su alta densidad.

El aluminio también es muy empleado en la fabricación de bielas, siendo un material muy ligero y resistente. También es un material muy fácil y barato de manipular. Tiene una resistencia muy buena a la corrosión, pero, por el contrario, la durabilidad no es su fuerte, ya que es más fácil de rallar y abollar. Normalmente se utilizan aleaciones de aluminio para hacerlo más resistente, como por ejemplo el aluminio 2014, muy utilizado en el ciclismo profesional y en la aviación.

El titanio, por su parte tiene una relación de ligereza y rigidez bastante mayor a los materiales mencionados anteriormente. Sin embargo, es altamente difícil de manipular y muy caro. Al igual que el aluminio, se utiliza en aleaciones para poder abaratar costes sin modificar demasiado las características mecánicas.

Por último, la fibra de carbono es la opción más cara, pero con mejor calidad técnica. Su densidad es muy baja pese a que su resistencia mecánica es elevada. No tiene el inconveniente de los metales de degradarse con la corrosión provocada por la humedad y es muy resistente a cambios de temperatura.

A continuación, en la **Tabla 1**, se muestran las características mecánicas de los distintos materiales mencionados anteriormente.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de materiales empleados en la fabricación de bielas.

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Límite elástico (N/mm ²)
Acero Inox. 316	8,02	200000	170
Titanio	4,51	110000	140
Aluminio 2014	2,8	73000	430
Fibra de carbono	1,75	70000	2400

I.2.3 Métodos de fabricación convencionales de las bielas.

Según el material del que se fabrique la biela existen diversos tipos de métodos de fabricación para estas.

Tanto para el aluminio, el acero o el titanio se utiliza la fabricación por fundición o moldeo. Esta técnica consiste en llevar al metal o la aleación metálica hasta el punto de fusión y posteriormente introducirlo en un molde con la forma deseada. Evidentemente después de esto las bielas son sometidas a un proceso de mecanizado para terminar las zonas y formas que no consigue dar el molde de la fundición. Entre otras cosas, este mecanizado realiza las roscas para el alojamiento de los pedales, la forma del alojamiento del pedalier para que este encaje a la perfección y formas de vaciado para darle estética o resistencia.

Por otra parte, el proceso para fabricar bielas en fibra de carbono es bastante más complejo que el anterior. El proceso es también por moldeo, más conocido como molde y contra molde o *RTM* por sus siglas en inglés. Para la realización de este proceso son necesarios sendos moldes que encajen perfectamente. Se van depositando las fibras sobre este con direcciones deseadas para conseguir más rigidez o más elasticidad, dependiendo del uso que se le vaya a dar a la biela. Una vez esto, se cierra el molde para poder conseguir un vacío y se hace pasar la resina, que es la matriz, para que infusione con las fibras. Se deja reposar unas horas y cuando se seca se obtiene la biela. Al igual que en el otro proceso, será necesario un post-mecanizado para darle forma a las partes que no se pueden conseguir con este proceso, como las roscas.

I.3 Biomecánica de la pedalada.

I.3.1 Esfuerzos en la biela.

Al final, y sobre todo los profesionales del ciclismo, lo que principalmente buscan es tener la pedaleada más eficiente que su cuerpo les permita. Por lo tanto, se busca optimizar fuerzas, direcciones y revoluciones para conseguir el mayor empuje posible con el mismo esfuerzo.

En primer lugar, para calcular la potencia de la pedaleada se necesita saber que esfuerzo se está aplicando sobre los pedales y por lo tanto, sobre las bielas, y la cadencia de pedaleo o la velocidad de giro que lleva el ciclista, ω (rad/s). La potencia se define como el torque, que es la fuerza por longitud de biela, por la velocidad de giro.

Las fuerzas que aplica un ciclista sobre la biela son 3. La fuerza total, la fuerza tangencial y la fuerza radial.

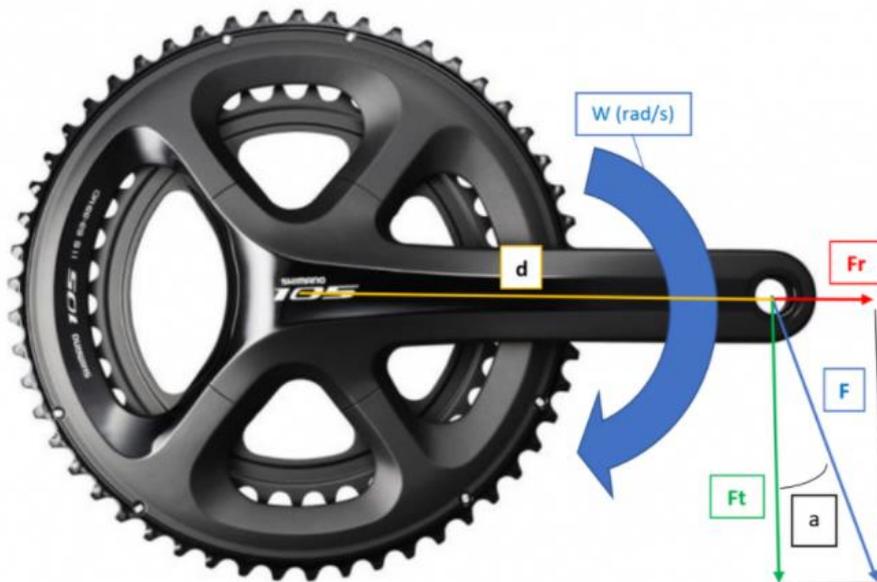


Figura 12: Diagrama de fuerzas descompuestas aplicadas sobre la biela.

En la Figura 12 se observa la fuerza total aplicada sobre la biela "F". La fuerza total viene definida por el ciclista, es decir, la dirección va a depender del giro que dé en el pedal a la hora de realizar el empuje. Por lo que respecta a la fuerza tangencial es esta

la que da el torque, es decir, la que está generando la potencia, mientras que la fuerza radial no generaría ningún esfuerzo eficaz o útil en la pedaleada, ya que le está provocando una fuerza de tracción a la biela. Por lo tanto, una pedaleada eficaz intentará disminuir al máximo la fuerza radial, la cual no produce ningún efecto de empuje y está desperdiciando energía, y maximizar la fuerza tangencial con la cual se obtiene el torque y ayuda a que la bicicleta avance. Una situación de 100% de eficiencia se daría en el caso que se muestra en la **Figura 13**

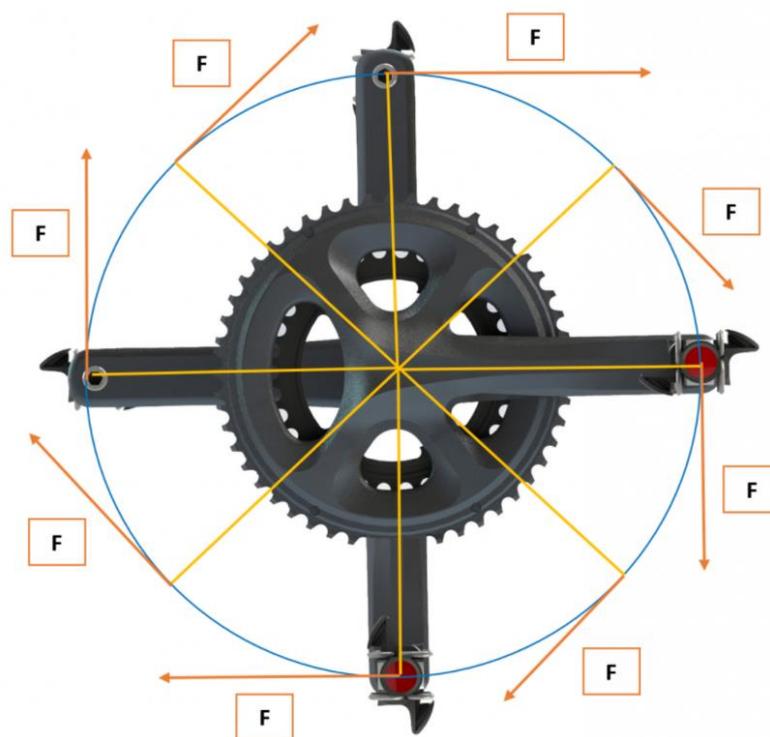


Figura 13: Diagrama de situación de máxima eficiencia en la pedaleada.

De esta forma todo el esfuerzo se iría a la fuerza tangencial, por lo que la eficiencia de la pedaleada sería absoluta. Desgraciadamente esta situación es fisiológicamente imposible, ya que la anatomía humana no permite aplicar una fuerza totalmente tangencial en los 360 grados de giro. Además, la fuerza se aplica en un rango determinado, es decir, el ciclista no aplica fuerza estos 360 grados, sino que cuando el pie está atrás y está subiendo o cargando para poder volver a empezar el ciclo de empuje (de 180° a 0°) avanza únicamente por la inercia que lleva el pedalier y gracias a el otro

pie que está en fase de empuje. A estos ciclos se le llama fase de empuje y fase de retorno, lo cual se va a explicar en los siguientes apartados.

I.3.2 Estudio con potenciómetro.

A continuación, se presenta un estudio del pedaleo monitorizado con un potenciómetro (Figura 14). Este se encarga de medir la potencia en vatios mediante la relación comentada anteriormente de velocidad de giro frente a fuerza. Este aparato se coloca en la parte trasera de la biela y es conectado posteriormente a un ordenador con un *software* especializado, obteniendo estos resultados:

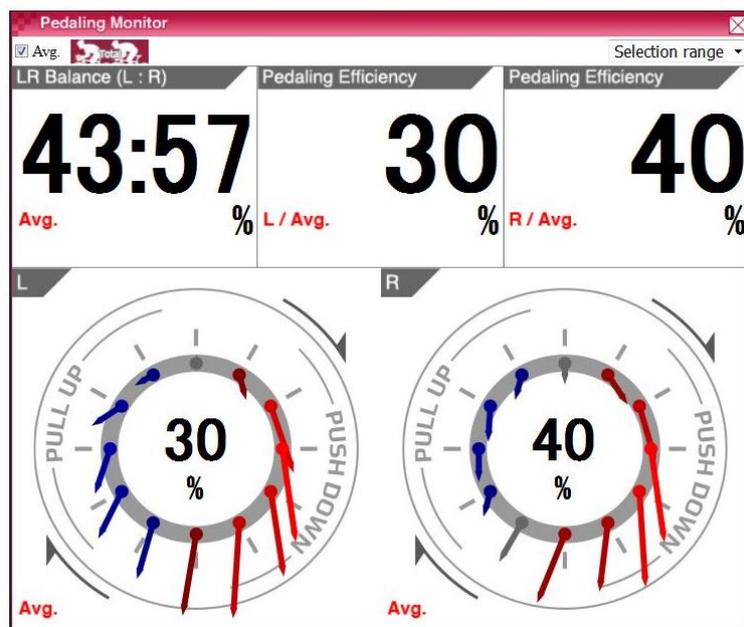


Figura 14: Resultados potenciómetro.

Como se observa la pierna izquierda trabaja a una 30% de eficiencia frente al 40% de la pierna derecha. En la parte de abajo se aprecian los vectores de fuerza que el ciclista está provocando en la biela. Los vectores rojos representan la fuerza total, mientras que los azules representan la fuerza o torque negativos. Este torque negativo no hace sino frenar la pedaleada. El torque negativo se da en la fase de retorno, es decir, en la fase en

el que el ciclista no aplica ninguna fuerza sobre el pedal, tan solo actúa la gravedad negativamente y la propia masa del ciclista, por eso frena a este.

La fase de retorno se da desde los 180° hasta los 360° , mientras que la de empuje y a su vez a favor de la gravedad desde los 0° hasta los 180° . Por lo tanto, se observa que el máximo esfuerzo se da en la fase de empuje a 90° , por lo que cuando la biela esté en esta posición es cuando mayor esfuerzo sufrirá. En la **Figura 15** se muestra un gráfico de la potencia en relación con el ángulo.

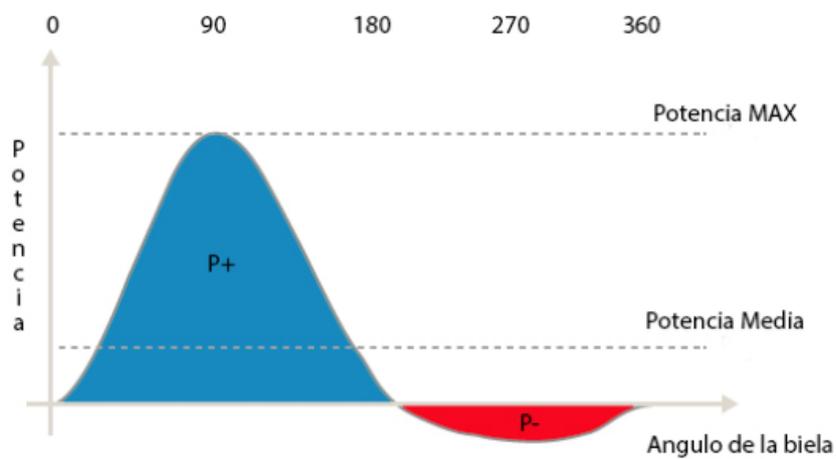


Figura 15 : Gráfico que muestra la potencia en función del ángulo de la biela.

I.4 Fabricación aditiva.

Se entiende como fabricación aditiva las tecnologías que fabrican objetos en 3 dimensiones agregando o depositando capa sobre capa de cualquier material, como hormigón, plástico o metal. En los últimos años, las posibilidades que este sector está proporcionando a todo tipo de industrias está en aumento, siendo así una tecnología que es prácticamente nueva y se encuentra en un continuo desarrollo.

La fabricación aditiva engloba muchas tecnologías, en las cuales se incluyen el *Fused Deposition Modelling (FDM)*, la Estereolitografía (*SLA*), la fusión selectiva de lecho de polvo (*SLM*) y la inyección directa de material (*DLMD*). Se hablará más detalladamente de los tipos en el apartado I.4. 2..

Para poder llevar a cabo este proceso de fabricación solo se necesita un ordenador, un software de diseño o modelado en 3D, un equipo de fabricación aditiva y el material con el que se quiera procesar el objeto o pieza que se esté fabricando. Una vez que se tiene un diseño en formato *CAD*, el equipo de fabricación empieza a fabricar agregando o depositando capa sobre capa del material con el que se esté trabajando, fabricando así un objeto en 3 dimensiones.

Hay muchos motivos por los que utilizar este tipo de tecnología en vez de los procesos tradicionales. Por ejemplo, la creación del prototipo de una pieza, la fabricación de una única pieza, la fabricación de piezas completamente distintas y a medida y la fabricación de piezas extremadamente complejas. Todos estos procesos de fabricación sería prácticamente imposible o inviable realizarlos por métodos tradicionales, sin embargo, las tecnologías de adición presentan grandes ventajas, sobre todo económicas, frente a estos. Se profundizará más en los usos en el apartado I.4. 3., donde se estudiarán los usos más típicos de la fabricación aditiva hoy en día.

I.4.1 Breve historia de la fabricación aditiva.

Hay que remontarse al 1980 para encontrar la primera patente de algo relacionado con la fabricación aditiva. El Dr. Hideo Kodama realizó un prototipo de una máquina que utilizaba tinta de material de fotopolímero que se exponía a la luz ultravioleta para endurecer una pieza. No llegó nunca a llevarlo a cabo, pero sentó las bases de las tecnologías aditivas.

Ya en 1986 Chuck Hull crea un método de impresión 3D por la cual unos láseres hacen que las cadenas moleculares de un polímero modificaran su posición, por lo que es capaz de disponerlas capa a capa de manera selectiva. Al año siguiente, Carl Deckard es capaz de convertir polvo suelto en un sólido mediante un láser.

En 1989 S. Crump patenta un método de fabricación aditiva llamado modelado de deposición fundida. Este método consiste en calentar un filamento de un polímero hasta fundirlo e ir depositándolo en capas para crear un objeto en 3 dimensiones. Mas tarde, Crump es co-fundador de una de las empresas tecnológicas del mundo más importantes, Stratasys.

Un hecho que marcará un antes y un después en las tecnologías de adición es el primer trasplante de vejiga artificial impresa en 3D. Esto tuvo lugar en 1999 cuando se creó la vejiga mediante impresión en una estructura de tipo andamio biodegradable.

Ya en el siglo XX la tecnología de adición se expandió por todo el mundo, aumentando la industria del 3D de forma desmesurada año tras año. Cada vez existen más marcas en el mercado que permiten llevar estas tecnologías prácticamente a todo el mundo. Esta tecnología ya no se usa solo para producir diseños de prototipos, sino que se utilizan para piezas finales para todo tipo de industrias,

I.4.2. Tipos de fabricación aditiva.

Como se mencionó anteriormente, existen varios tipos de fabricación aditiva. Los más utilizados a día de hoy son los siguientes: *Fused Deposition Modelling (FDM)*, la *Stereolithography (SLA)*, la *selective laser melting (SLM)* y la *direct laser material deposition (DLMD)*.

El *Fused Deposition Modelling (FDM)*, lo que significa modelado por deposición fundida, se basa en un cabezal que fusiona un filamento polimérico a la vez que se va desplazando sobre un plano según la forma de la pieza. El material se va depositando capa a capa sobre este plano y va formando la pieza en 3D. Este es el principio de funcionamiento de las impresoras 3D. Su principal atractivo es el bajo coste que requiere esta tecnología y la posibilidad de imprimir con diversos tipos de materiales, incluidos compuestos. En la **Figura 16** se observa una impresora capaz de imprimir un material base o matriz y una fibra de refuerzo entre capa y capa.

La *Stereolithography (SLA)*, estereografía, consiste en la obtención de piezas a partir de resinas líquidas curadas con haces de luz. Los resultados de las piezas son de excelente calidad y precisión. Las piezas en 3D se obtienen mediante capas y capas de las resinas solidificándose al instante gracias a este haz de luz. Normalmente estas piezas se post-procesan con una serie de baños químicos.

La *Selective laser melting (SLM)* o traducido, fusión selectiva por lecho de polvo, consiste en la fusión de capas de polvo selectivamente que se han ido depositado anteriormente. Este proceso se realiza dentro de cámaras previamente calentadas con atmósferas controladas para evitar tanto agentes externos como oxidación. El objeto 3D se obtiene a partir de la fusión capa a capa de este polvo.

Por último, el *Direct laser material deposition (DLMD)*, inyección directa de material, inyecta un material base fundido en un baño también fundido. Este proceso se utiliza también para la reparación de piezas afectadas o para la fabricación de nuevas piezas.



Figura 16: Impresora 3D de la marca Markforged.

I.4.3. Usos de la fabricación aditiva.

Este tipo de fabricación permite crear gran infinidad de piezas de diversos materiales sin la necesidad de las herramientas tradicionales y con unas mínimas limitaciones geométricas. Esto permite que sus usos en la industria sean cada vez mayores, haciéndose así un hueco cada vez más grande en todo tipo de fabricantes.

En medicina se le llama bioimpresión a la fabricación de tejidos vivos por medios de la fabricación aditiva. Este sector ha tenido un gran impacto estos últimos años, ya que es una tecnología que ayuda a salvar vidas gracias a la impresión de células vivas para poder crear órganos para, posteriormente, implementarlos en el paciente de una manera totalmente funcional. También se imprimen prótesis, ya que esta tecnología permite una gran variedad de tipos de diseños a medida.

En la automoción la fabricación aditiva tiene mucho que aportar, ya no solo en la libertad de diseños y geometrías que ofrece, sino también en la reducción de peso de componentes, mejoras mecánicas y económicas. A nivel aeroespacial son muchas las utilidades de estas tecnologías, desde piezas para aviones comerciales, muy importante para la economía de los combustibles y el impacto de este en el medio ambiente, hasta para un simple cuadricóptero.

La fabricación de prototipos es un uso muy importante en este tipo de fabricación. Además, ha sido el tipo que más impacto ha tenido desde la constitución de las tecnologías aditivas. La impresión 3D disminuye los costos de la fabricación tradicional, como por ejemplo de moldes, maquinarias y materiales que ya no son necesarios gracias a esta. Este método permite validar un producto antes de que este sea fabricado en masa y se invierta en materiales y maquinarias para su constitución.

Hoy en día, las industrias permiten niveles de personalización de productos los cuales gracias al uso de la fabricación aditiva son posibles. Un ejemplo muy claro de este uso de la tecnología aditiva es la ortopedia. Cada paciente tiene unas características propias que hacen que cada producto sea distinto al anterior. Es el caso de piernas ortopédicas, brazos, manos... Con las tecnologías aditivas se pueden formar cada una de estas a la medida exacta del paciente, reduciendo así costes que serían muchos más elevados en las tecnologías tradicionales. También se mejora la calidad de vida del paciente, ya que el producto se puede modificar o rehacer hasta que este se encuentre cómodo con él. En la **Figura 17** se puede observar un antebrazo y una mano ortopédicas fabricadas íntegramente con tecnologías aditivas.



Figura 17: Antebrazo y mano ortopédicos realizados mediante impresión 3D.

Por último, mencionar el gran impacto que han tenido estas tecnologías en la creatividad y en la investigación. Son muchas universidades que cuentan con impresoras 3D u otras máquinas de producción aditivas para poder llevar a cabo todo tipo de diseños y prototipos de alumnos e investigadores, lo que es muy importante para el desarrollo del ingenio y el conocimiento en las generaciones presentes, pero sobre todo en las futuras.

I.4.4. Impresión 3D con materiales compuestos.

En los últimos años, los avances de las tecnologías de adición han llevado a que cada vez los materiales con los que se utilizan estas sean más diversos. Desde metales, vidrio hasta incluso tejidos orgánicos como se habló antes o cemento para construir casas enteras. Típicamente estos materiales siempre han sido polímeros termoestables y termoplásticos, lo cual utilizando tan solo estos materiales como podrían ser el PLA o el ABS se obtienen unas propiedades que son bastante pobres en comparación con materiales metálicos o cerámicos.

Es en este punto donde aparecen los materiales compuestos. Los materiales compuestos no son sino materiales formados por la unión de varios de estos para llegar a conseguir una combinación la cual no se obtiene en materiales típicos. Estos nacieron con el objetivo de poder combinar varias propiedades en un solo material, haciendo posibles reducciones de peso, mayor resistencia, mejores durezas, rendimientos mejores a altas temperaturas... Estos materiales son usados también en las tecnologías de adición, en mayor medida en la impresión 3D.

Introduciendo un segundo material dentro de la propia matriz polimérica a la vez que esta se va depositando capa a capa se obtienen una serie de características en el material que eran impensables en los materiales por separado. Hay varias formas de introducir este segundo material dentro de la matriz, desde la adición de pequeñas partículas hasta fibras continuas. Las fibras continuas más empleadas en este tipo de impresión son las de carbono y de vidrio, aunque también se puede imprimir con kévlar

y otro tipo de tejidos. Estas mejoran de manera exponencial las propiedades mecánicas de la pieza. Un ejemplo práctico de estas mejoras es el ABS. De por sí solo sus propiedades no son muy atractivas, pero al añadirle fibra de carbono en su impresión su comportamiento a tracción crece en un 150 %. En la **Figura 18** se aprecian varios tipos de fibras de refuerzo en la misma matriz polimérica.



Figura 18: Piezas impresas con matriz polimérica y diferentes fibras.

Es de esta manera y con el empleo de esta tecnología como se va a realizar este proyecto. Sustituyendo una biela fabricada típicamente en materiales metálicos por una pieza utilizando las tecnologías aditivas, impresión 3D con materiales compuestos, se pretenden conseguir las mayores mejoras posibles y hacer la pieza totalmente funcional para su uso.

II. OBJETIVOS

II.1. OBJETIVO GENERAL.

El objetivo de este proyecto es la consolidación e implementación de las tecnologías aditivas en una biela de bicicleta, pieza típicamente fabricada con materiales metálicos. Se van a explorar diversos materiales para la fabricación de esta, desde los materiales simples hasta los materiales compuestos. De este modo se pretende poder llegar a fabricar una biela completamente funcional. A lo largo de este escrito se va a buscar una biela de referencia para poder obtener un modelo en 3D, para que a partir de esta se pueda empezar a trabajar y a realizar estudios con diversos diseños y materiales hasta llegar a la solución óptima.

