



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Fin de Grado

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE BIELA DE BICICLETA PARA
FABRICACIÓN POR MEDIO DE TÉCNICAS ADITIVAS

DESING AND OPTIMIZATION OF BICYCLE CRANKS FOR
ADDITIVE TECHNIQUES MANUFACTURING

Autor: Jorge Sereno Pérez

Tutor: Joaquín Barreiro García

(Febrero, 2023)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
Trabajo de Fin de Grado

ALUMNO: Jorge Sereno Pérez

TUTOR: Joaquín Barreiro García

TÍTULO: Diseño y optimización de biela de Bicicleta para fabricación por medio de técnicas aditivas.

TITLE: Design and optimization of bicycle crank for additive techniques manufacturing.

CONVOCATORIA: Febrero, 2023

RESUMEN:

En el presente estudio se aborda la metodología seguida para realizar un proceso de diseño y optimización de una biela de bicicleta. Para ello se ha llevado a cabo un estudio del mercado actual, haciendo especial hincapié en los elementos de la bicicleta que influyen en la morfología de la biela y en los procesos de fabricación empleados. Posteriormente se han estudiado los diferentes tipos de tecnologías aditivas disponibles y los materiales que se pueden procesar con cada una de ellas. A continuación se ha buscado una aleación de aluminio para ser impresa (AlSi10Mg) y que simultáneamente cumpliera con las propiedades mecánicas necesarias. Al mismo tiempo que se elegía el material, se ha tenido en cuenta las impresoras comerciales con capacidad para emplearlo y se ha sido seleccionada con vistas a la producción en serie, de tal forma que se reduzca el precio unitario del producto. Una vez

finalizado el estudio previo se inicial el proceso de diseño a través de la plataforma colaborativa 3DExperience y sus diferentes aplicaciones. A continuación se ha verificado el diseño a través de un estudio de tensiones y deformaciones. Con el modelo CAD del diseño inicial se ha realizado, utilizando la aplicación *Structural Gerenerative Design* un proceso de optimización topológica, del que se ha obtenido un modelo que se ha refinado y verificado, obteniendo unos resultados con los que se comparar. Como alternativa a la optimización inicial, se ha buscado una opción mejor de optimización, modificando la geometría de la biela para forzar a una distribución de tensiones sobre la biela que favorezca la generación de un modelo optimizado con mejores características. Con el modelo obtenido, y posteriormente rectificado, se ha realizado una verificación, de la que se han extraído unos resultados con los