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

- Obtención de modelo 3D inicial de una biela de bicicleta metálica.
- Definición de estados tensionales e hipótesis de carga.
- Estudio de la biela de partida metálica mediante FEM.
- Estudio y análisis estructural de la biela de partida metálica con materiales de fabricación aditiva y materiales compuestos.
- Rediseño de la biela bajo el paradigma '*metal to composite*'.
- Estudio y análisis estructural de la biela. Iteraciones de diseño.
- Obtención de la biela final escogida mediante el empleo de tecnologías aditivas.
- Estudio económico del proyecto.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

III.1. Biela de partida.

III.1.1. Obtención del modelo 3D.

En primer lugar, se necesita una biela de referencia de la que partir, ya que es necesario tener un diseño previo para la posterior remodelación de esta y su estudio con materiales de fabricación aditiva con los que se vaya a llevar a cabo.

Para la obtención del modelo 3D se ha utilizado como referencia una biela de la marca Shimano modelo FC-M442/443 (Figura 19). Se trata pues, de una biela construida en aleación de aluminio del tipo 2014, una aleación utilizada para la industria aeronáutica y para el ciclismo de competición. La biela tiene una longitud entre centros de eje de pedal y de pedalier de 175 mm y un factor Q de 53 mm desde su parte más externa hasta la zona donde conecta con el pedalier y es usada para ciclismo de montaña dadas sus características y tamaño.



Figura 19 : Biela de la marca Shimano modelo FC-M442/443.

Para la realización de su procesado a modelo 3D se han tomado todas las medidas principales de la biela y se ha utilizado el *software* SolidWorks para su representación. Se ha diseñado esta en su totalidad exceptuando las roscas de anclaje, ya que por ahora no

va a ser necesario para la realización de este estudio, ya que supondrían un problema a la hora de realizar la simulación mediante FEM.

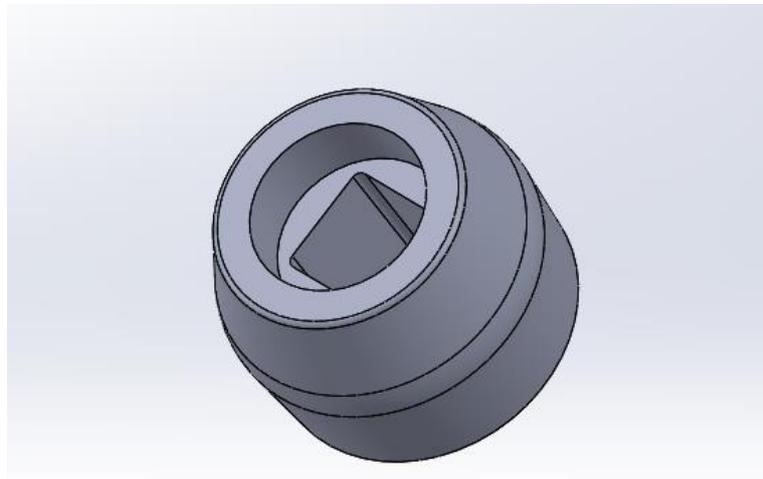


Figura 20: Primera revolución y extrusiones del anclaje del pedalier.

En primer lugar, se crea una revolución y se extruye en ella el anclaje del pedalier de la bicicleta (**Figura 20**). Seguidamente se extruye un bloque para poder ir modelando mediante la función *spline* el contorno de la biela y las curvas que la caracterizan, como se puede observar en la **Figura 21**.

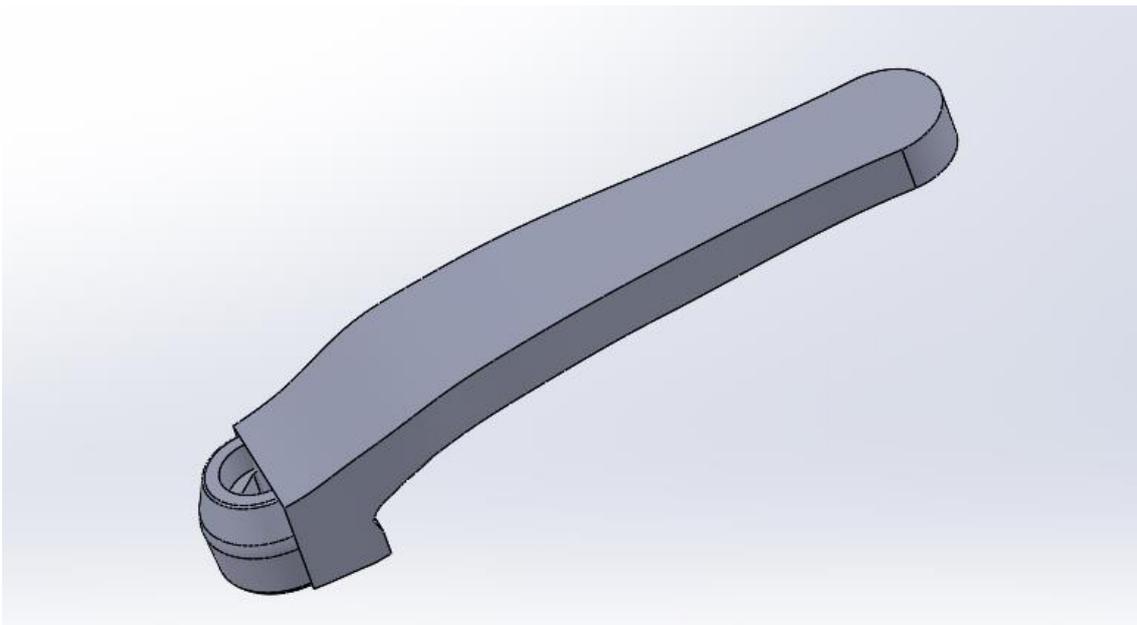


Figura 21: Cuerpo de la biela formado mediante la función *spline*.

Una vez esto, se realizan los redondeos de las aristas y el anclaje para el eje del pedal. A su vez se hace el vaciado interior que tiene la biela para el ahorro de material y de peso, dando el siguiente resultado visible en la **Figura 21** y **Figura 22**.

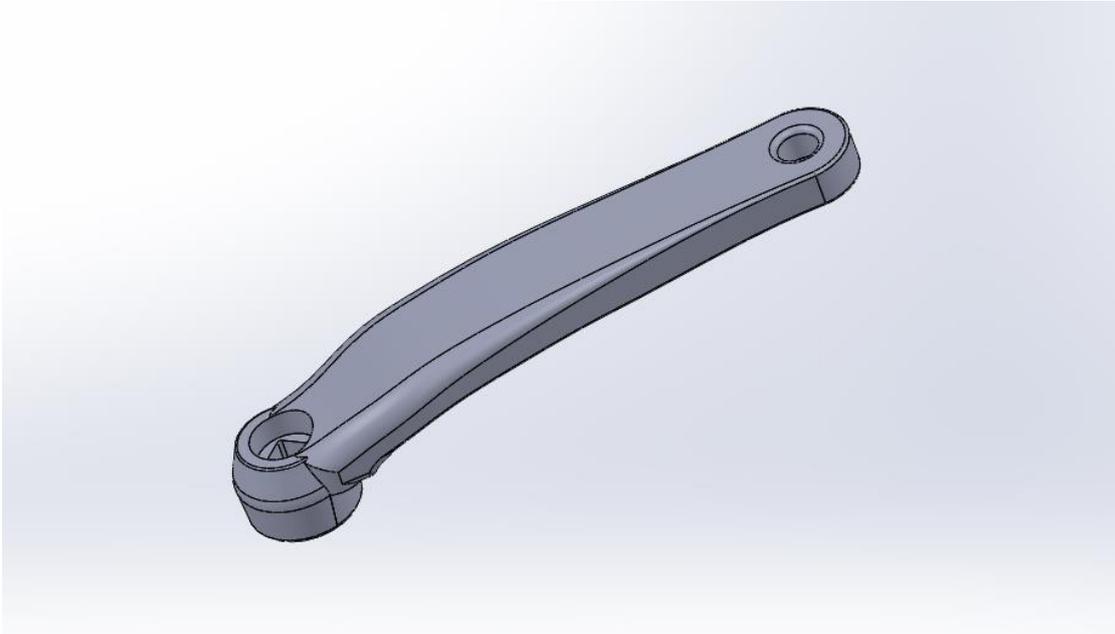


Figura 22: Modelado de biela completa.

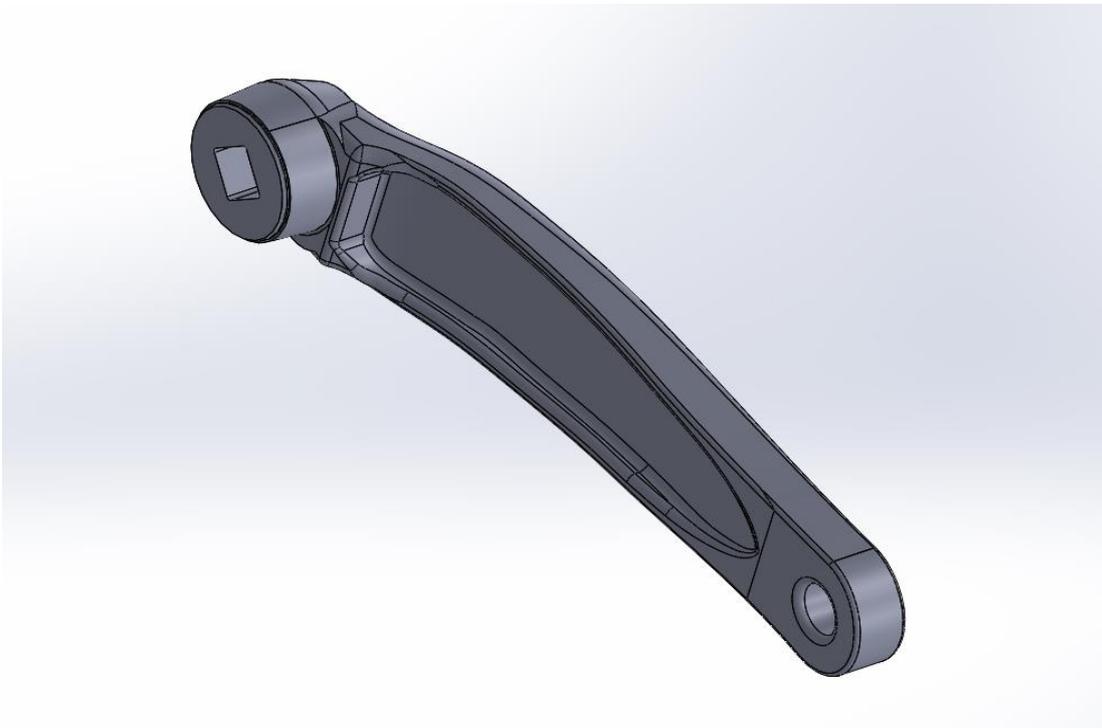


Figura 23: Modelado de biela completa.

III.1.2. Simulación mediante FEM de la biela de partida.

III.1.2.1. Definición de cargas.

Antes de comenzar con la simulación por elementos finitos de la biela en el *software* SolidWorks se han de establecer los esfuerzos a los que esta va a ser sometidos. Como se mencionó en apartados anteriores, la biela sufre un esfuerzo llamado torque, que no es más que la fuerza por la distancia del centro del eje del pedal al centro del pedalier. En este caso en particular, la fuerza se aplicará totalmente perpendicular a la biela, ya que es el punto en el que el ciclista aplica la máxima fuerza de pedaleo. En la **Figura 22** se observa un esquema muy sencillo de dónde y cómo se aplica el esfuerzo más desfavorable.

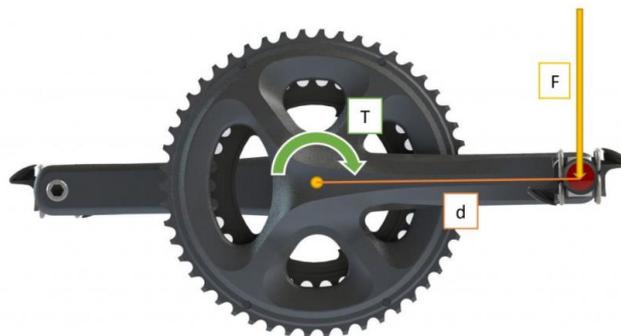


Figura 22: Diagrama de la fuerza aplicada en la biela.

Dicho esto, y sabiendo que el punto más desfavorable para la biela es el máximo esfuerzo que sufre cuando esta se encuentra a 90° de la horizontal, se procede a buscar que fuerza máxima puede alcanzar un ciclista profesional. La potencia que este puede dar se mide en watos, utilizando la siguiente fórmula para obtenerla:

$$\text{Potencia (w)} = \text{Torque(Nm)} \times \text{Cadencia de pedaleo (rad/s)}$$

Por lo tanto, para una misma potencia de pedaleo contra más cadencia, menos fuerza habrá que aplicar. En la **Tabla 2** se expresa esto mismo, es decir, para obtener una potencia de 350 W, potencias típicas medias con las que trabajan ciclistas profesionales, con unas bielas de 175 mm se muestran diferentes combinaciones de cadencia y de esfuerzos posibles utilizando la anterior fórmula.

Tabla 2: Comparativa de distintas posibilidades de cadencia y fuerza para una misma potencia.

Cadencia (rpm)	Cadencia (rad/s)	Bielas (m)	Potencia (W)	Fuerza (N)	Fuerza (kg)	Torque (Nm)
50,0	5,24	0,175	350,0	381,98	38,94	66,85
60,0	6,28	0,175	350,0	318,32	32,45	55,71
70,0	7,33	0,175	350,0	272,85	27,81	47,75
80,0	8,38	0,175	350,0	238,74	24,34	41,78
90,0	9,43	0,175	350,0	212,21	21,63	37,14
100,0	10,47	0,175	350,0	190,99	19,47	33,42
110,0	11,52	0,175	350,0	173,63	17,70	30,39
120,0	12,57	0,175	350,0	159,16	16,22	27,85

Para una cadencia de 50 rpm la fuerza en kilos que el ciclista debe aplicar para llegar a la marca de los 350 W será de 40 kg, mientras que con el doble de ritmo en la pedaleada la fuerza a aplicar caerá a la mitad.

Para buscar el valor más desfavorable no vale con potencias medias, sino que hay que ir hasta el extremo. Las típicas potencias máximas alcanzadas en *sprints* finales y contrarrelojes es de 1250 W a una cadencia de 115 rpm, por lo que aplicando la fórmula de potencia se obtienen los siguientes resultados en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Fuerza más desfavorable aplicada en la biela.

Cadencia (rpm)	Cadencia (rad/s)	Bielas (m)	Potencia (W)	Fuerza (N)	Fuerza (kg)	Torque (Nm)
115,0	12,04	0,175	1250,0	593,14	60,46	103,80

Por lo tanto, para la simulación de la biela se van a utilizar 600 N aplicados en perpendicular con la horizontal.

Por otro lado, hay otra situación en la que la biela soporta aún más carga. Esta es cuando el ciclista se sube o baja de la bicicleta, apoyando todo el peso de su cuerpo sobre el pedal que se encuentra totalmente bajado. En esta posición la biela trabajará a tracción pura soportando todo el peso del ciclista. Para este segundo análisis se supondrá que un ciclista de una masa de 150 kg apoya todo su peso sobre la biela, soportando esta 1472 N a tracción.

III.1.2.2. Modelo FEM proyecto mallado y material.

En primer lugar, se le aplica un mallado al modelo para que el *software* lo tome como formas sencillas divididas y unidas a su vez por nodos, de esta forma el análisis es mucho más preciso, ya que estudia cada uno de estos tetraedros por separado. Se le aplica una malla de triángulos de 1,75 mm como se aprecia en la **Figura 23**



Figura 23: Mallado del modelo.

Como se comentó anteriormente en el apartado de objetivos, el material de la biela es puramente metálico, este es la aleación de aluminio 2014. De esta forma el análisis se realiza teniendo en cuenta todas las características mecánicas del material de la biela.

Para ambos análisis de 600 N y 1472 N comentados en el apartado III.1.2.1. se va a utilizar el mismo mallado y la misma aleación de aluminio.

III.1.2.3. Sujeciones y cargas para análisis de 600N.

Como se observa en la **Figura 24** , para el análisis a 600 N se fija la biela en el hueco del eje del pedalier, impidiendo cualquier movimiento debido a que la simulación va a ser completamente estática. Por lo que respecta a la aplicación de la carga, esta irá en dirección perpendicular al plano simétrico de la biela, ya que como se vio en el apartado anterior, es la situación más desfavorable a la hora de aplicar fuerza pedaleando. Sin embargo, la fuerza no se aplica directamente a la rosca del pedal, sino que es una fuerza externa que el ciclista aplica en el propio pedal. Por lo tanto, se aplicará una carga remota justo en el centro del eje del pedal, a 50 mm de la base de la rosca de este. De este modo el análisis será más preciso y realista.

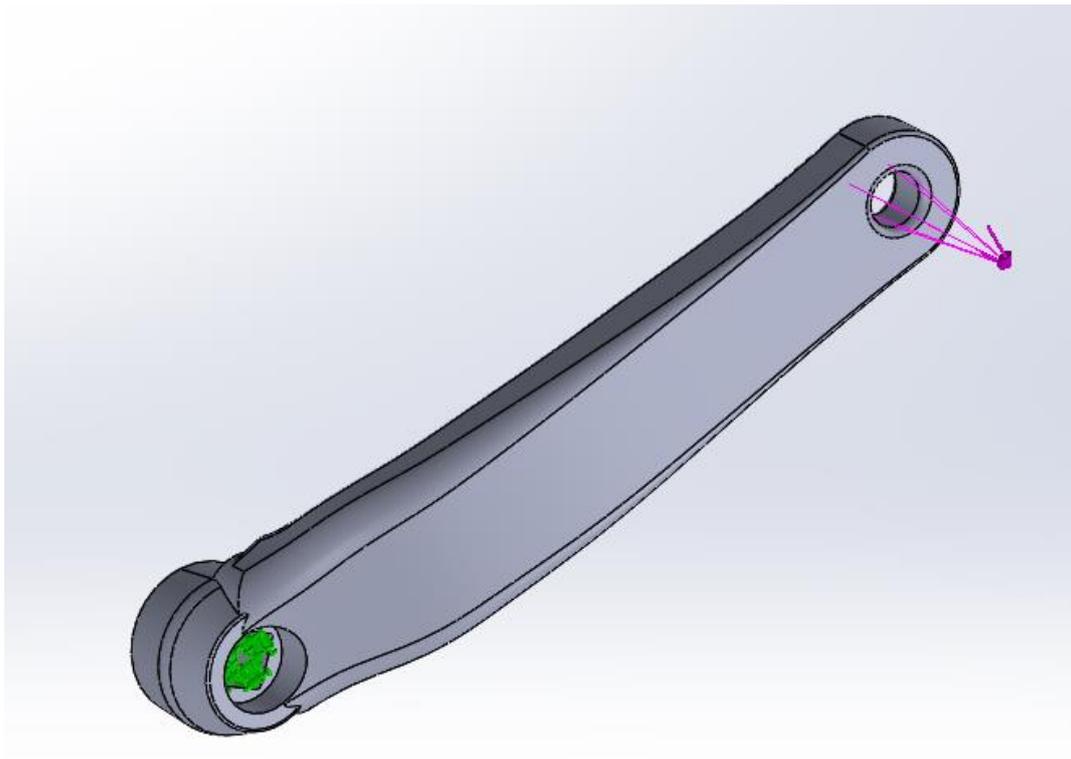


Figura 24: Fijación y carga de 600 N.

III.1.2.4. Resultados para análisis de 600N.

Se van a presentar los 3 resultados de la simulación por elementos finitos de la tensión de Von Mises, los desplazamientos del sólido y el factor de seguridad para la carga de 600 N. El procedimiento es simple, una vez se define la malla, el material, las sujeciones y cargas se ejecuta el estudio y se escoge que resultados se quieren que el *software* muestre, escogiendo los anteriormente mencionados ya que son los más importantes desde el punto de vista mecánico.

III.1.2.4.1 Tensiones Von Mises.

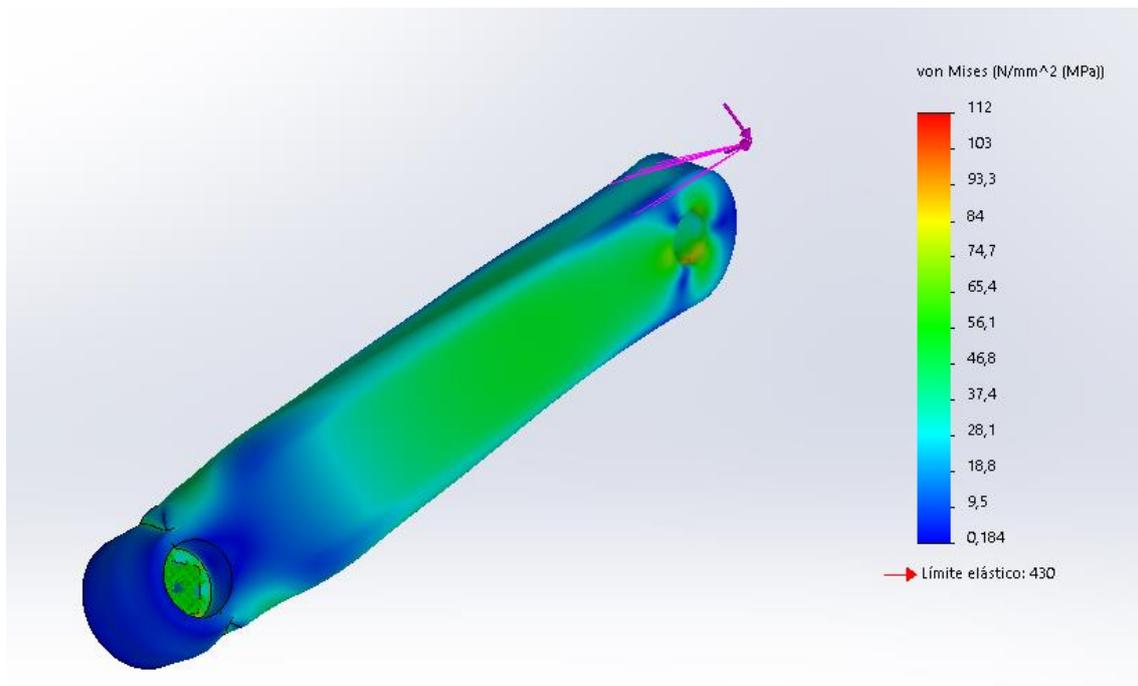


Figura 25: Tensiones Von Mises con carga 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela.

Siendo el límite elástico de 430 MPa, se define que el valor máximo que muestre la escala sea el valor máximo que sufre la biela aplicada la carga. Con esto se puede afirmar que la máxima tensión sufrida es de 112 MPa, muy por debajo de la tensión donde la biela empezaría a deformar plásticamente. Se observa en la **Figura 25** y

Figura 26 que la máxima tensión recae en el anclaje del pedalier y el eje del pedal, siendo estas las zonas más comprometidas con esta carga.

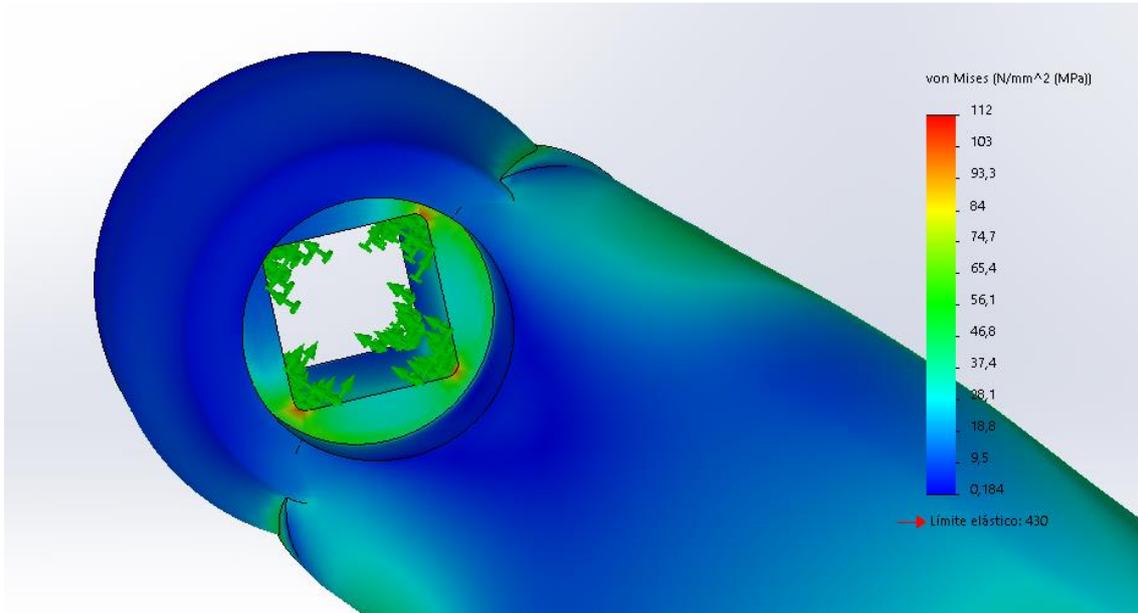


Figura 26: Vista en detalle del eje del pedalier con carga de 600 N.

Con estos resultados se puede intuir que estas partes serán las que más problemas causen una vez se estudie con el otro material en cuanto al límite elástico.

III.1.2.4.2. Desplazamiento.

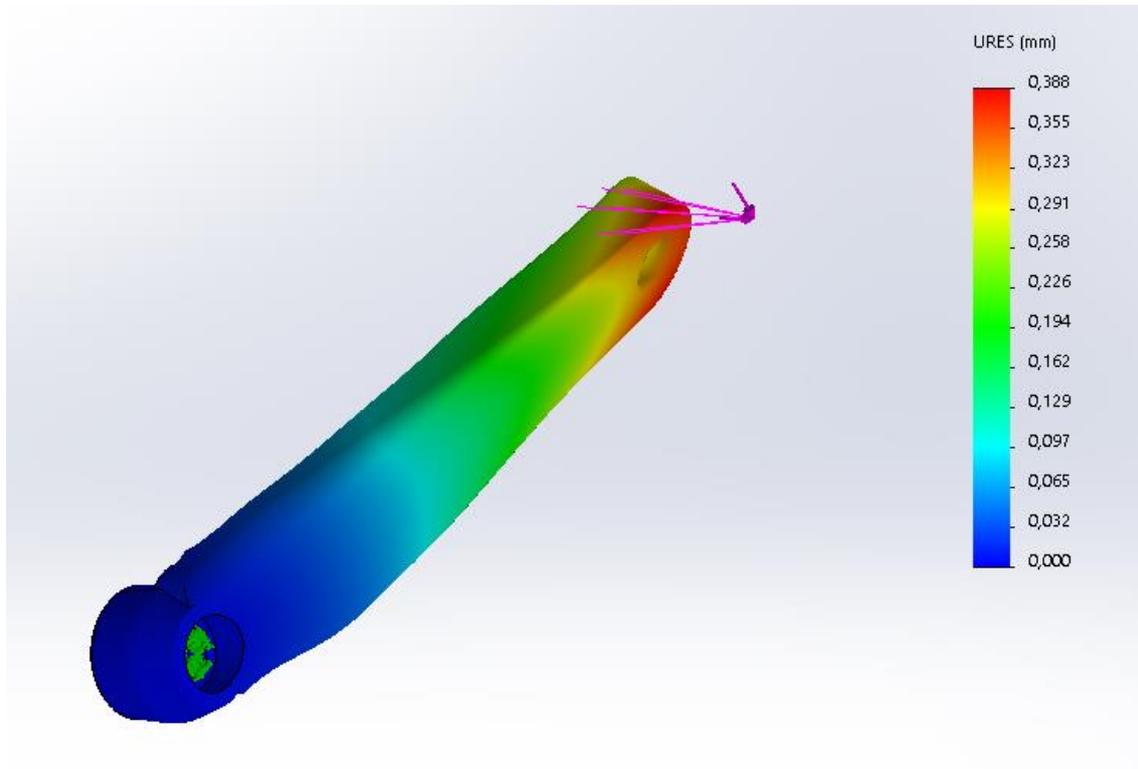


Figura 27: Desplazamientos con carga de 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela.

Esto mide cuanto desplaza la biela en mm con la carga aplicada, de nuevo, ajustando el valor máximo como tope de la escala, se observa en la **Figura 27** que en la parte del enganche del eje del pedal se sufre un desplazamiento de menos de medio milímetro, más concretamente de 0,39 mm. Como es lógico, la parte fija no se desplaza absolutamente nada, mientras que lo que sí lo hace es la zona que se encuentra más en voladizo. Teniendo en cuenta que el desplazamiento aquí no supera el medio milímetro se considera que este es relativamente bajo.

III.1.2.4.3. Factor de seguridad.

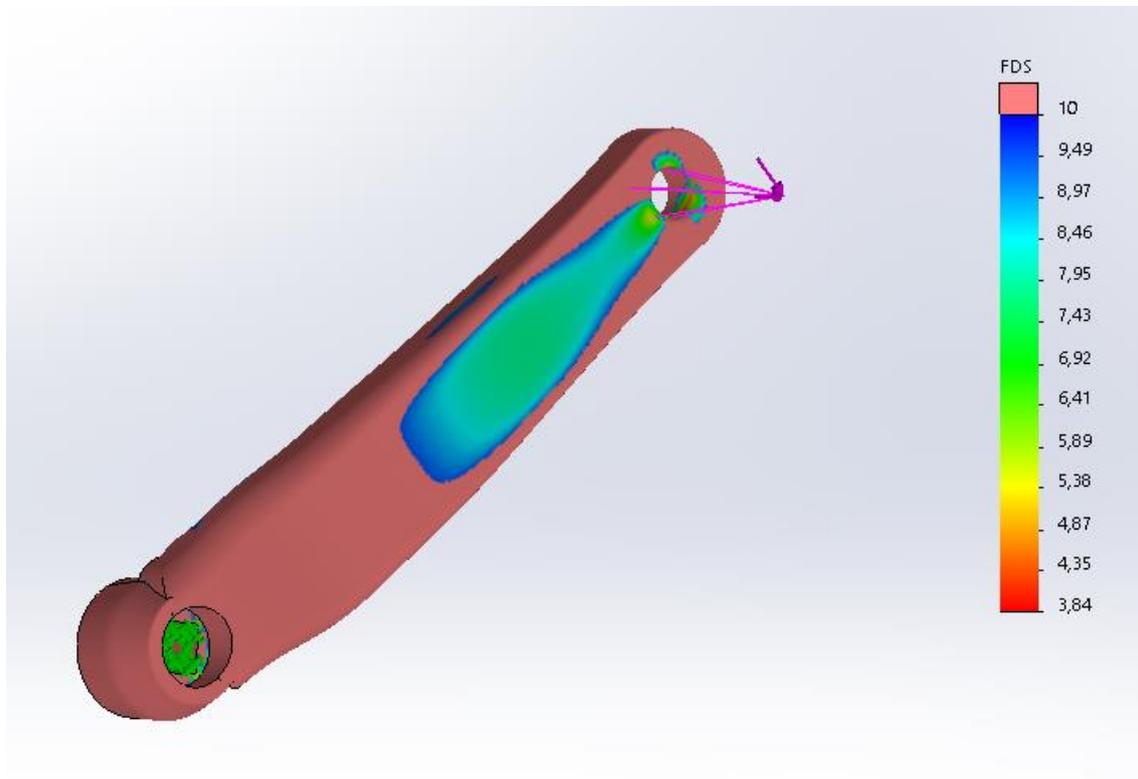


Figura 28: Factor de seguridad con carga de 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela.

De nuevo, siendo la zona más crítica de la biela el anclaje del pedalier, tiene un factor de seguridad de 3,84, lo que no es nada preocupante teniendo en cuenta que se está estudiándola situación más desfavorable. En la **Figura 28** se muestran los diferentes factores de seguridad de la biela.

III.1.2.5. Sujeciones y cargas para el análisis de 1472 N.

De nuevo, como en el apartado anterior, se fija la biela en el hueco del eje del pedalier, impidiendo que esta se mueva si no es junto con el propio eje. En la **Figura 29** se observa nuevamente como el esfuerzo recae fuera de la propia biela, es decir, a 50 mm de esta que es donde se encontraría el centro del pedal. El esfuerzo es completamente vertical ya que la biela se encuentra bajada a la hora de subirse a la bicicleta.

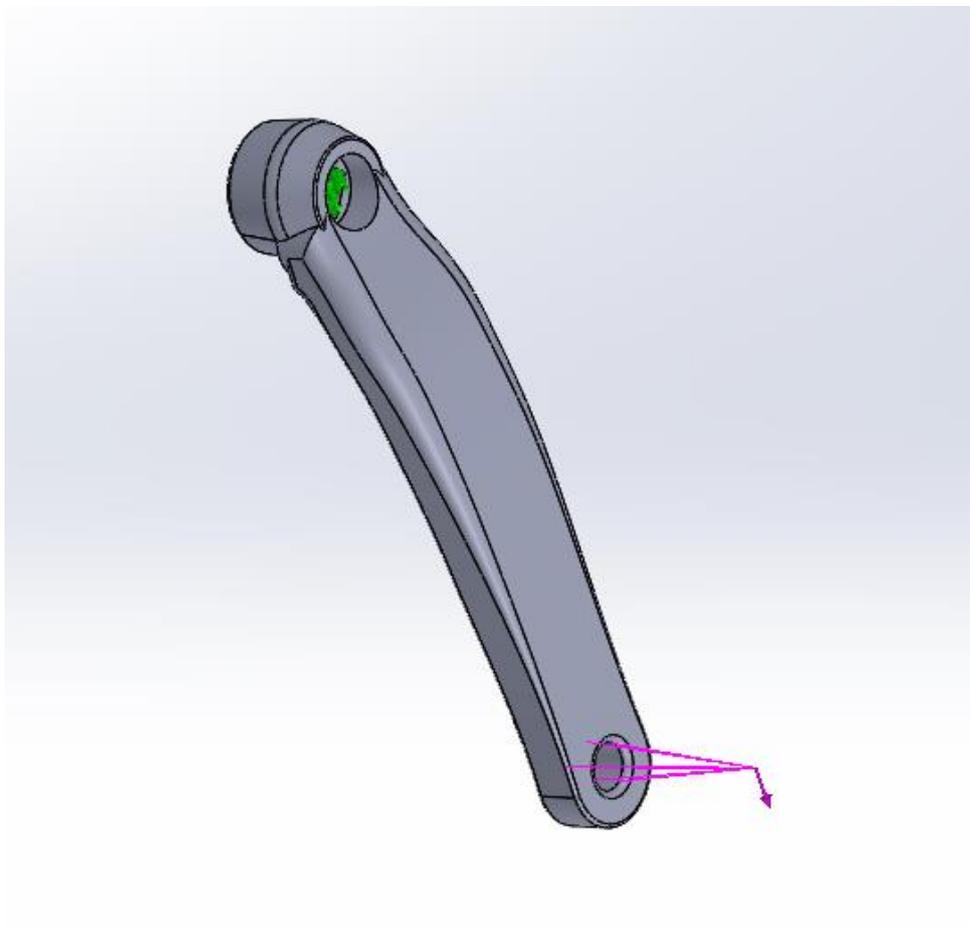


Figura 29: Fijación y carga de 1472 N.

III.1.2.6. Resultados para análisis de 1472 N.

Como en el apartado III.1.2.4. se van a presentar los 3 resultados de la simulación por elementos finitos de la tensión de Von Mises, los desplazamientos del sólido y el factor de seguridad. El procedimiento es simple, una vez se define la malla, el material, las sujeciones y cargas se ejecuta el estudio y se escoge que resultados se quieren que el *software* muestre, escogiendo los anteriormente mencionados ya que son los más importantes desde el punto de vista mecánico.

III.1.2.6.1 Tensiones Von Mises.

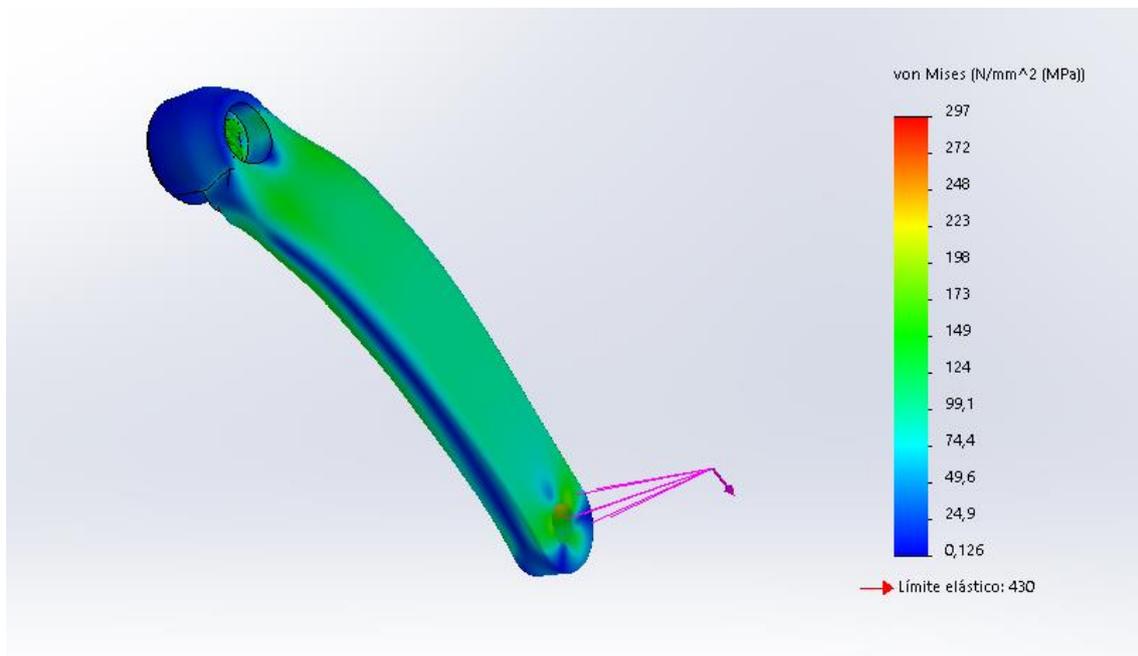


Figura 30: Tensiones Von Mises con carga 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.

Al igual que con la carga de 600 N, se aprecia que el valor máximo de tensión alcanzado en la biela, 297 MPa, ni siquiera llega a aproximarse al límite elástico, siendo este de 430 MPa. En la **Figura 30** y **Figura 31** se aprecia como los puntos que más tensión sufren es el eje de sujeción al pedal y la parte trasera de esta. Siendo el punto máximo de 297 MPa.

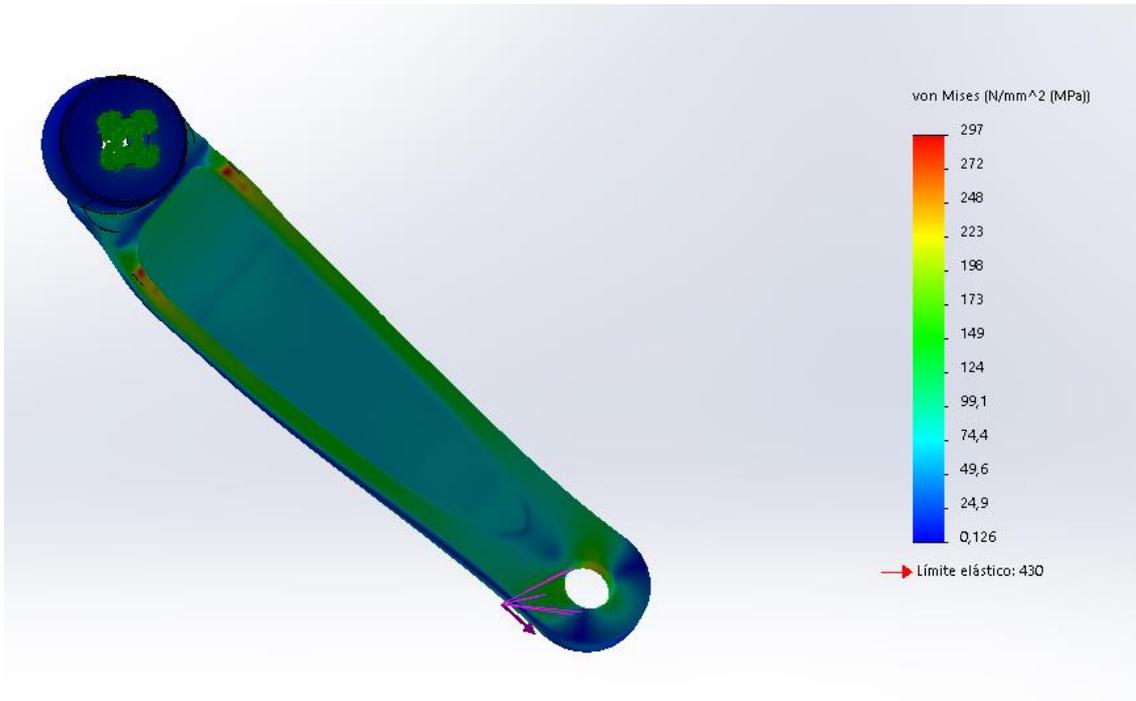


Figura 31: Vista en detalle del eje del pedalier con carga de 1472 N.

Este resultado es lógico, ya que la parte más roja es la que soporta la flexión al estar la carga distribuida fuera del propio cuerpo de la biela.

III.1.2.6.2. Desplazamiento.

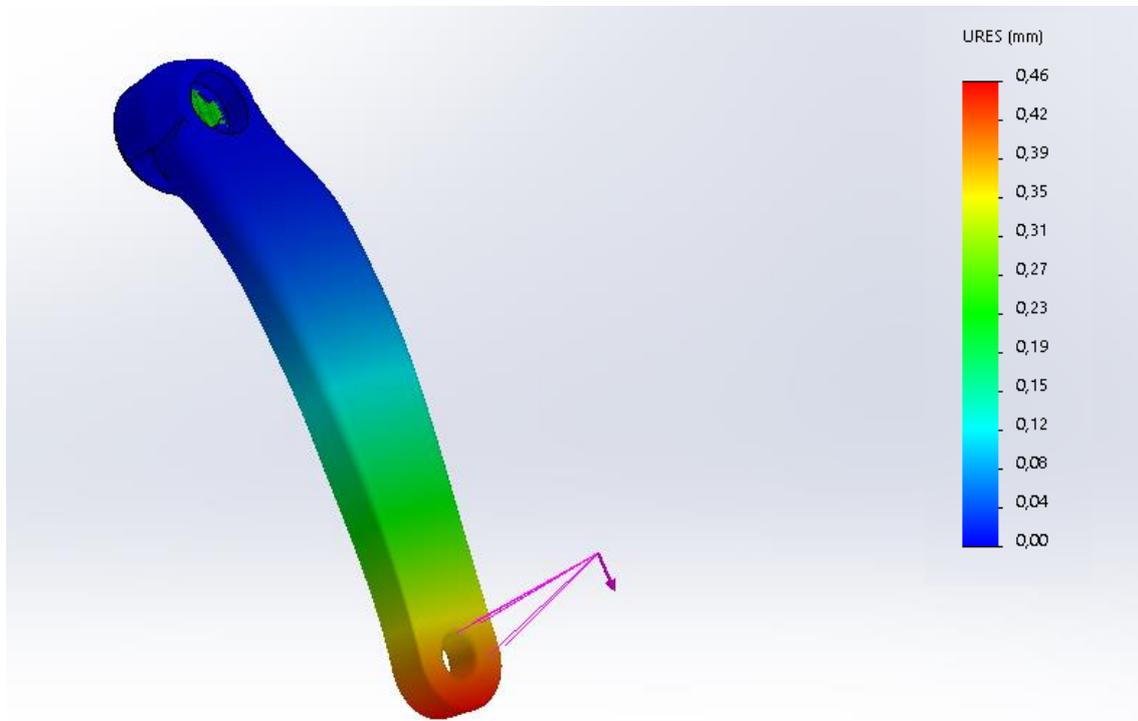


Figura 32: Desplazamientos con carga de 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.

Esto mide cuanto desplaza la biela en mm con la carga aplicada. La biela se encuentra ante un desplazamiento máximo de unos 0,46 mm en la parte final de esta, justo en el hueco para el eje del pedal (**Figura 32**). Se trata pues de un desplazamiento que no afecta en gran medida al comportamiento de la biela, ya que como se ha visto en el apartado anterior la biela no llega al límite elástico del aluminio en ninguna de sus partes. También hay que considerar que la situación es una de las más desfavorables posibles, ya que se le está aplicando una masa de 150 kg en un solo punto de la biela.

III.1.2.6.3. Factor de seguridad.

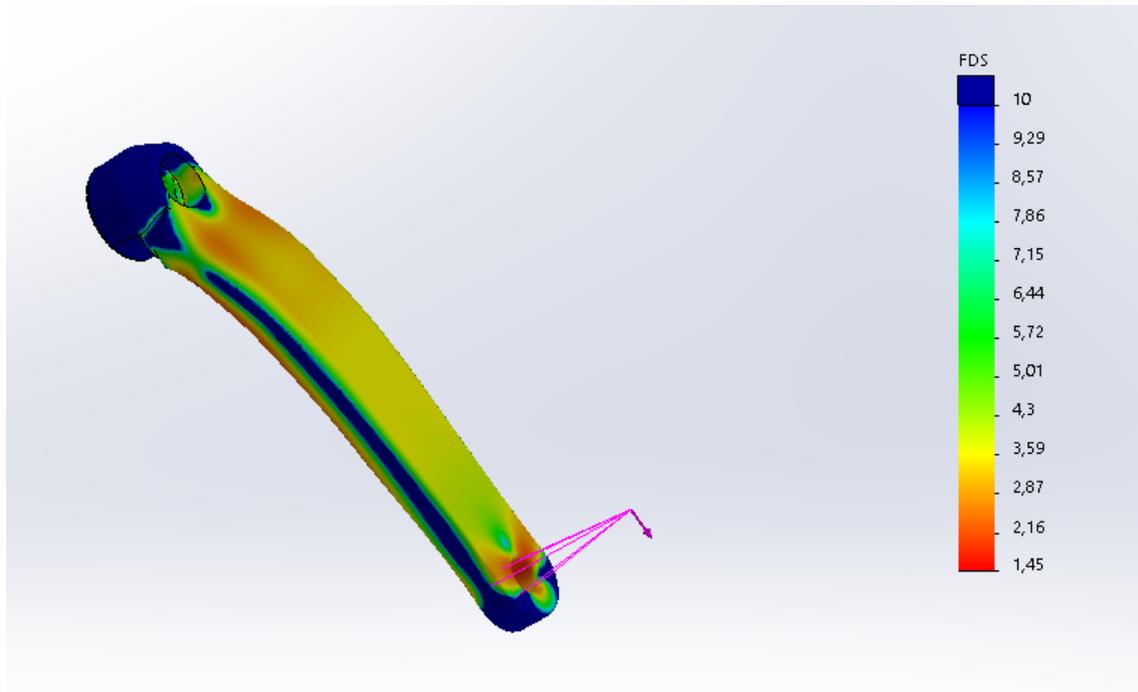


Figura 33: Factor de seguridad con carga de 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.

En la **Figura 33** se muestra la biela con los diferentes factores de seguridad que presenta en todo el sólido. Se ve que la zona más crítica, zona de anclaje al pedal (**Figura 33**) y zona trasera de la biela (**Figura 34**), la biela cuenta con un factor de seguridad de 1,45, lo que es suficiente si se tiene en cuenta que la propia carga ya está de por sí sobredimensionada para que sea más crítica.

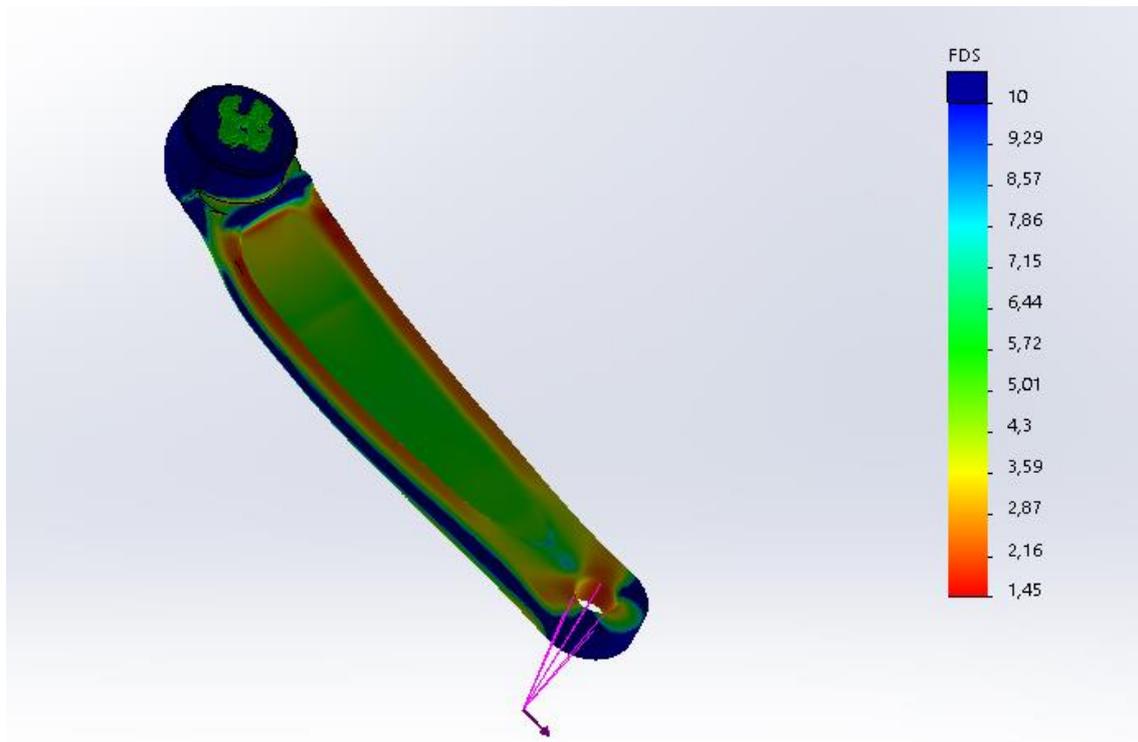


Figura 34: Vista trasera de la biela con factor de seguridad con carga de 1472 N aplicada en horizontal al eje simétrico de la biela.

Como conclusión, hay que mencionar que la biela de partida escogida cumple perfectamente los esfuerzos más desfavorables aplicados sobre esta, ya que está diseñada y pensada para esto. Siendo la peor situación posible la carga de 150 Kg aplicada horizontalmente al eje simétrico de la biela, esta muestra un factor de seguridad mínimo de 1,45. Del mismo modo con la carga de 600 N la biela cumple perfectamente.

III.2. Estudio con materiales alternativos de fabricación.

III.2.1. Materiales disponibles.

Como se ha comentado en el apartado de objetivos, se pretende construir mediante fabricación aditiva, más concretamente impresión 3D, una biela de bicicleta. La impresora 3D disponible para la realización de este estudio va a ser una Markforged del modelo X7. Este modelo en concreto utiliza una serie de materiales patentados por la propia marca llamado Onyx, además de nailon. Esto le permite piezas de hasta 10 veces más resistencia que el ABS, siendo este modelo la opción más interesante para una pieza sometida a tales esfuerzos mecánicos. Es un material capaz de dejar acabados altamente precisos gracias a las características técnicas que ofrece. También es capaz de añadir fibras de refuerzo a la vez que deposita el material, sin embargo, es una opción que se tendrá en cuenta en caso de que los materiales disponibles no sean lo suficientemente resistentes para soportar los esfuerzos a los que va a estar sometida la biela.

El Onyx es un material de base nailon con microfibras de carbono, lo que le da esa resistencia mecánica tan superior a un polímero estándar. Es capaz de ofrecer gran dureza y tiene una gran resistencia química.

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37
Tensile Strain at Break (%)	D638	25
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	71
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.0
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145
Flame Resistance	UL94	—
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330
Surface Resistance (Ω)	ANSI/ESD STM11.11 ³	—
Density (g/cm ³)	—	1.2

Figura 36: Propiedades mecánicas del Onyx.

En la **Figura 36** se pueden ver las propiedades mecánicas más importantes del Onyx. Cuenta con un módulo elástico de 2,4 GPa, un límite elástico de 40 MPa y un límite a la tracción de 37 MPa. Cuenta con una densidad bastante baja de 1,2 g/cm³, típica de los materiales poliméricos, y una resistencia estructural de 145 grados centígrados. Con todo esto se puede observar que no es un material polimérico cualquiera, ya que cuenta con unas propiedades bastante superiores a cualquier otro material con el que se pueda trabajar en la impresión en 3D, como por ejemplo el ABS, ya que es 1,4 veces más fuerte y rígido que este.

Además del Onyx, la marca también ofrece otras dos variantes de este para otros usos técnicos, el Onyx FR y el Onyx ESD. El primero es usado como retardante ignífugo, mientras que el segundo se usa para piezas que requieran resistencia eléctrica. Sin embargo, las propiedades mecánicas en comparación al Onyx son considerablemente mejores.

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Onyx ESD
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	3.0	4.2
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	41	52
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	40	50
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	18	25
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	71	71	83
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.0	3.6	3.7
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	138
Flame Resistance	UL94	—	V-0 ²	—
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	44
Surface Resistance (Ω)	ANSI/ESD STM11.11 ³	—	—	10 ⁵ - 10 ⁷
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.2	1.2

Figura 37 : Propiedades mecánicas del Onyx FR y Onyx ESD en comparación al Onyx.

Como se aprecia en la **Figura 37**, mientras que la densidad de los materiales es la misma, 1,2 g/cm³, el módulo elástico y el límite elástico son notablemente superiores.

Por último, la marca también ofrece en su catálogo Nylon. Este es un termoplástico que se utiliza para piezas que no requieran soportar altas cargas, sin embargo, también se incluirá en este estudio pese a que sus propiedades mecánicas sean bastante más bajas que para los Onyx. (**Figura 38**).

Composite Base	Nylon
Tensile Modulus (GPa)	1.7
Tensile Stress at Yield (MPa)	51
Tensile Stress at Break (MPa)	36
Tensile Strain at Break (%)	150
Flexural Strength (MPa)	50
Flexural Modulus (GPa)	1.4
Heat Deflection Temp (°C)	41
Flame Resistance	—
Izod Impact - notched (J/m)	110
Surface Resistance (Ω)	—
Density (g/cm ³)	1.1

Figura 38: Propiedades mecánicas del Nylon.

Estos materiales tan solo son vendidos por la marca Markforged para sus impresoras a un precio de 160 € para el Onyx, 190 € para el Onyx FR y el Onyx ESD y 140 € el Nylon los 800 cm³. También cuenta con materiales para la impresión con fibras continuas, pero esta opción se tendrá en cuenta más adelante en caso de tener que utilizar materiales compuestos.

Cabe destacar que la impresora es de código cerrado, pues solo permite la impresión única y exclusivamente con los materiales que se venden en su página web, descartando así cualquier otro tipo de material técnico para la realización de las bielas.

III.2.2. Simulación mediante FEM de la biela de partida con materiales disponibles.

En este apartado se va a realizar la simulación que se realizó en el apartado III.1.2. pero con los materiales Onyx, Onyx FR, Onyx ESD y Nylon definidos previamente. Las sujeciones de la biela y la definición de cargas, tanto la carga perpendicular al eje de simetría de la biela de 600 N como la carga a pura tracción de la misma de 1472 N, no cambian en absoluto. En la *Figura 39* se puede apreciar la ventana para modificar o aplicar materiales que ofrece SolidWorks, donde se aplican todas las propiedades mecánicas del material en cuestión, en este caso se empieza por el Onyx. Cabe mencionar que se han tomado los materiales como isotrópicos debido a que el fabricante ofrece estos datos sin especificar la orientación de las capas a la hora de imprimir, por lo que se desprecian los posibles efectos en las propiedades mecánicas de las orientaciones de impresión.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2400	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3	N/D
Módulo cortante	318.9	N/mm ²
Densidad de masa	1200	kg/m ³
Límite de tracción	37	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	40	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)

Figura 39: Definición de propiedades mecánicas del Onyx en SolidWorks.

En la *Figura 39* se han introducido los valores que se encuentran en color rojo: módulo elástico, coeficiente de Poisson, densidad y límite elástico. Estos son los que el *software* exige para poder trabajar.

Una vez introducidas las propiedades mecánicas del material, se procede a ejecutar el estudio del análisis estático de 600 N, con los siguientes resultados tensionales según Von Mises (**Figura 40**).

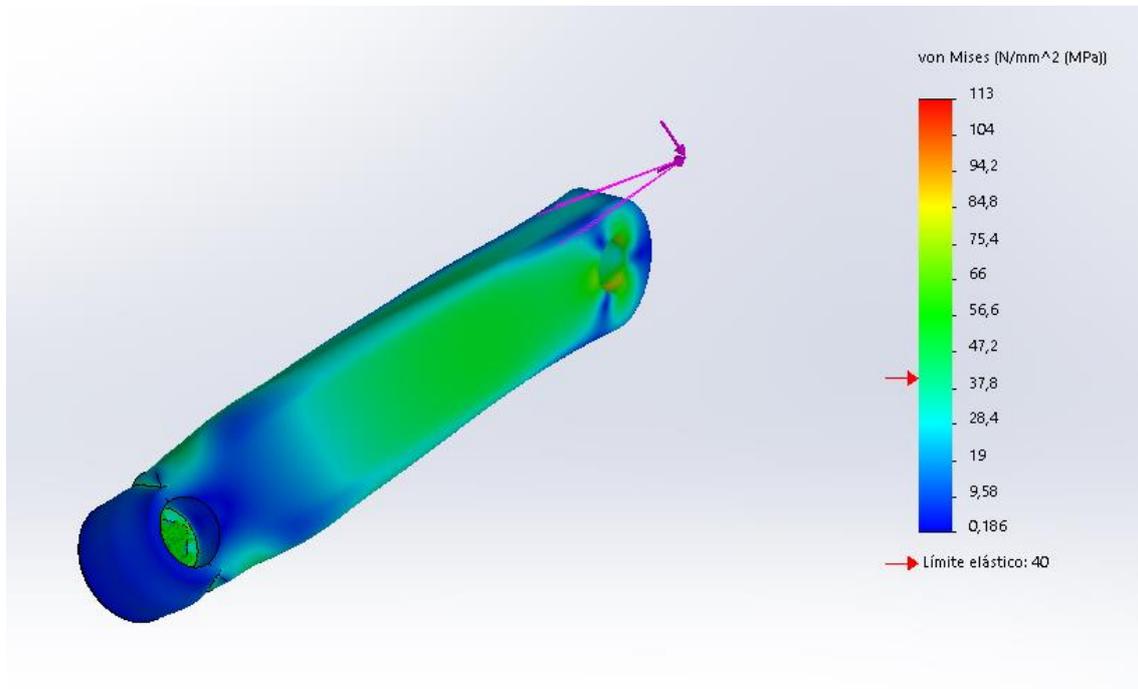


Figura 40: Tensiones Von Mises con carga 600 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela aplicando material Onyx.

Como era de esperar, las tensiones que se ejercen en la biela superan con creces el límite elástico del material (40 MPa). De nuevo, las zonas que más se comprometen son las que están en contacto con el eje del pedalier y el eje del pedal, soportando estas hasta una tensión de 113 MPa, casi el triple del límite elástico. Por lo que respecta al estudio para el análisis estático de 1472 N (**Figura 42**) la biela se encuentra ante una situación más desfavorable que la anterior, siendo las tensiones máximas, ocurridas en las mismas zonas que antes y en la zona trasera de la biela, de hasta casi 300 MPa y la deformación existente de 140 mm, lo que es inaceptable.

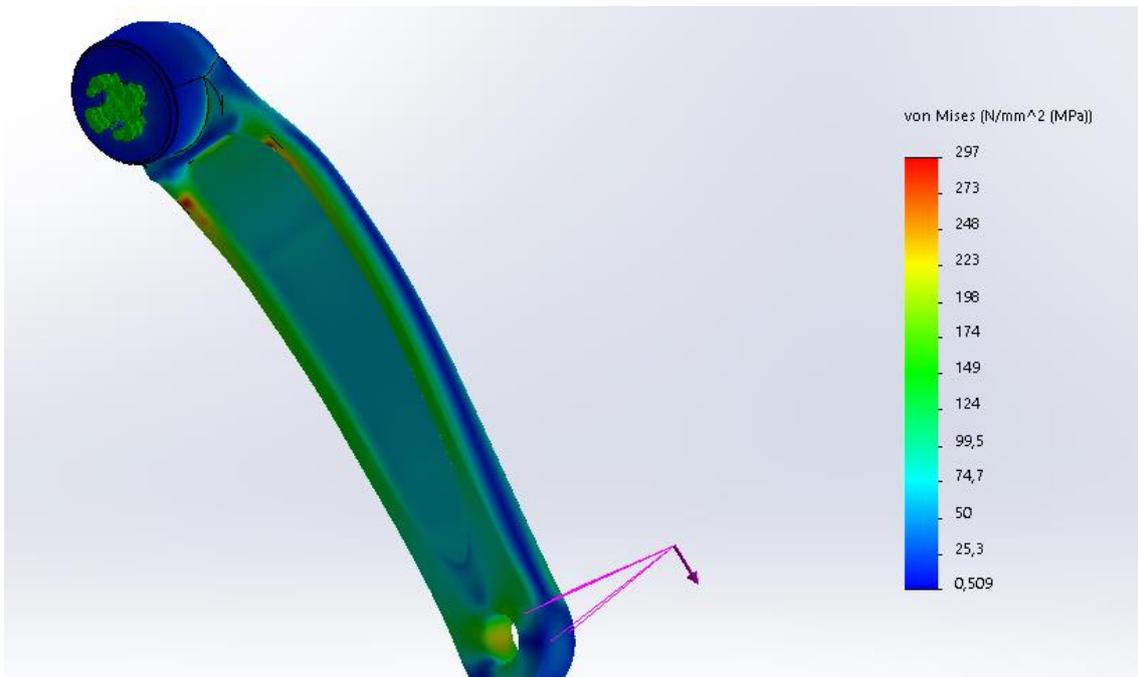


Figura 41: Deformaciones con carga 1472 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela aplicando material Onyx.

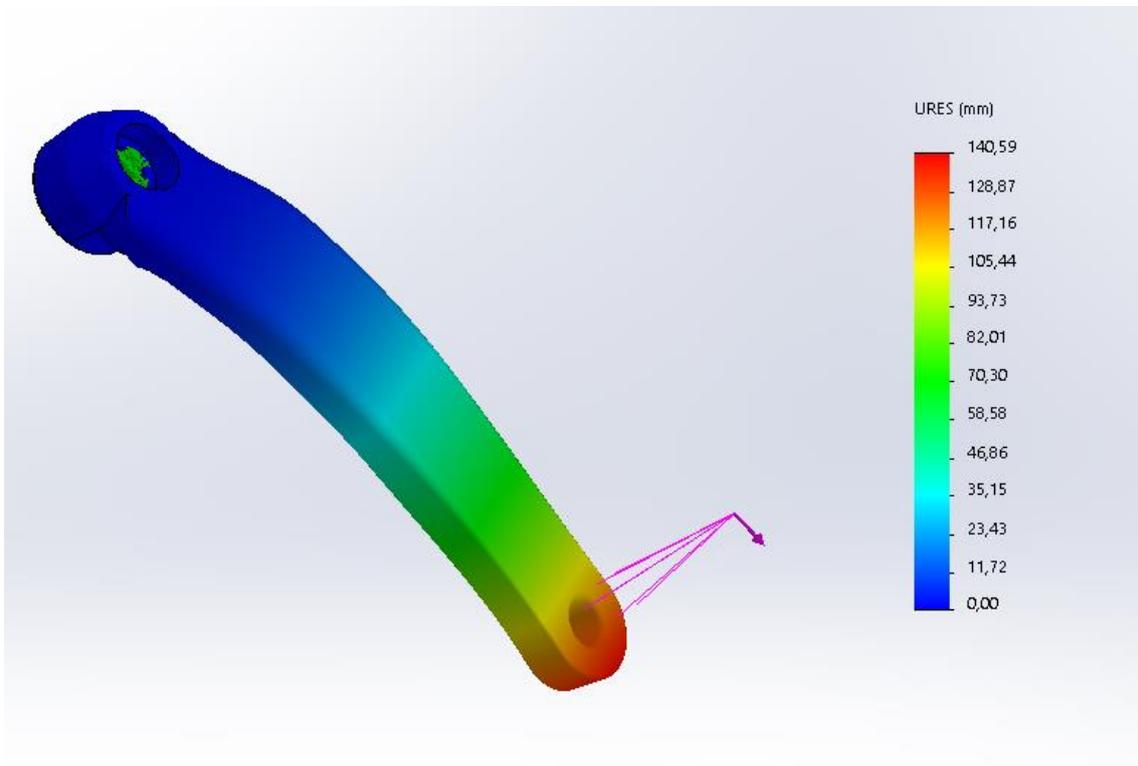


Figura 42: Tensiones Von Mises con carga 1472 N aplicada en vertical al eje simétrico de la biela aplicando material Onyx.

Con estos resultados obtenidos es más que evidente que la biela fabricada de Onyx con el diseño existente no soportaría de ninguna de las maneras los esfuerzos sometidos.

Para el estudio con los materiales Onyx Fr, Onyx ESD y Nylon se realizan los mismos pasos que se han realizado para el Onyx, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4: Resultado análisis estático 600N.

ANÁLISIS ESTÁTICO 600 N					
Material	Modulo elástico (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión máx. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Factor de seguridad mín.
Onyx	2400	40	113	11,70	0,35
Onyx FR	3000	41	113	9,57	0,37
Onyx ESD	4200	52	113	6,83	0,47
Nylon	1700	51	113	16,89	0,46

Tabla 5: Resultado análisis estático 1472 N.

ANÁLISIS ESTÁTICO 1472 N					
Material	Modulo elástico (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión máx. (MPa)	Desplazamiento máx. (mm)	Factor de seguridad mín.
Onyx	2400	40	297	140,59	0,13
Onyx FR	3000	41	297	112,47	0,14
Onyx ESD	4200	52	297	80,34	0,18
Nylon	1700	51	297	196,48	0,17

Como se puede observar tanto en la **Tabla 4** como en la **Tabla 5** en ninguna de ambas situaciones ninguno de los materiales planteados cumple con los esfuerzos a soportar, teniendo tensiones máximas muy por encima del límite elástico y unos desplazamientos completamente irracionales. Por lo tanto, a vistas que la biela de partida no cumple con ninguno de los materiales propuestos, se va a realizar una remodelación completa de esta, respetando las medidas de anclajes y el factor Q. Con esto se pretende llegar a resultados óptimos que demuestren que la biela pueda llegar a soportar las condiciones más desfavorables a las que va a ser sometida a lo largo de su vida útil.

III.3. Rediseño y estudio de la biela de partida.

III.3.1. Rediseño.

Tras analizar los resultados obtenidos con el diseño de partida aplicando los materiales disponibles que ofrece Markforged, se determina que es necesario un cambio de geometría para poder cumplir con las solicitaciones impuestas en los apartados anteriores. Como se ha comentado con anterioridad, las medidas básicas de la biela, medida de anclaje a anclaje y factor Q se deben respetar, siendo 175 mm y 53 mm respectivamente. De este modo una vez esté el diseño final de la pieza listo se podrán cambiar estas medidas para poder imprimir piezas de distintos tamaños para cualquier tipo de ciclista.

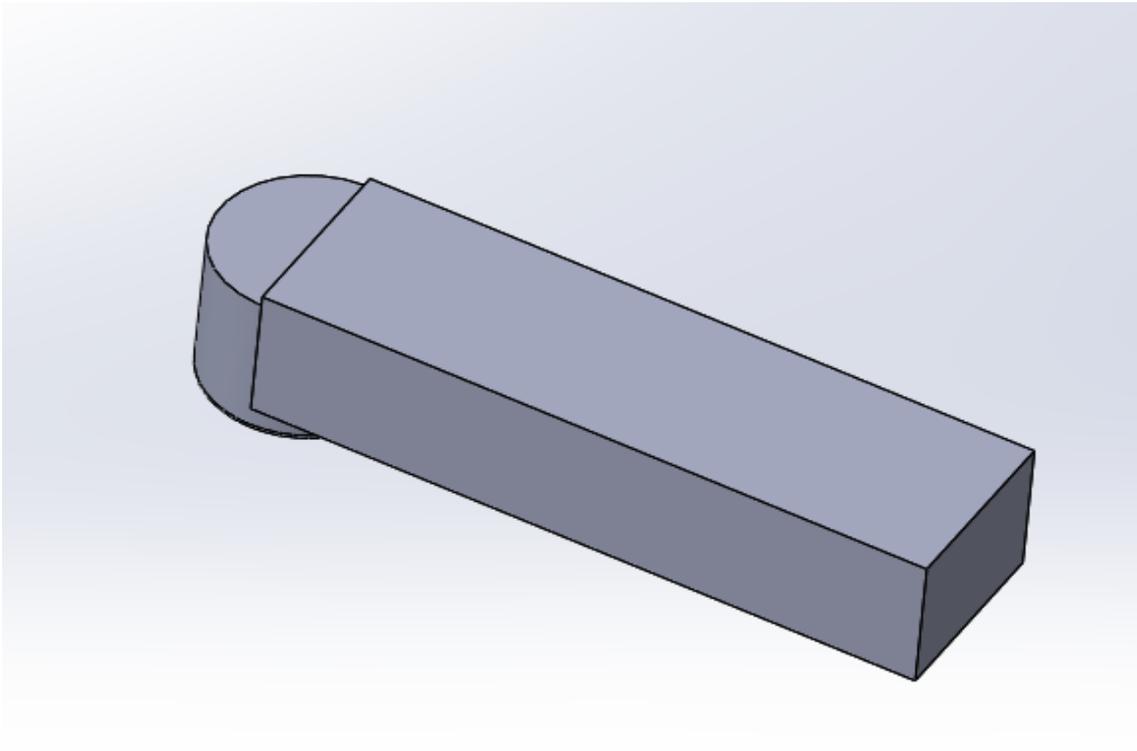


Figura 43: Rediseño de biela.

Se empieza con una forma basta en la biela, de 45 mm de grosor y 50 mm de ancho, para de esa forma poder ir ajustando dependiendo de los resultados obtenidos a posteriori. (Figura 43)

Una vez que se tiene el propio cuerpo de la biela, se realizan ambos anclajes y se fusiona el resultado en una única pieza, obteniendo lo siguiente (Figura 44):

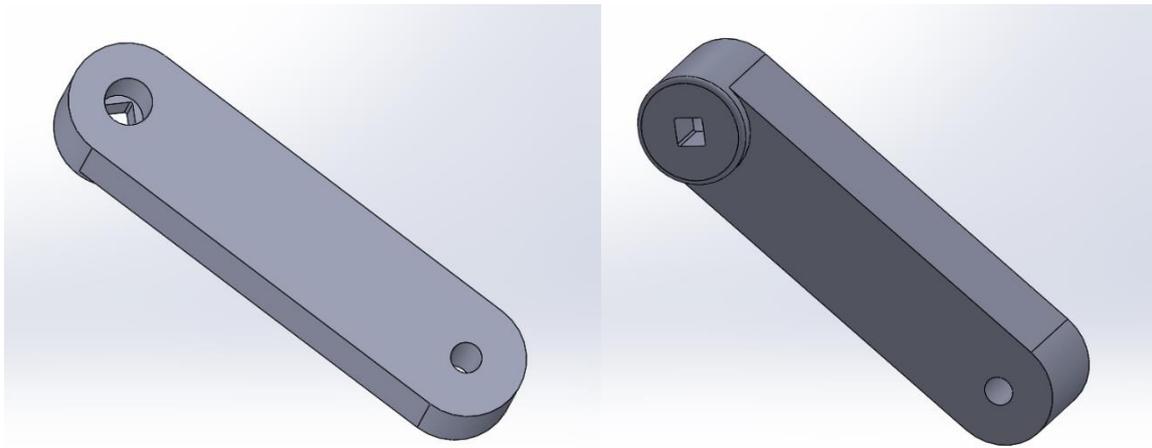


Figura 44: Rediseño de la biela.

Aunque se hayan respetado el tamaño de los anclajes y la forma, cuadrada en este caso, esto puede variar. En el caso de que la pieza falle en esos puntos se realizarán diferentes diseños para que la fuerza se reparta mejor sobre estas zonas y así intentar que cumpla con los esfuerzos.

III.3.2. Simulación mediante FEM de biela rediseñada.

De nuevo, simulamos la biela con las situaciones de carga preestablecidas ya en el apartado III.1.2.1., situando anclajes y cargas en las mismas zonas que en la biela de partida. Los materiales con los que se va a realizar el siguiente estudio serán los mismos que antes, el Onyx, el Onyx FR, el Onyx ESD y el Nylon.

Tabla 6: Resultados análisis estático 600 N con biela rediseñada.

ANÁLISIS ESTÁTICO 600 N Rediseño					
Material	Modulo elástico (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión máx. (MPa)	Desplazamiento Máx (mm)	Factor de seguridad mín.
Onyx	2400	40	84,80	3,01	0,47
Onyx FR	3000	41	84,80	2,41	0,48
Onyx ESD	4200	52	84,80	1,72	0,61
Nylon	1700	51	84,80	4,25	0,60

Tabla 7: Resultados análisis estático 600 N con biela rediseñada

ANÁLISIS ESTÁTICO 1472 N Rediseño					
Material	Modulo elástico (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión máx. (MPa)	Desplazamiento Máx (mm)	Factor de seguridad mín.
Onyx	2400	40	103,49	5,25	0,39
Onyx FR	3000	41	103,49	4,20	0,40
Onyx ESD	4200	52	103,49	3,00	0,50
Nylon	1700	51	103,49	7,41	0,49

Observando los resultados de la **Tabla 6** y la **Tabla 7** se puede ver que, en el caso de los 1472 N, el Onyx ESD deforma 3 mm, lo que todavía sigue siendo una deformación bastante considerable. Las masas de las bielas son prácticamente iguales, ya que las densidades de los materiales son las mismas, exceptuando la del nylon. Esta es de 570 gramos para los Onyx y de 530 gramos para el nylon.

Siendo el Onyx ESD óptimo por los resultados que muestran las tablas, merece la pena centrarse en un rediseño utilizando este material en concreto. Como se puede observar, la tensión máxima rebasa en casi el doble el límite elástico, sin embargo, esto tan solo ocurre en la zona del anclaje del pedalier (**Figura 45**).

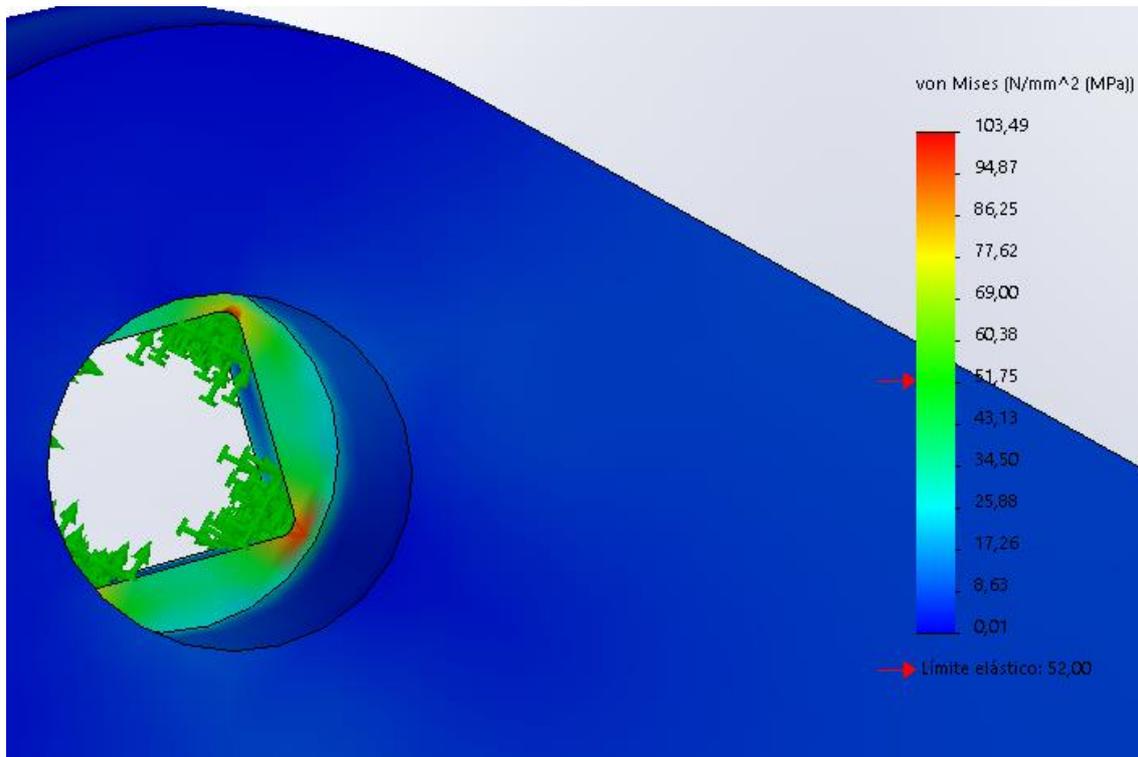


Figura 45: Tensiones Von Mises en biela de Onyx ESD con carga de 1472 N en la zona del pedalier.

Realizando un pequeño rediseño en esta zona se puede llegar a dejar por debajo del límite elástico las tensiones sufridas. Se sustituye la forma cuadrada del anclaje del pedalier por una forma hexagonal, para así aumentar el número de lados sobre los que va a ejercer fuerza la biela en el pedalier y así repartir mejor las tensiones. Del mismo modo se aumenta la distancia que va desde el inicio de la biela por la parte de detrás hasta la rosca que sujeta al pedalier, pasando de 20 mm hasta los 40 mm. En la **Figura 46** se puede observar como la tensión máxima en esta zona cae desde los 103,49 MPa hasta los 38,91 MPa. Esto supone una reducción de tensión considerable en la pieza.

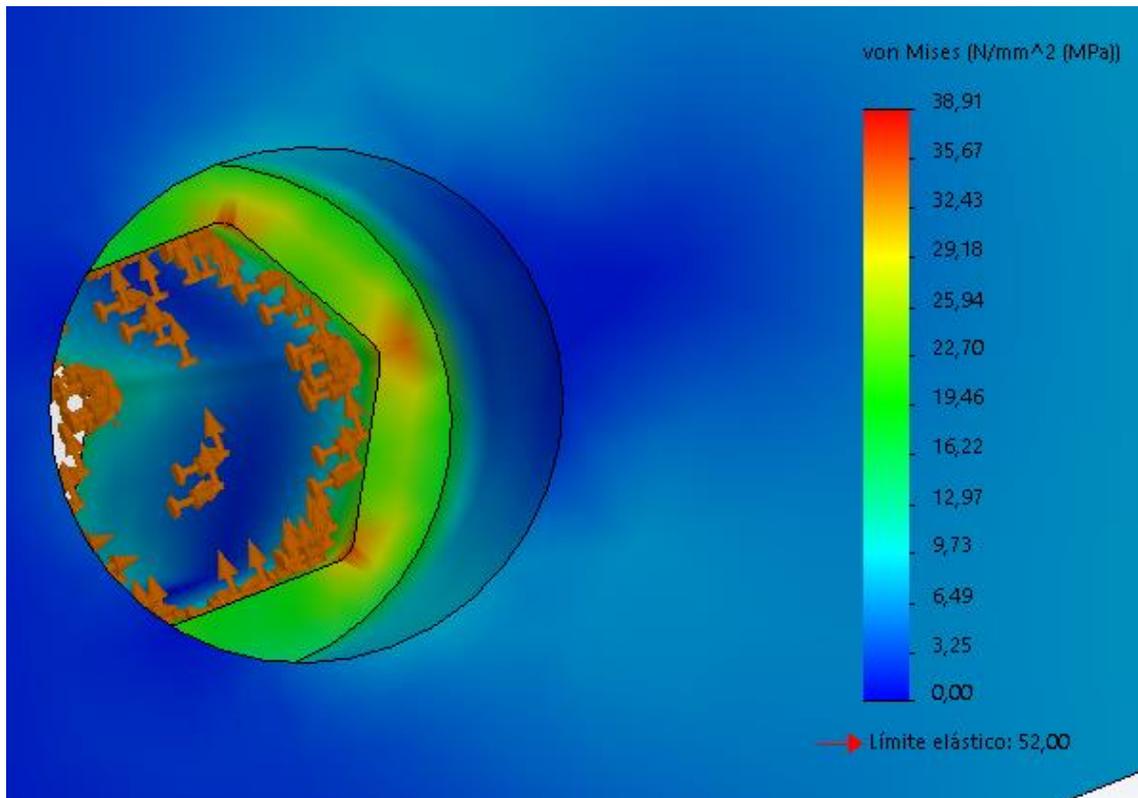


Figura 46: Tensiones Von Mises en biela de Onyx ESD con carga de 1472 N en la zona del pedalier con las mejoras en esta zona incorporadas.

Una vez realizado este pequeño ajuste, hay que tener en cuenta que no ajustará en cualquier tipo de pedalier, sino en uno específico con esta forma hexagonal. En cualquier caso, se está realizando un estudio para una posible futura fabricación con materiales aditivos, por lo que esta parte podrá ser modificada y adaptada para cualquier tipo de pedalier dependiendo de las necesidades tanto del cliente como a nivel esfuerzos.

De todas formas, aun modificando esto último la deformación sigue siendo de casi 3 mm, lo que hace replantear los materiales utilizados y su uso en este tipo de piezas, ya que, aunque se hayan llegado a resultados que no exceden el límite elástico del material las deformaciones que este sufre son inaceptables. Aun así, la biela con la que se han probado estos materiales no se podría modificar quitándole material, ya que esto haría que las deformaciones crecieran en gran medida.

Por lo tanto, se va a proponer el uso de los materiales compuestos, ya que la impresora con la que se pretende realizar la biela ofrece esta opción. Este tipo de impresión consiste en que a la vez que la impresora deposita el material utilizado como matriz, se va añadiendo fibra continúa a su vez. Se explicará esto con más detalle en el siguiente apartado.

III.4. Estudio de la biela con materiales compuestos.

Se entiende como materiales compuestos la unión de dos o más materiales para poder combinar propiedades mecánicas que serían imposibles con estos materiales por separado. Esta unión de dos o varios materiales la componen la matriz y las fibras. Se entiende como matriz la parte del material que se encarga de unir entre sí las fibras, es decir, están formadas por uniones débiles que les permiten ser moldeables y blandas con el aumento de temperatura. Esto hace que la matriz se encargue de soportar las deformaciones. Por otra parte, las fibras se encargan de resistir los esfuerzos de tracción, ya que están compuestas por materiales reforzantes como fibra de carbono, de vidrio o kevlar.

Como se introdujo en el apartado I.4.4., la fabricación aditiva permite la impresión en 3D con este tipo de materiales. Por lo tanto, se van a plantear estos materiales en esta parte del estudio, imprimiendo con matriz Onyx ESD reforzada continuamente con fibra de carbono. Esta combinación de ambos materiales aportará la resistencia del límite elástico del Onyx ESD y la resistencia a la tracción de la fibra de carbono, lo que reducirá en gran medida los desplazamientos en la biela, sobre todo en el trabajo puro a tracción en la situación de los 1472 N.

III.4.1. Obtención de las propiedades mecánicas del material compuesto.

Como se comentó con anterioridad, se estudiará la biela formada con material compuesto de Onyx ESD como matriz y fibra de carbono como refuerzo. Para obtener las propiedades mecánicas de este material se va a utilizar el *software* ElamX. Este software permite la incorporación de varias capas de cualquier material para así obtener las propiedades que se deseen de un material final compuesto. En la ficha técnica que se

obtuvieron las propiedades del Nylon y los diferentes Onyx también aparecen las propiedades de la fibra de carbono, ya que Markforged también comercializa esta fibra continua para sus impresoras.

Continuous Fiber	Test (ASTM)	Carbon
Tensile Strength (MPa)	D3039	800
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	540
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	51
Flexural Strain at Break (%)	D790 ¹	1.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	320
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960
Density (g/cm ³)	—	1.4

Figura 47: Propiedades mecánicas de la fibra de carbono.

Como se observa en la **Figura 47**, la fibra de carbono cuenta con un módulo elástico de 60000 MPa, infinitamente superior a los 3700 MPa del Onyx ESD. Cuenta con una densidad de 1,4 g/cm³ y con una deformación a rotura de tan solo 1,5%, lo que significa que es un material muy rígido que apenas deformará a diferencia del Onyx ESD que cuenta con una deformación a rotura del 25 %. El precio del material es de 126 € los 50 cm³.

Una vez sabidas las propiedades esenciales de la fibra de carbono, se procede a introducirlas en el programa, generando así dos materiales nuevos dentro de este, la fibra de carbono y el Onyx ESD. (**Figura 48**)

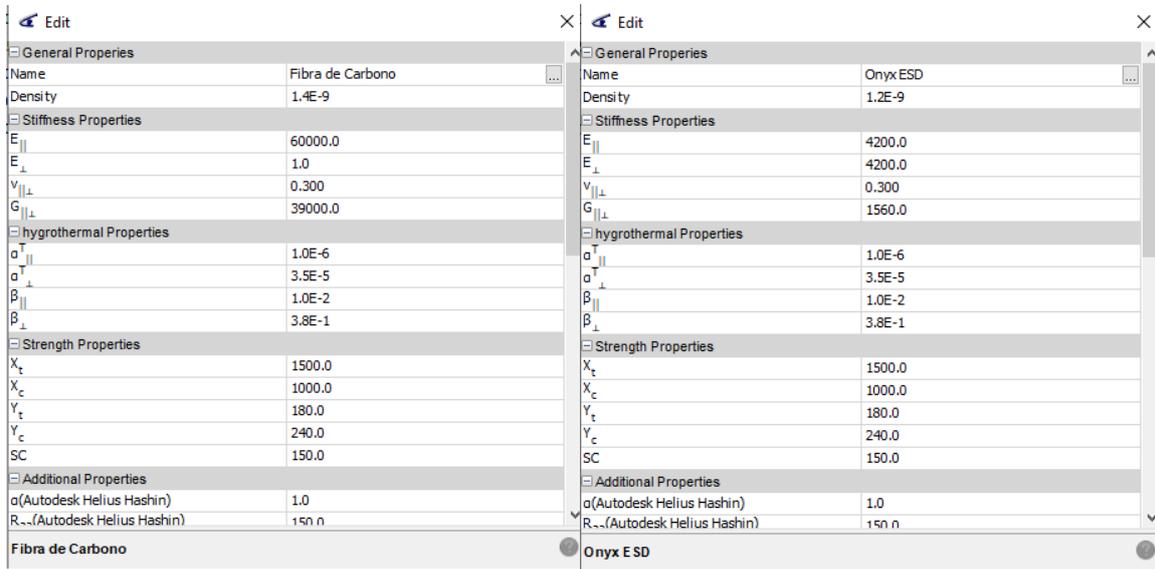


Figura 48: Introducción de los datos de ambos materiales en el *software*.

Una vez hecho esto, el programa nos da la posibilidad de añadir las capas que el usuario desee. En este caso se va a empezar por diseñar un material con 5 capas de Onyx ESD, actuando de matriz, y de 4 capas de fibra de carbono. Cada capa de Onyx tendrá un grosor de 0,4 mm y cada capa de fibra de carbono de 0,2 mm.

Las fibras se van a intercalar en diferentes ángulos para que el material se comporte de forma isotrópica. Estos van a ser 0°, 45°, -45° y 90°. En la **Figura 49** se aprecia la disposición de las capas.

Number	Name	Angle	Thickness	Material	Failure Criterion
1	New Layer	0.0	0.4	OnyxESD	Puck
2	New Layer	0.0	0.2	Fibra de Carbono	Puck
3	New Layer	0.0	0.4	OnyxESD	Puck
4	New Layer	45.0	0.2	Fibra de Carbono	Puck
5	New Layer	0.0	0.4	OnyxESD	Puck
6	New Layer	-45.0	0.2	Fibra de Carbono	Puck
7	New Layer	0.0	0.4	OnyxESD	Puck
8	New Layer	90.0	0.2	Fibra de Carbono	Puck
9	New Layer	0.0	0.4	OnyxESD	Puck

Figura 49: Disposición y grosores de las capas del material compuesto.

Una vez esto, el programa obtiene automáticamente las constantes ingenieriles. De este modo, observando la **Tabla 8** ya está todo listo para así poder introducir los datos en Solid Works y poder trabajar con el material compuesto generado.

Tabla 8: Constantes ingenieriles obtenidas del software ElamX.

CONSTANTES INGENIERILES	
Ex	12416,4 MPa
Ey	12416,4 MPa
Gxy	8695,1 MPa
Vxy	-0,204
Vyx	-0,204

Realizando una sencilla proporción, se obtiene la densidad del material compuesto sabiendo ya las densidades de los materiales que lo componen. Esta es de 1,260 g/cm³. El material, según la disposición seleccionada, se compone de un 66,66 % de Onyx ESD y un 33,33% de fibra de carbono.

En conclusión, los datos obtenidos en este software son 12416 MPa de módulo elástico en ambas direcciones y 0,204 para el módulo de Poisson. Junto a la densidad, 1,260 g/cm³ ya se tienen todos los datos necesarios para poder operar en Solid Works con el nuevo material compuesto generado.

III.4.2. Simulación mediante FEM de biela rediseñada con material compuesto.

Una vez se han obtenido las propiedades mecánicas necesarias del material compuesto, se procede a realizar la simulación de la biela rediseñada.

Tanto los anclajes como los esfuerzos que se le aplican a la biela son los mismos que en el apartado III.3. 2..

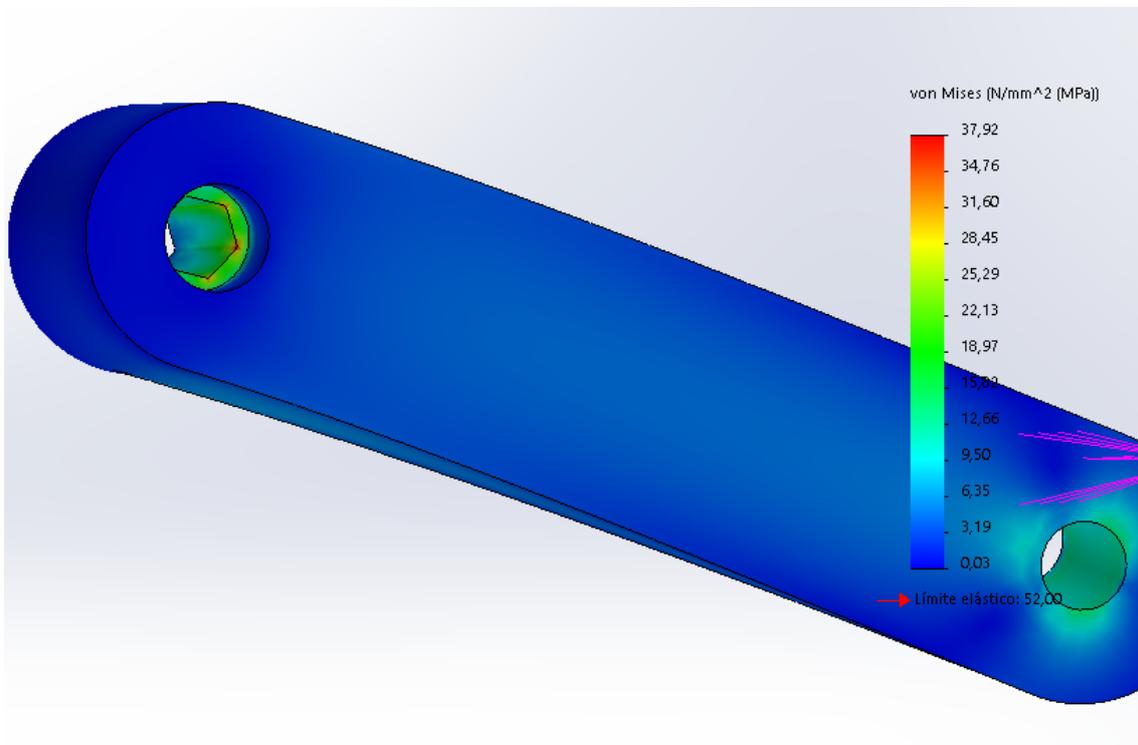


Figura 50: Tensiones Von Mises en biela de Onyx ESD con fibra de carbono con carga de 600 N.

Por lo que respecta a las tensiones con el esfuerzo de 600 N, **Figura 50**, se ven reducidas ampliamente gracias tanto a las mejoras en el anclaje que se han visto en los apartados anteriores como por el material utilizado. Estas tensiones apenas llegan a 38 MPa en su zona más comprometida, los que es más que aceptable teniendo en cuenta que el límite elástico del Onyx ESD es de 52MPa.

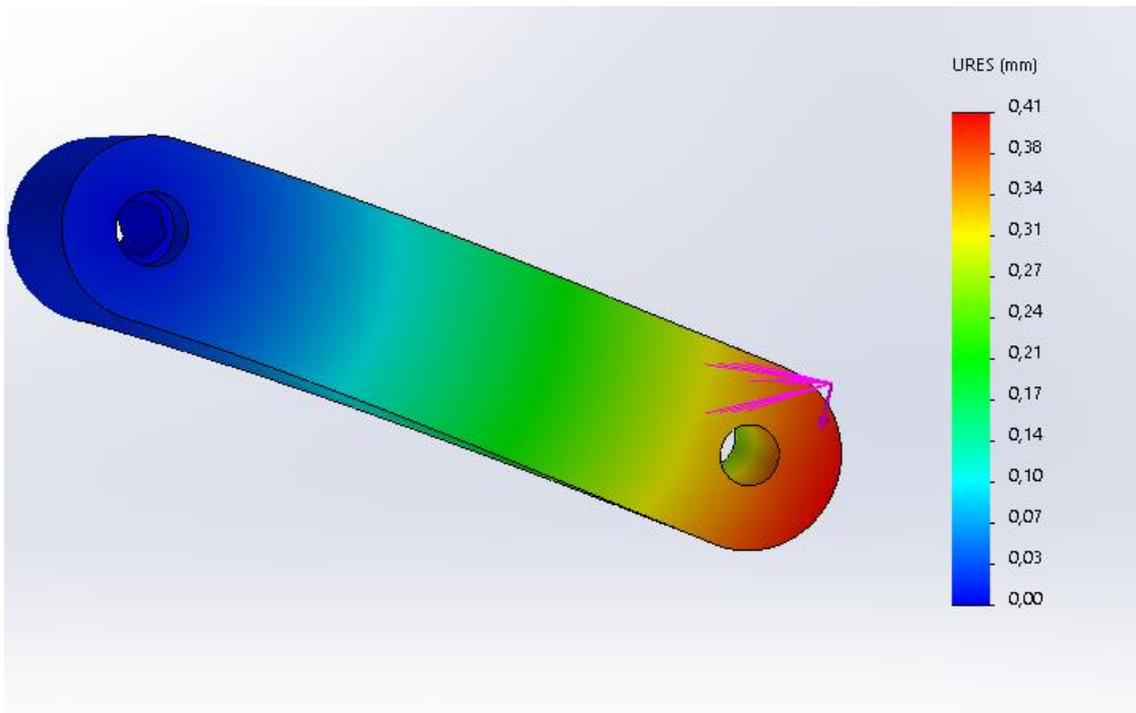


Figura 51: Deformaciones en la biela rediseñada con carga de 600 N.

Por lo que respecta a las deformaciones (**Figura 51**), estas no llegan al medio milímetro, encontrándose en un máximo de 0,41 mm de alargamiento para la parte del anclaje al pedal.

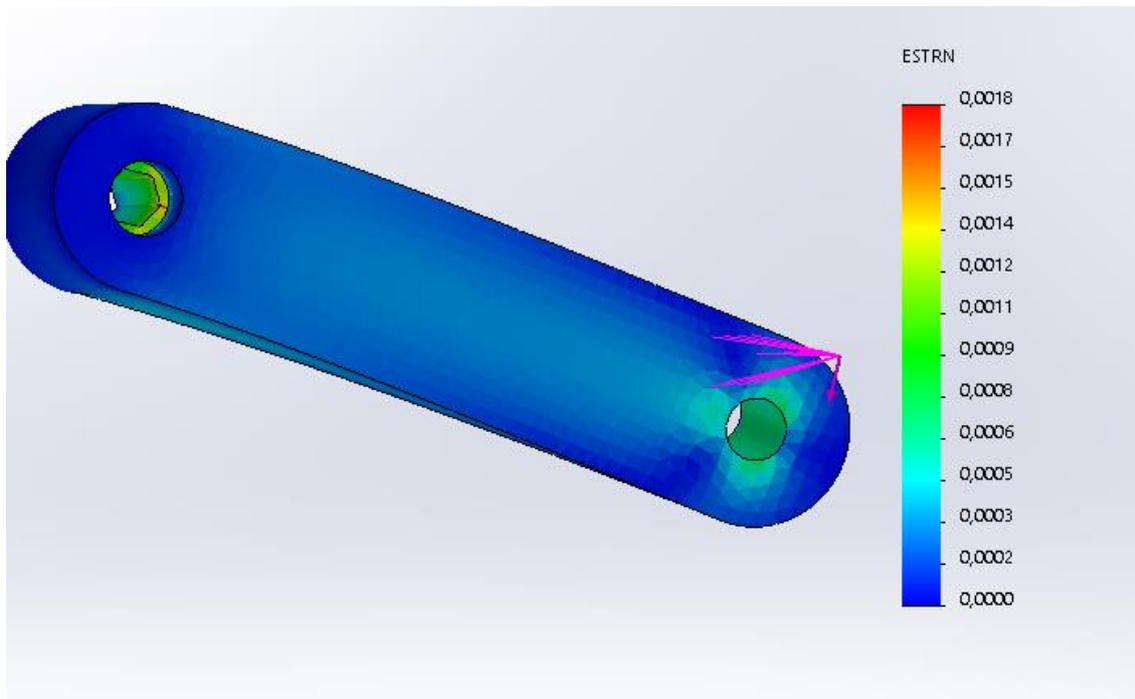


Figura 52: Deformaciones unitarias en la biela rediseñada con carga de 600N.

La deformación unitaria de la pieza, **Figura 52**, no supera los 0,002, lo que significa que la fibra de carbono soportará la fuerza aplicada, ya que este tiene una deformación a rotura del 1,5%. Este criterio se ha considerado debido a la gran diferencia que hay entre el Onyx ESD y la fibra de carbono. Mientras que el primero permite una gran deformación, la fibra de carbono tiene un comportamiento muy rígido.

Para el análisis de 1472 N se ha realizado el mismo estudio que para el de 600 N, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la **Tabla 9**.

Tabla 9: Resultados del análisis estático de 1472 N sobre el rediseño de la biela con material compuesto.

ANÁLISIS ESTÁTICO 1472 N Rediseño con material compuesto.				
Material	Límite elástico (MPa)	Tensión máx. (MPa)	Desplazamiento Máx (mm)	Deformación unitaria máx.
Onyx ESD + Fibra de Carbono	52	38,91	0,62	0,0021

Con estos resultados de ambos estudios se puede afirmar que el rediseño inicial de la biela con el material compuesto de Onyx ESD y fibra de carbono cumple perfectamente los requerimientos a los que la biela puede ser sometida en su vida útil. Sin embargo, esta pieza cuenta con un problema, y es su tamaño (Ver plano 1). En los siguientes apartados se va a intentar reducir este tamaño, y por lo tanto la masa de la misma, ya que en este rediseño inicial la masa de la pieza es de 600 gramos. Aplicando rediseños en la propia pieza se pretende ajustar la biela a un tamaño más real, ya que, aunque las distancias entre ejes y el factor Q se han respetado, la biela sería incómoda de utilizar debido a su tamaño y masa.

III.5. Diseño final de la biela.

A continuación, se pretenden realizar diversos diseños mejorados de la biela rediseñada para así poder comprobar cuál de ellos convendría más utilizar teniendo en cuenta cómo se comporta frente a los esfuerzos, el factor masa y el tamaño de la misma. Se van a realizar 4 diseños, desde el más simple hasta el más complejo y posteriormente se pondrán todos los valores que se han mencionado antes en una tabla para poder hacer una buena comparativa. La metodología de ensayo va a ser a prueba y error, es decir, realizando cambios y a su vez simulando con las cargas para ver cuáles de estos se pueden aplicar y cuáles no convendría debido a altas deformaciones en la pieza.

III.5.1. Diseño N°1.

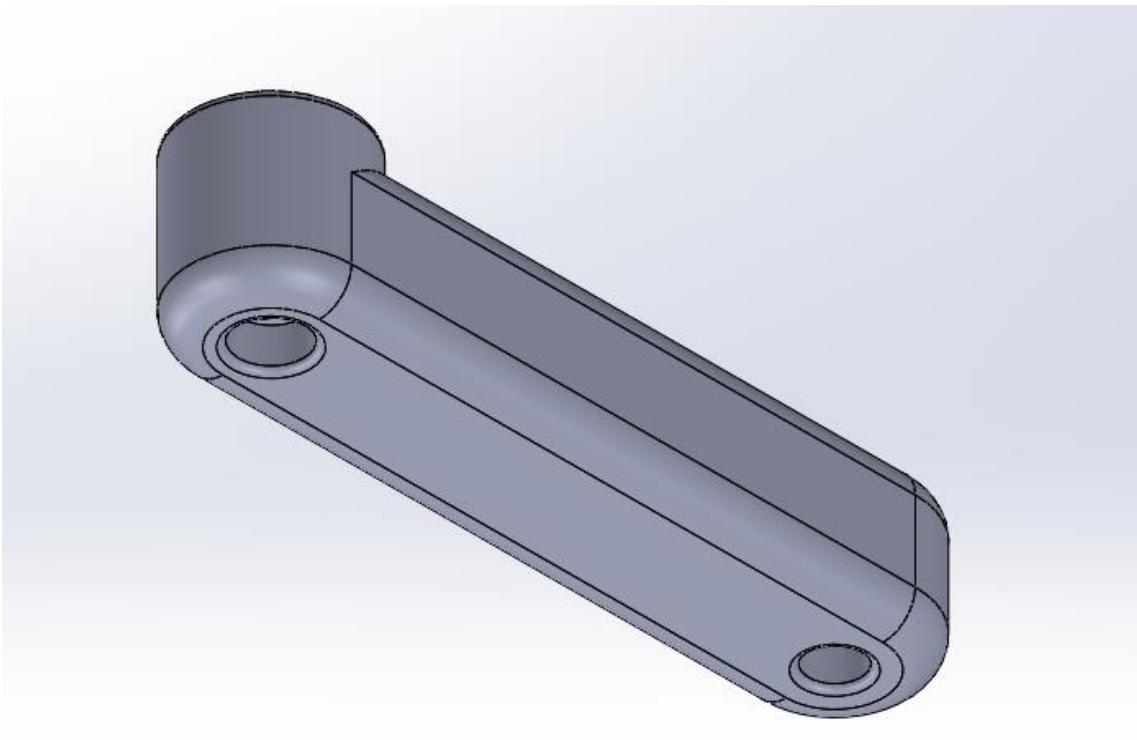


Figura 53: Diseño N.º 1.

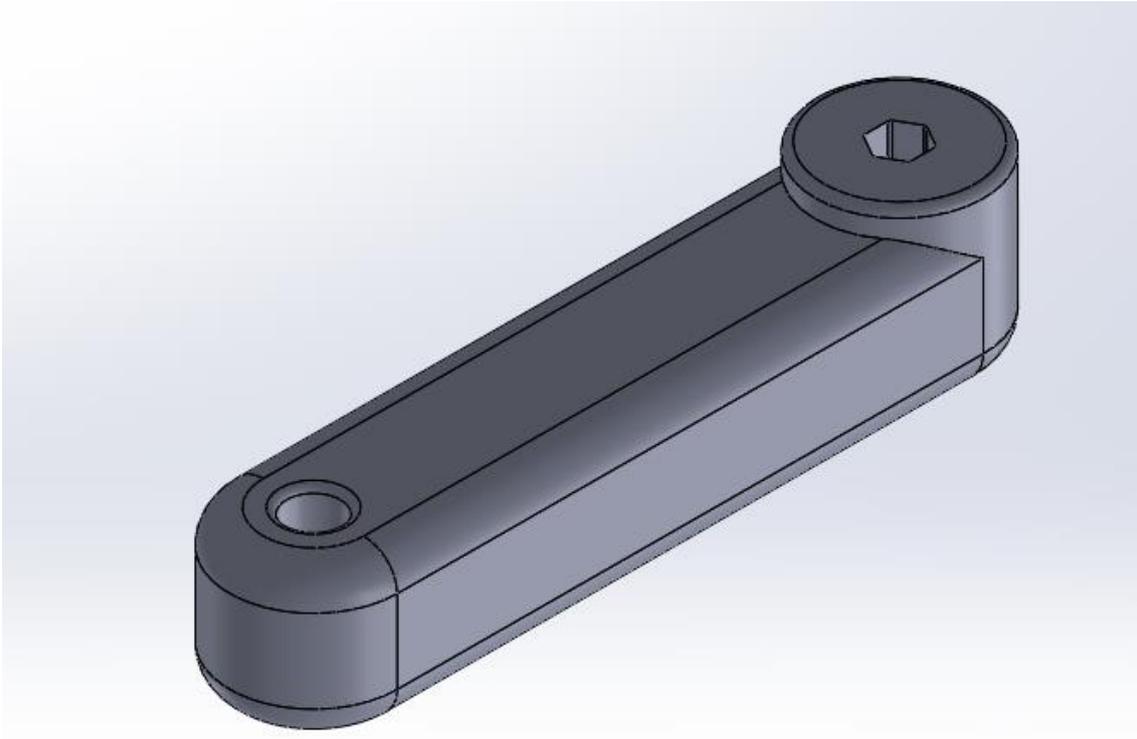


Figura 54: Diseño N.º 1.

Este primer diseño realizado, **Figura 53** y **Figura 54**, es el más simple con relación al rediseño que se ha tomado como referencia del apartado III.3.1. Simplemente se han realizado redondeos de 10 mm de radio en todas sus caras anguladas y radios de 2 mm en el hueco del eje del pedal y de la rosca que sujeta al pedalier, sin modificar ninguna otra forma o cara. Pese que puede ser que sea la que mejor soporte los esfuerzos, sin duda será la más pesada y de un tamaño mayor.

III.5.1. Diseño N°2.

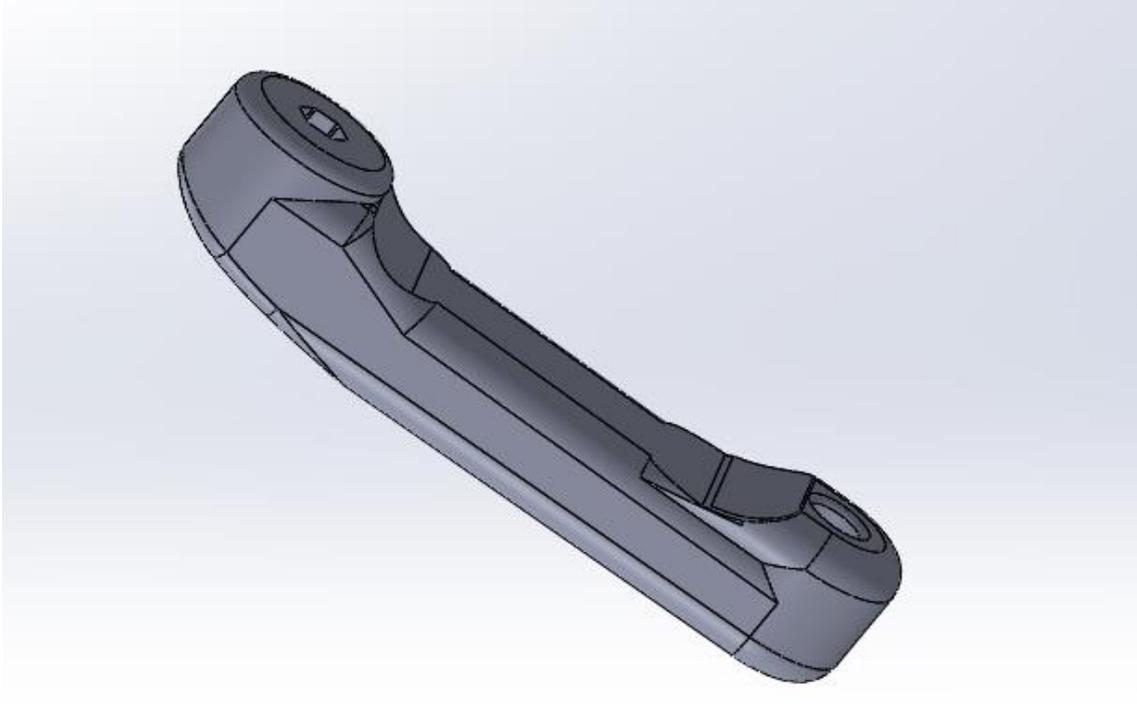


Figura 55: Diseño N.º 2.

En este segundo diseño, **Figura 55** y **Figura 56**, se han realizado más mejoras además de los redondeos. Se ha reducido el grosor de la biela en casi toda su totalidad, exceptuando la zona de ambos anclajes. En la zona del anclaje al pedalier se ha reducido la zona donde sujeta la rosca, ya que había bastante material para poder quitar. Esto no afectaría en nada a la integridad de la sujeción de la rosca, ya que solamente sobresaldría un poco del propio protector de esta. Sin embargo, sí que puede tener efectos en la deformación de la pieza, ya que se le ha quitado material de una zona que en el esfuerzo de 1472 N que se encuentra a tracción. También se observa claramente como sin reducir la zona de anclaje se ha quitado material en el protector de la rosca.

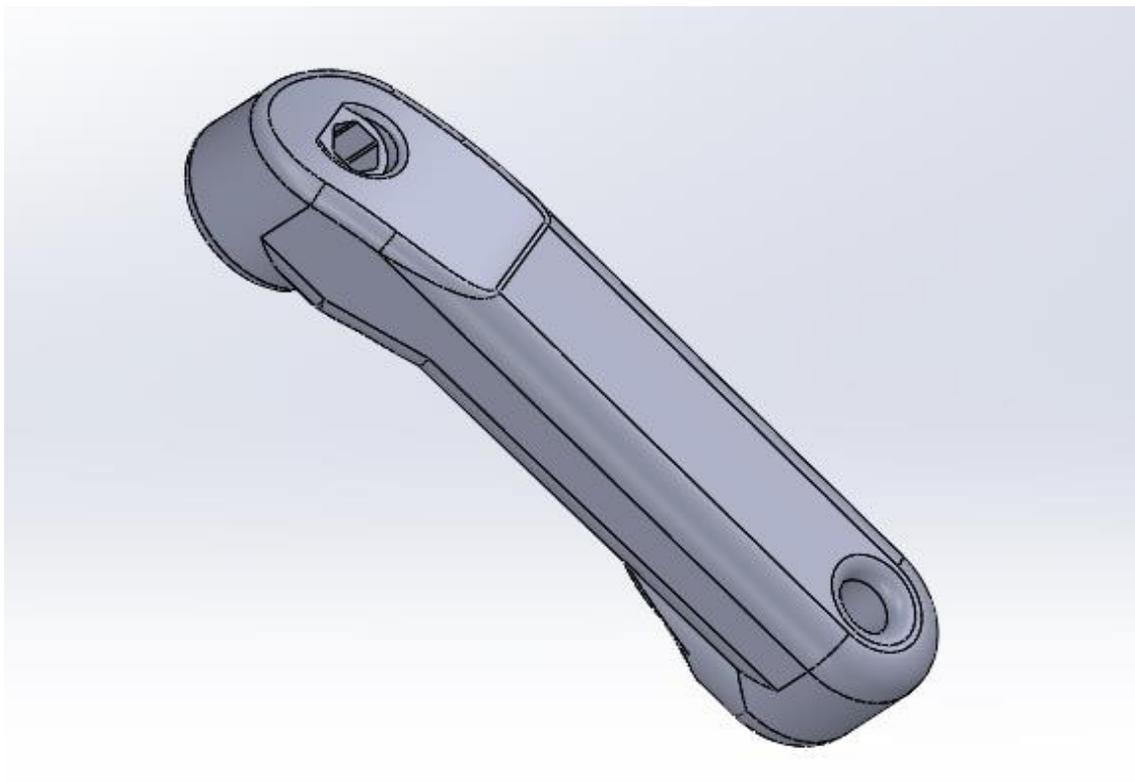


Figura 56: Diseño N.º 2.

III.5.3. Diseño N°3.

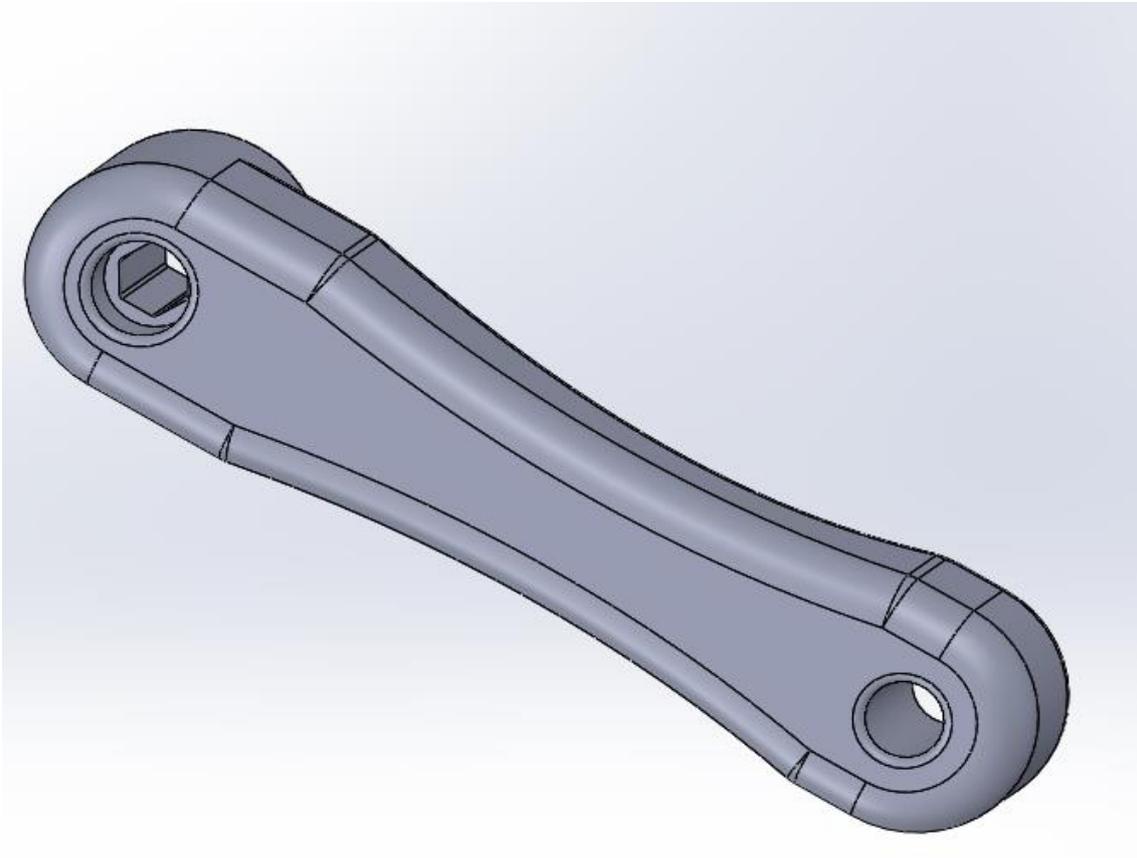


Figura 57: Diseño N.º 3.

En este tercer diseño, **Figura 57** y **Figura 58**, se ha optado, además de redondeos de cantos y anclajes, a reducir ambas secciones. Estas reducciones se han realizado mediante la función *spline* que tiene Solid Works. Este diseño puede que sea el que más se parece a una biela típica metálica, aunque con mayor masa y mayor tamaño que estas. De nuevo no se toca nada de los anclajes, ya que este es el diseño que mejor soporta los esfuerzos.

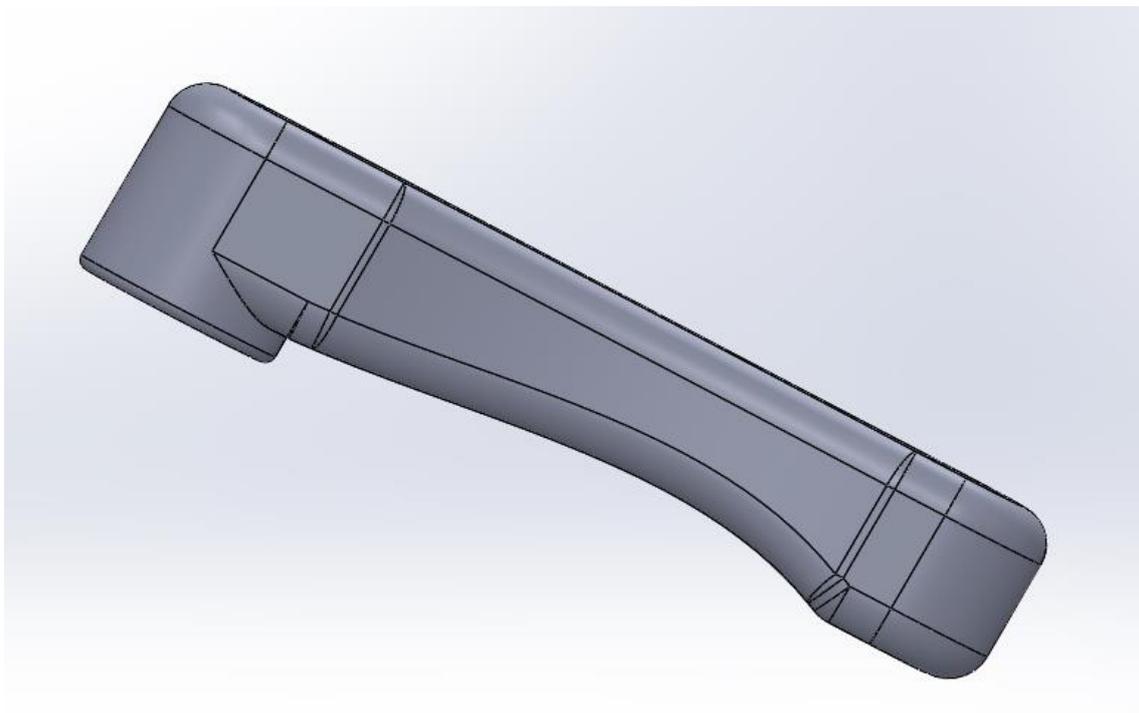


Figura 58: Diseño N.º 3.

III.5.4. Diseño N^o4.

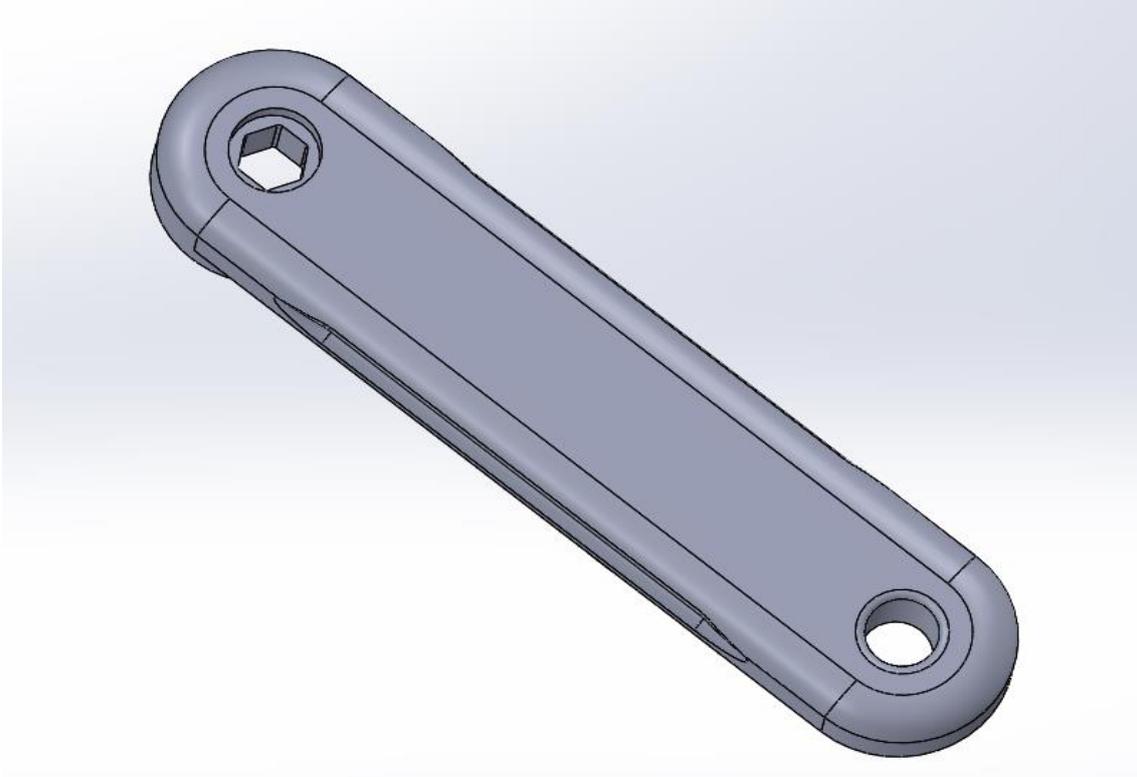


Figura 59: Diseño N.^o 4.

En este último diseño, **Figura 59** y **Figura 60**, al igual que en el anterior se ha realizado una reducción de sección de la biela, sin embargo, tan solo en la parte lateral de la misma. De nuevo los cantos de los anclajes se redondean con un radio de 2 mm. El cambio más significativo en este diseño viene en el hueco que se ha dejado en el lateral de esta. En la se aprecia como se realiza una sección de 8 mm de ancho por 114 mm de largo. Este hueco ayudará en gran medida a reducir significativamente el peso de la pieza. Sin embargo, queda por ver en la simulación por FEM si este cambio tan brusco va a afectar en gran medida al desplazamiento de la pieza una vez se le apliquen las cargas a estudiar.

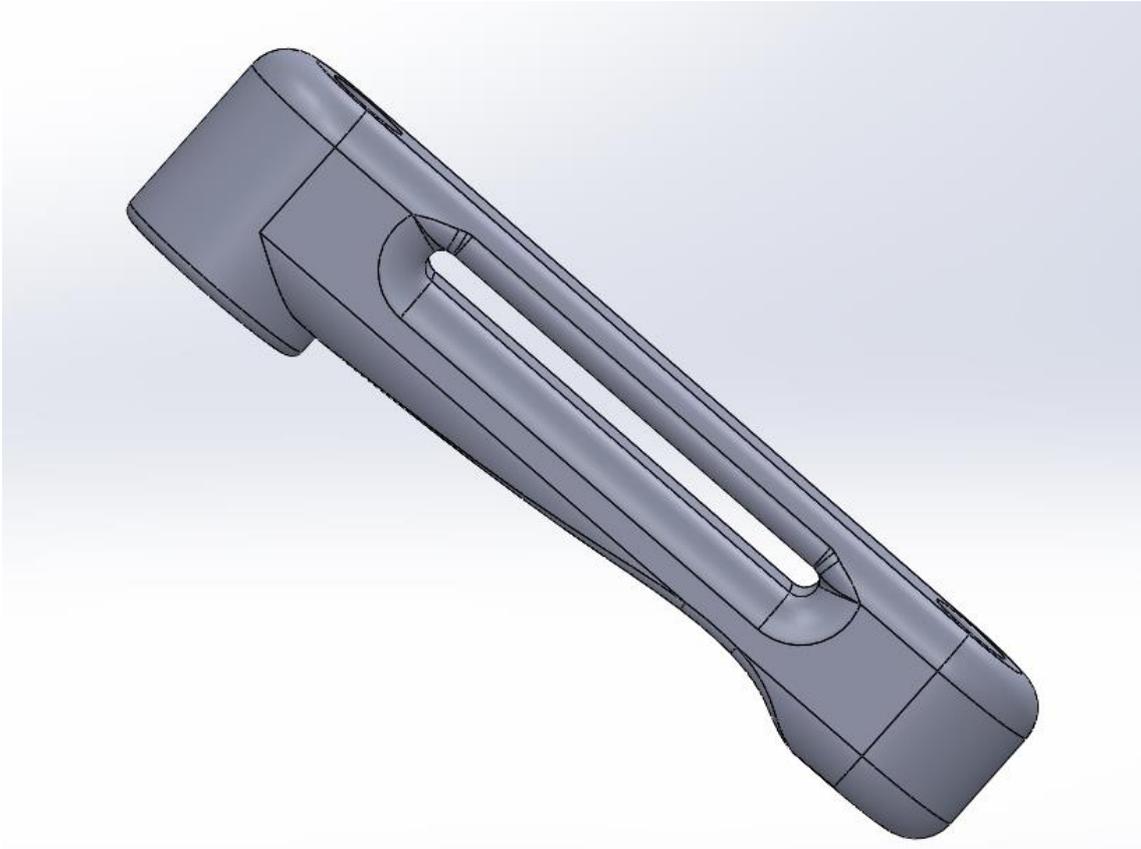


Figura 60: Diseño N.º 4.

III.5.5. Análisis de los resultados.

De nuevo, para hacer una comparativa de resultados de los 4 diseños planteados, se realizan tablas comparativas. En estas tablas aparecerán tensiones máximas, desplazamientos máximos, deformaciones unitarias, factor de seguridad y referencias a los planos. De este modo se podrán observar los datos de los resultados obtenidos a la par que los planos, para así poder seleccionar objetivamente la biela que mejor adapte a las necesidades impuestas.

Como en todas las ocasiones anteriores, se realizan dos estudios, el estudio de 600 N aplicado en el eje perpendicular a la biela y el de 1472 N aplicado al eje simétrico. Las sujeciones y distribuciones de la carga se mantienen igual que en los apartados anteriores. En la **Tabla 10** se presentan los datos del estudio con carga 600 N y en la **Tabla 11** el estudio de 1472 N.

Tabla 10: Resultados análisis 600 N.

Diseño	Diseño Nº1	Diseño Nº2	Diseño Nº3	Diseño Nº4
Tensión Máx. (MPa)	37,91	37,74	37,74	37,76
Desplazamiento Máx. (mm)	0,42	0,50	0,60	0,58
Deformación unitaria	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
Factor de seguridad Mín.	1,37	1,38	1,38	1,41
Masa (Kg)	0,58	0,47	0,48	0,48
Número de plano	1	2	3	4

Tabla 11: Resultados análisis 1472 N.

Diseño	Diseño Nº1	Diseño Nº2	Diseño Nº3	Diseño Nº4
Tensión Máx. (MPa)	38,53	38,98	38,99	38,90
Desplazamiento Máx. (mm)	0,66	1,26	1,03	0,79
Deformación unitaria	0,0022	0,0024	0,0023	0,0023
Factor de seguridad Mín.	1,35	1,12	1,33	1,31
Masa (Kg)	0,58	0,47	0,48	0,48
Número de plano	1	2	3	4

Ninguno de estos cuatro diseños rebasa el límite elástico del Onyx ESD, establecido en 52 MPa como se ha comentado anteriormente, ni el alargamiento máximo del 1,5 % de la fibra de carbono.

Con todos estos datos que se han obtenido, se llega a la conclusión de que el mejor diseño para llevar a la realidad, pese a sus evidentes defectos de tamaño, peso y desplazamiento es el diseño número 4. Este diseño cuenta con un desplazamiento máximo de 0,58 mm para el esfuerzo de 600 N y de 0,79 mm para el esfuerzo mayor de 1472 N. Este desplazamiento pese a ser bastante pequeño y prácticamente imperceptible puede que de problemas a la larga debido a las fatigas sufridas por el material. En cuanto a deformación unitaria este diseño queda en menos de un 0,25 %, lo que es más que aceptable si ponemos en perspectiva el alargamiento máximo de la fibra de carbono mencionado anteriormente. En cuanto al factor de seguridad se encuentra por encima de los otros diseños, aun así, es un factor que no inspira mucha fiabilidad, ya que este es de 1,31 en sus puntos mínimos, lo que está por debajo del modelo en aluminio. La masa es de 0,48 kg, lo que la sitúa bastante por debajo del diseño número 1 y a la par que los otros dos diseños. Lo mismo ocurre con el tamaño de esta.

III.6. Fabricación.

Una vez se tiene seleccionado el diseño final de la biela, se procede a su desarrollo para su fabricación mediante el empleo de tecnologías aditivas. Como se comentó anteriormente, se va a utilizar para la fabricación de la pieza una impresora 3D de la marca Markforged, modelo X7. Este modelo es específicamente el que permite la impresión del Onyx ESD con refuerzo de fibra de carbono. No se va a llegar a imprimir la pieza como tal, debido a su gran tamaño y al precio del material, sin embargo, se va a realizar todo el proceso previo a la fabricación. Esto consiste en procesar la pieza en el *software* que la propia marca pone a disposición de los clientes para poder introducir todos los datos que se necesitan, faltando como último paso la propia impresión de la pieza.

En primer lugar, se ha de cargar la biela dentro del *software*, seleccionar la impresora con la que se pretende trabajar y los materiales con los que se pretende imprimir. Con esto el propio programa nos permite visualizar la pieza y empezar a trabajar con ella (Figura 61).

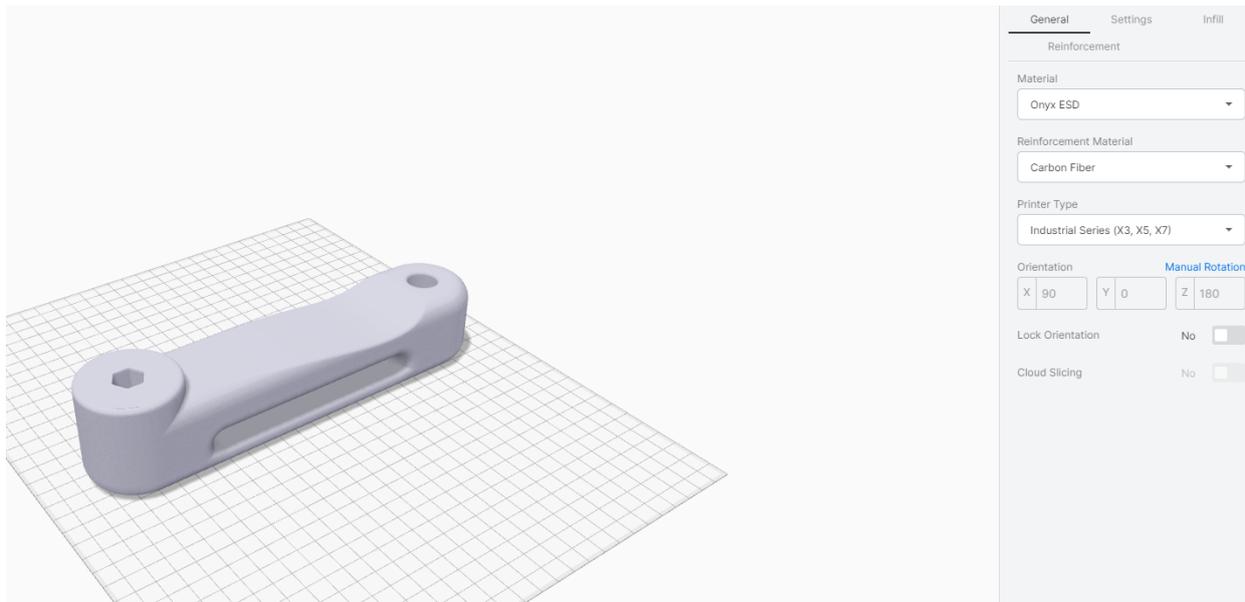


Figura 61: Pieza a trabajar cargada dentro del *software* e introducción de datos iniciales.

Posteriormente, se selecciona el porcentaje de relleno que se desea tener en la pieza, en este caso será un relleno del 100 %, es decir, no habrá huecos dentro de la biela, a excepción del propio hueco que se ha diseñado. Una vez esto, se seleccionan los parámetros del refuerzo de fibra que ha de tener. En este caso, tal y como se mencionó en el apartado de la obtención de las propiedades mecánicas del material, se va a realizar un refuerzo isotrópico con ángulos de 0° , 45° , -45° y 90° . Con esto se pretende hacer el material resistente en todas las direcciones posibles en los que se le quiera aplicar el esfuerzo. Estas capas van a ser de 2 milímetros e irán dispuestas cada 4 milímetros en el Onyx ESD. En la **Figura 62** se aprecia la disposición de -45° en la fibra de carbono, mostrando así una de las capas que se encuentran a mitad de la pieza.



Figura 62 : Vista de la disposición de las fibras a -45° .

Una vez fijados todos estos parámetros, la pieza ya está lista para ser impresa. El software representa esta encima de la cama de la impresora que se le ha seleccionado con anterioridad, para de esta forma ver si es conveniente cambiarla de lugar por motivos de espacio. También muestra el volumen tanto del Onyx ESD como de la fibra

de carbono, al igual que el tiempo estimado, 2 días y 12 horas y el coste total de ambos materiales, ascendiendo este a 437,23 €. Todo esto se puede apreciar en la **Figura 63**.

Una vez hecho todo este proceso tan solo habría que esperar a que la impresora terminara el proceso. Cabe destacar que los volúmenes del material utilizado son un poco mayores a los de la biela final debido a la base que la impresora debe hacer en el hueco de la pieza para poder trabajar la zona alta de esta. También el precio de esta es excesivo debido al carbono, ya que tiene un precio muy elevado en comparación con el Onyx ESD.

Cuando se tenga la pieza final se le debe de realizar un post-procesado para definir las roscas de sujeción del pedal y del pedalier. Esta no se realiza en impresión 3D debido a los problemas que puede presentar esta parte, ya que es una zona bastante fina y se necesitan de herramientas de precisión. Esta se realiza con una terraja de roscar y un macho, ya que al ser un material polimérico no hay complicaciones a la hora de realizar una rosca a mano. Dependiendo del tipo de rosca que quiera el cliente se realizará una u otra. En este caso se va a utilizar la rosca métrica.

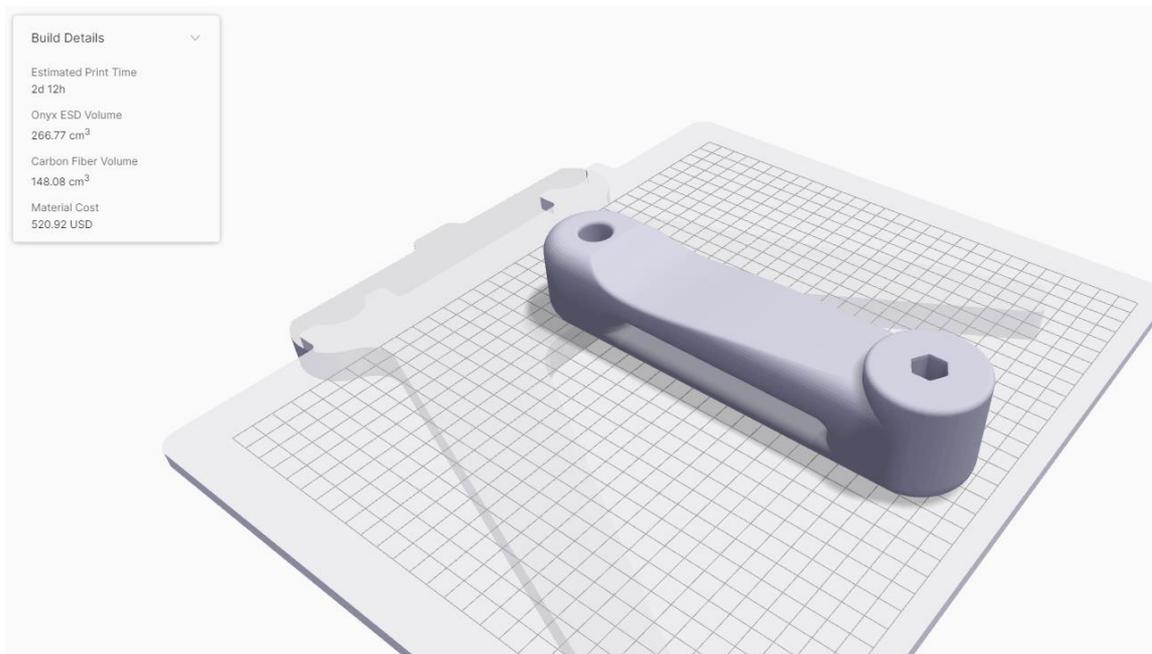


Figura 63: Datos técnicos de la impresión y vista de la pieza en la cama de la impresora.

III.7. Estudio económico.

Para la realización del estudio económico de este proyecto se van a tener en cuenta varios factores que han sido determinantes para la realización de este. Los factores a tener en cuenta en este apartado van a ser la cantidad de horas del proyecto, el coste del material utilizado y el precio de la electricidad que la impresora va a consumir durante el tiempo que esta tarde en realizar la pieza.

En primer lugar, se presenta el coste de tiempo que ha tenido este estudio y la fabricación. El tiempo empleado tanto para el diseño de la pieza inicial como para los rediseños y simulaciones mediante FEM ha sido de aproximadamente 30 h. Suponiendo que el convenio de un graduado en ingeniería sitúa el precio por hora en 14,50 esto supone un coste de 435 €. El tiempo que la impresora está en marcha no se tiene en cuenta dado que no se necesita una persona fija para que esta trabaje, sin embargo, se contarán 3 horas más para la preparación de la impresora, la puesta a punto de esta mediante el software utilizado en el apartado anterior de fabricación y la realización de roscas. Con todo esto, se suma un coste total de tiempo de 33 h, lo que suponen 478,50 €.

En segundo lugar, hay que contar el coste en material. Este nos lo da el software automáticamente al cargar la pieza e introducirle todos los parámetros que se desean. El coste total de la pieza es de 436,32 €, lo cual se desglosa en 2 precios, el del Onyx ESD y el de la fibra de carbono. El Onyx ESD tiene un volumen final en la pieza de 266,77 cm³, lo que supone un coste de 63,35 € teniendo en cuenta que el precio del Onyx ESD es de 190 € los 800 cm³. Del mismo modo, la fibra de carbono cuenta con un volumen en la pieza de 148 cm³, lo que son 372,96 €, ya que la fibra de carbono cuenta con un precio de 126 € los 50 cm³.

Por último, el precio del consumo de la impresora se calculará con las horas que esta estará encendida realizando la pieza. Esta estará unas 36 horas en marcha. La impresora tiene un consumo de 150 W, por lo que suponiendo una media en España de 0,157 €/kWh con la tarifa variable por horas, supone 0,85 € en total.

Con todo esto, la pieza final tendría un coste total de 901,14 €. Cabe destacar que este sería el precio final de la 1ª pieza, ya que si se realizaran más piezas iguales habría que restarle las 30 h de diseño. Por ejemplo, para un par de bielas producidas el precio total serían los 901,17 € de la 1ª pieza más 437,17 € de la segunda, tan solo contando el material y el coste eléctrico.

Todo esto queda reflejado más detalladamente en la **Tabla 12**.

Tabla 12: Estudio económico por pieza producida.

	Tiempo
Horas diseño y simulaciones	30,00
Horas preparación impresora y realización de roscas	3,00
Total horas	33,00
Precio por h (€)	14,50
Total (€)	478,50
	Material
Coste Onyx ESD (€/cm ³)	0,24
Volumen empleado (cm ³)	266,77
Total Onyx ESD (€)	63,36
Coste fibra de carbono (€/cm ³)	2,52
Volumen empleado (cm ³)	148,00
Total fibra de carbono (€)	372,96
Total material (€)	436,32
	Consumo eléctrico
Tiempo de impresión (h)	36,00
Consumo de la impresora (W)	150,00
Precio kWh	0,16
Total (€)	0,86
Total por pieza impresa (€)	915,68

III.8. Conclusiones.

Como se ha podido observar a lo largo de este proyecto, los resultados obtenidos no han sido muy prometedores. Ciertamente es que por ensayo y error se ha llegado a una biela fabricada de materiales compuestos con tecnologías aditivas que es perfectamente válida y cumple con los esfuerzos a los que va a ser sometida a lo largo de su vida útil.

Se ha comenzado a realizar este trabajo con el propio diseño de la biela de partida que se ha tomado como modelo, sin embargo, para alcanzar los diferentes diseños finales que cumplen con las solicitaciones mecánicas, se ha tenido que realizar un rediseño de la geometría que ha dado lugar como consecuencia a un incremento de la masa final de los prototipos propuestos. Con el objetivo de optimizar el diseño y poder llegar a resultados aceptables, se propone utilizar fibra de carbono continua para la fabricación de estas. Para ello, se ha utilizado ElamX para determinar de forma teórica las propiedades cuando se combina el Onyx ESD y la fibra continua.

A pesar de los esfuerzos realizados para lograr optimizar el diseño, el resultado final muestra que la pieza final tiene una masa superior a la de una biela convencional. Mientras que no ha habido problemas en las tensiones y los pocos que han surgido han podido resolverse con relativa facilidad, las deformaciones sí que han sido muy problemáticas, teniendo que introducir más material del deseado en un primer momento. Mientras que una biela de aluminio de la mitad de masa cumpliría perfectamente, siendo la densidad de este material mucho mayor que el compuesto que se ha usado, $2,7 \text{ g/cm}^3$ frente a los $1,27 \text{ g/cm}^3$ del Onyx ESD con la fibra de carbono, se ha llegado a la conclusión que el Onyx ESD y la fibra de carbono, materiales que están a la vanguardia en temas de fabricación aditiva, no han llegado a los resultados esperados. Mientras que el aluminio del tipo 2014 tiene un módulo elástico de 73000 MPa y un límite elástico de 430 MPa , el Onyx ESD y la fibra de carbono cuentan con un módulo elástico de 12416 MPa y un límite elástico de 52 MPa . Todo esto ha dado que para lograr una biela que tenga una deformación en un rango aceptable, la sección de la misma ha tenido que subir en gran medida. También ha sido necesario que esta sección sea mayor para

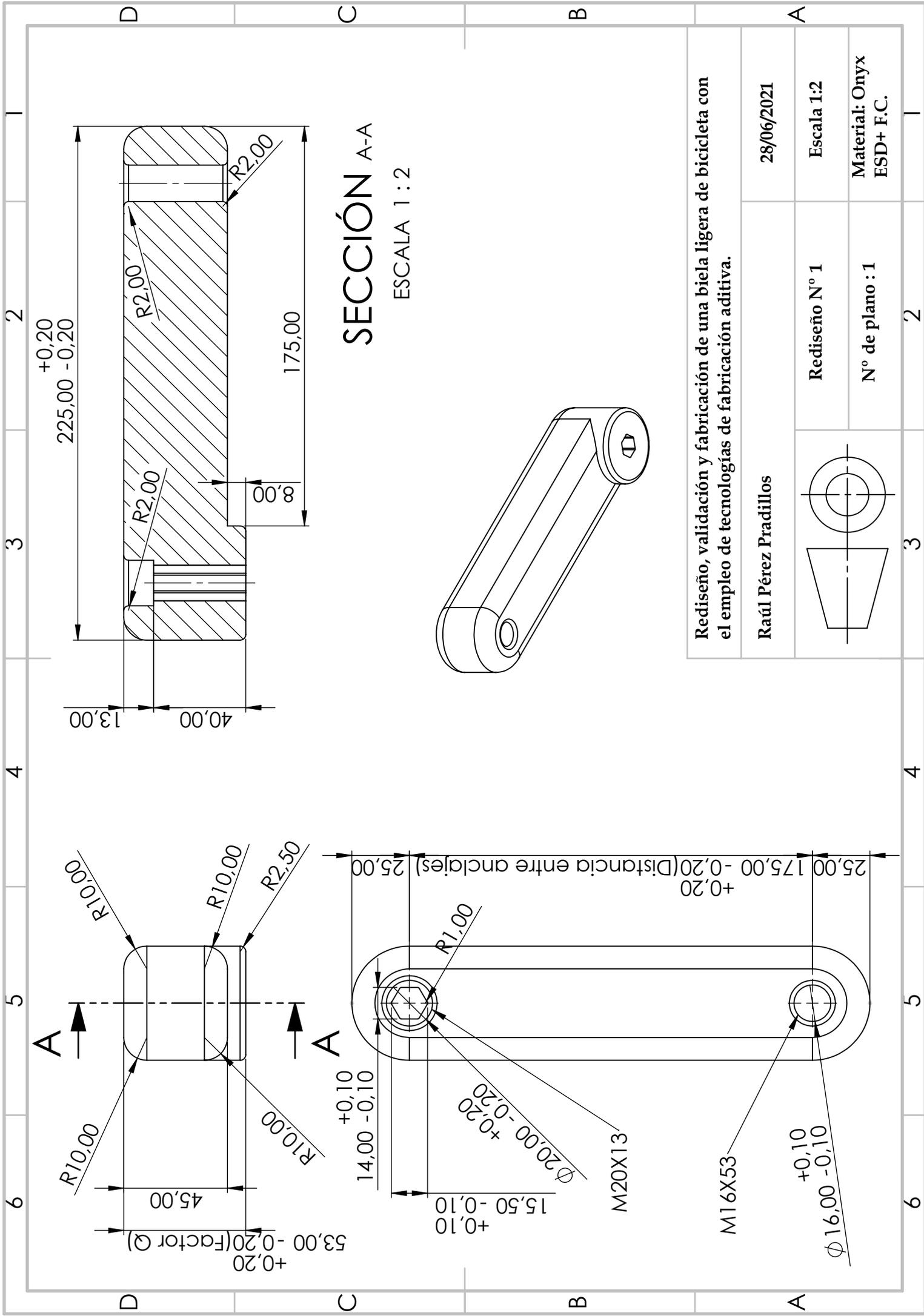
logra soportar los esfuerzos mecánicos a los cuales va a estar sometido el componente sin que se produzca la rotura.

Cabe destacar que la utilización de los materiales mencionados para la fabricación de la biela supone un alto incremento del coste. Esto se debe en principal medida en el formato en el que se pueden utilizar dentro de esta impresora. Se trata de un equipo de código cerrado y por lo tanto se deben de adquirir los materiales a fabricante que suministra la impresora. El coste adquisición de cada una de las bobinas es bastante elevado y unido al alto consumo de materiales hace los costes superen con creces las de una biela convencional.

Pese a todo esto, a lo largo de este estudio también se han visto algunas ventajas que presenta este tipo de fabricación con estos materiales en una biela de bicicleta. Es un método relativamente sencillo de fabricación, puesto que unos pocos conocimientos en el programa de impresión bastan para poder fabricarla. También es relativamente fácil adaptar la biela a las necesidades del ciclista. Tanto la longitud de los anclajes para pedal y pedalier como el factor Q , pasando por un cambio de roscas o cualquier otro rediseño en la propia biela son posibles sin mucha dificultad, ya que con un simple cambio en estos parámetros se puede volver a imprimir otra biela sin mucho esfuerzo.

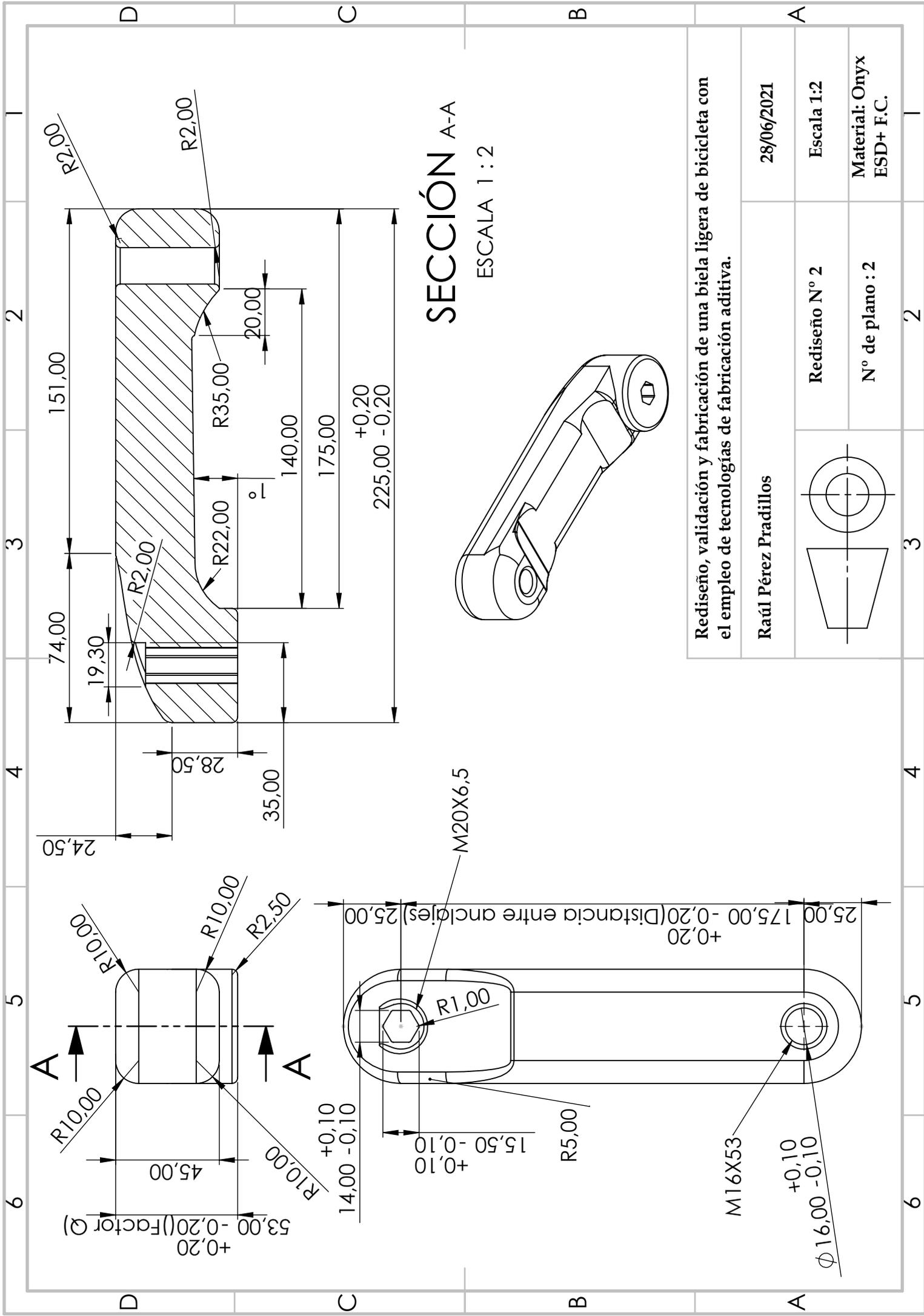
IV. APÉNDICES

IV.1. Planos acotados.

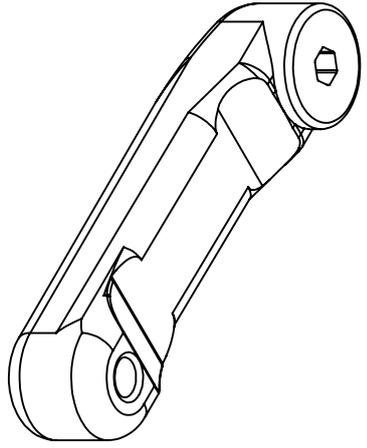


SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

Rediseño, validación y fabricación de una biela ligera de bicicleta con el empleo de tecnologías de fabricación aditiva.		28/06/2021
Raúl Pérez Pradillos	Rediseño N° 1	Escala 1:2
	N° de plano : 1	Material: Onyx ESD+ F.C.



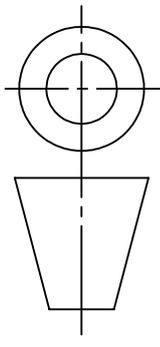
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2



Rediseño, validación y fabricación de una biela ligera de bicicleta con el empleo de tecnologías de fabricación aditiva.

Raúl Pérez Pradillos

28/06/2021

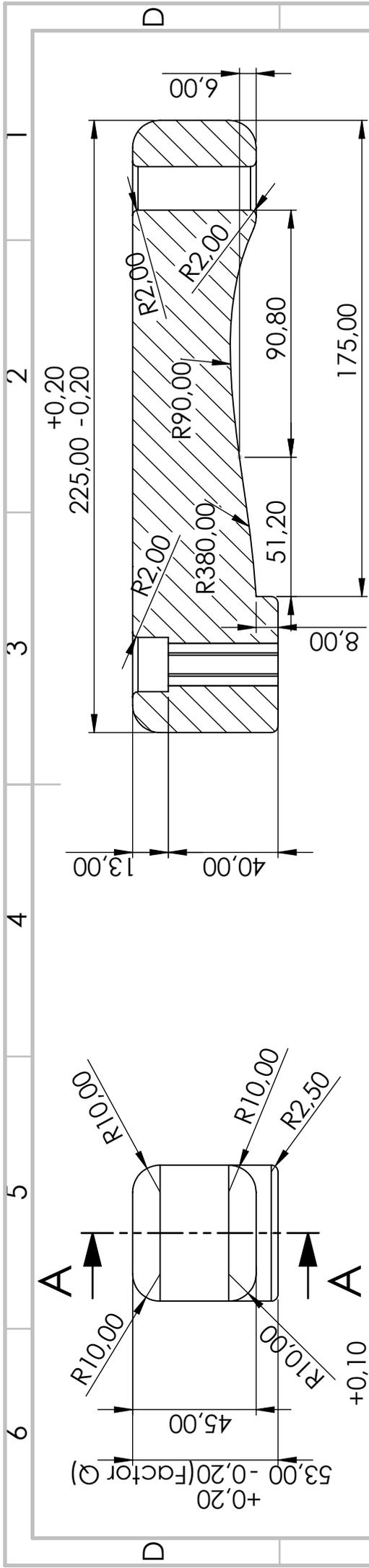


Rediseño N° 2

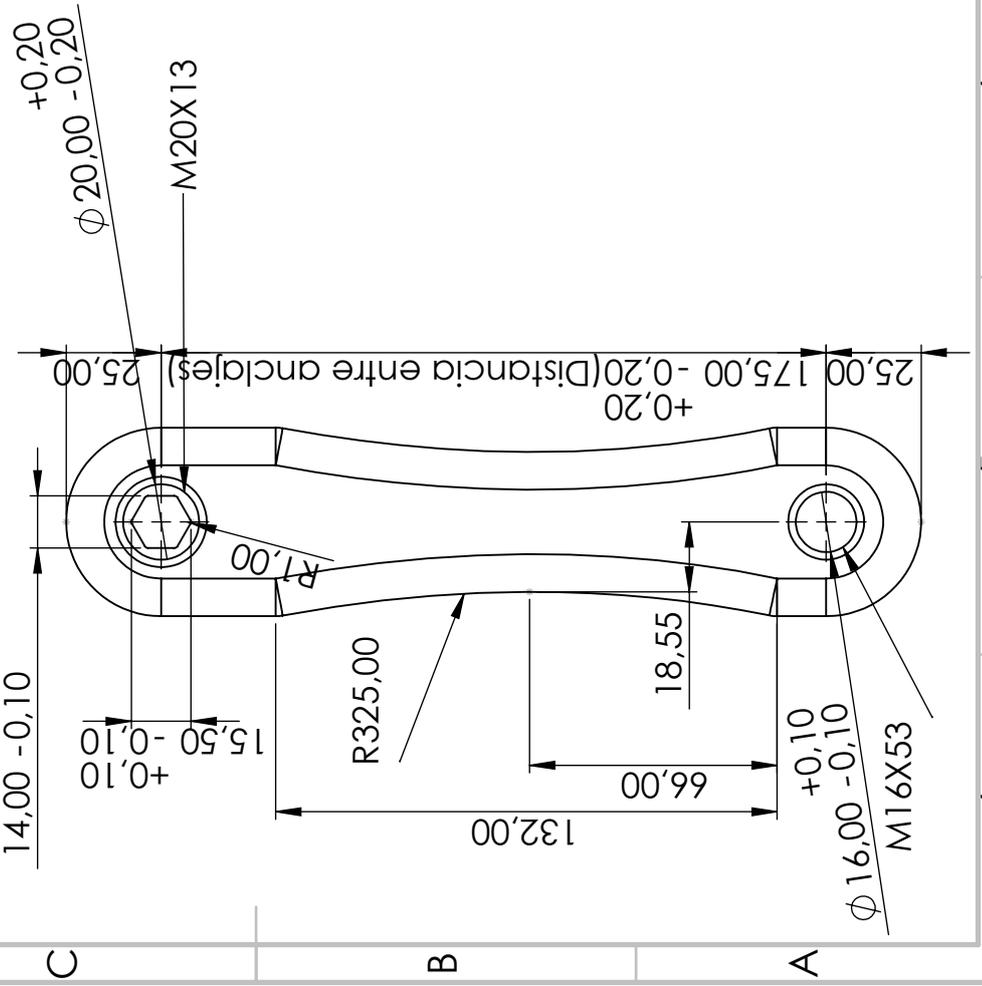
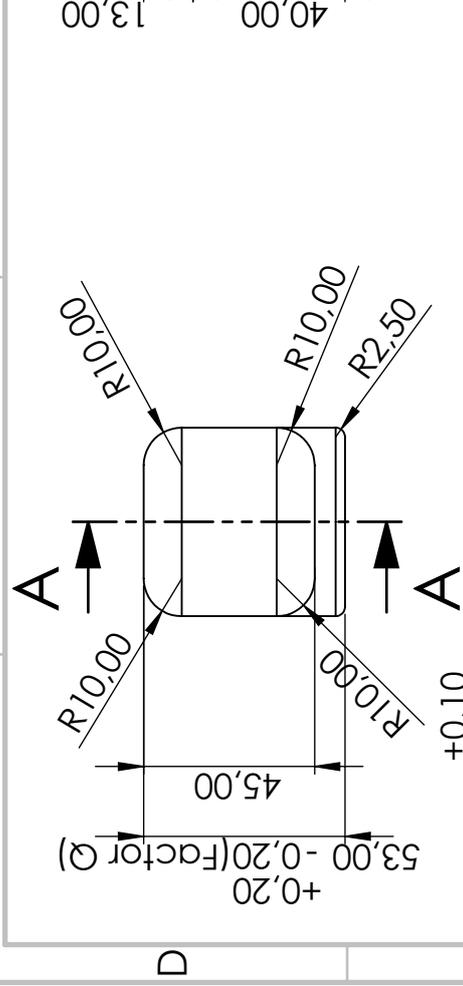
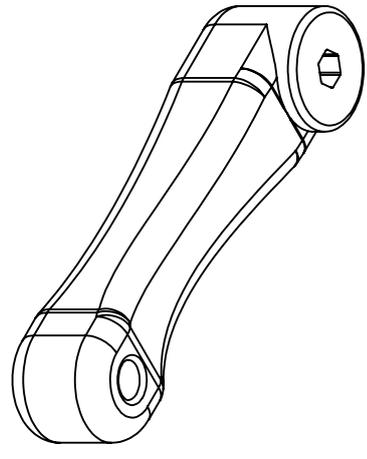
Escala 1:2

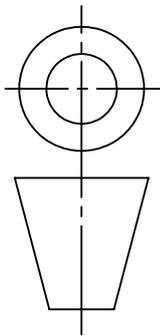
N° de plano : 2

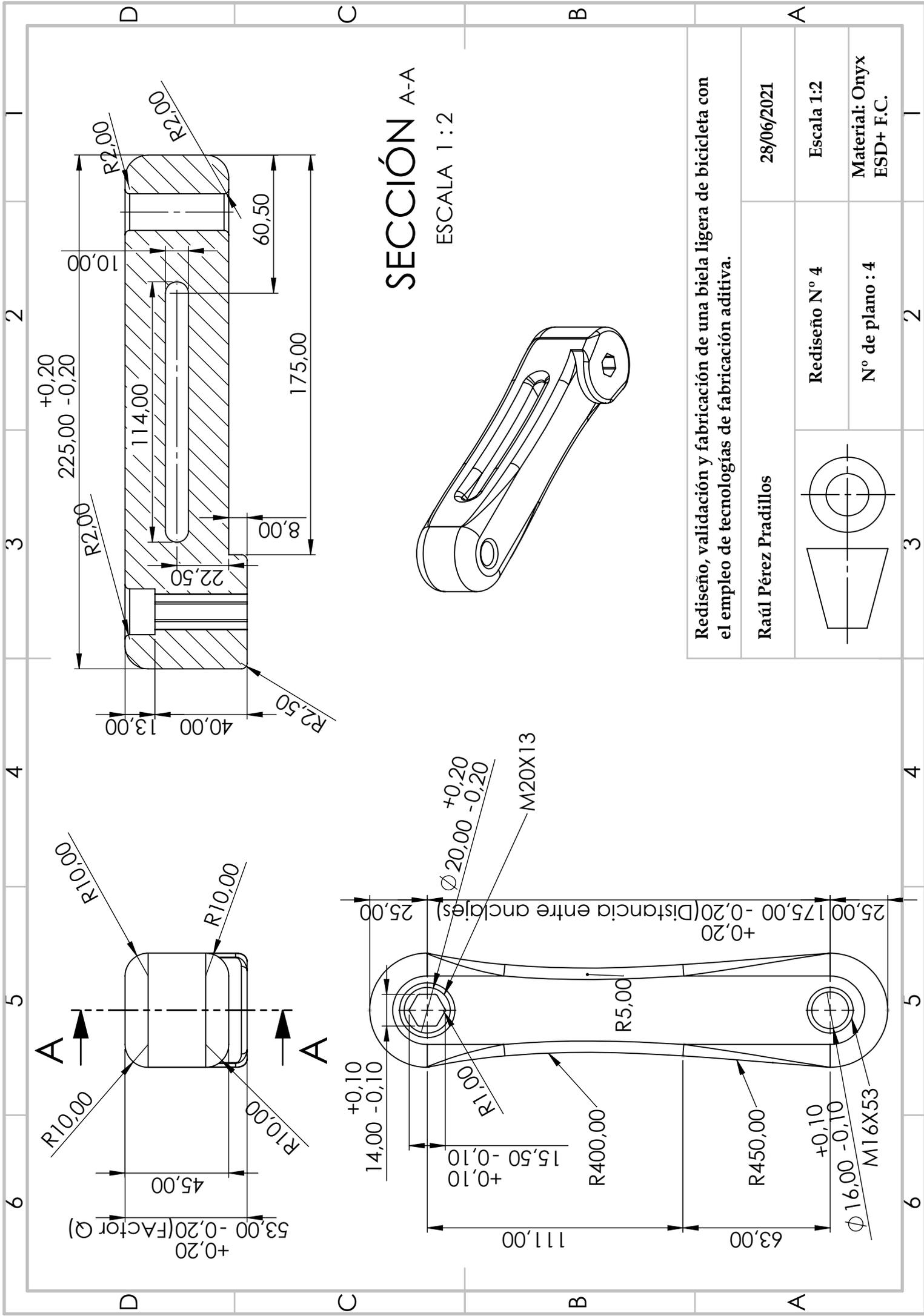
Material: Onyx
ESD+ F.C.



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

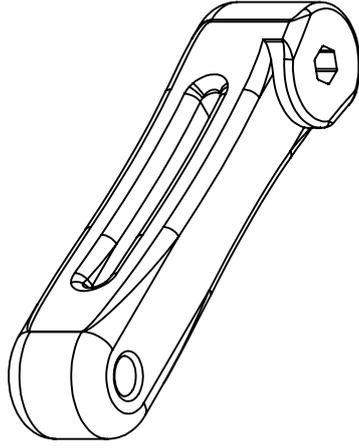


Rediseño, validación y fabricación de una biela ligera de bicicleta con el empleo de tecnologías de fabricación aditiva.		28/06/2021
Raúl Pérez Pradillos	Rediseño N° 3	Escala 1:2
	N° de plano : 3	Material: Onyx ESD+ F.C.



SECCIÓN A-A

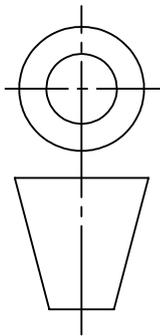
ESCALA 1 : 2



Rediseño, validación y fabricación de una biela ligera de bicicleta con el empleo de tecnologías de fabricación aditiva.

Raúl Pérez Pradillos

28/06/2021



Rediseño N° 4

Escala 1:2

Material: Onyx
ESD+ F.C.

N° de plano : 4

IV.3. Bibliografía y referencias.

Definición de Bicicleta · Qué es, Significado y Concepto

Definiciones de Palabras

<https://definicionesdepalabras.com/definicion-de-bicicleta>

Origen de la Bicicleta – Inventor y Evolución | CurioSfera-Historia

CurioSfera Historia

<https://curiosfera-historia.com/historia-de-la-bicicleta>

Tipos de bicicletas – Modelos, estilos, clases ... | Terránea

Terránea

<https://blog.terranea.es/principales-tipos-bicicletas>

Partes básicas de una bicicleta – Noticias MTB

Noticias MTB

<https://noticiasmtb.com/partes-basicas-de-una-bicicleta>

Mecánica para Dummies: Las Bielas

Mimundoenbici.com

<http://mimundoenbici.com/mecanica-para-dummies-las-biela>

Eficiencia de pedaleo: El máximo partido de nuestro potenciómetro - Zikloland

Zikloland

<https://www.zikloland.com/eficiencia-pedaleomaximopartidopotenciometro/>

Fabricación aditiva: qué es, proceso y usos | VIU

Universidadviu.com

<https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestrosexpertos/fabricacion-aditiva-que-es-proceso-y-usos>

Impresión 3D: Materiales poliméricos compuestos - Sociemat

Sociemat

<https://sociemat.es/impresion-3d-materiales-polimericos-compuestos>

Markforged Login

Eiger.io

<https://www.eiger.io/library>

Industrial Additive Manufacturing Platform | Markforged

Markforged

<https://markforged.com/>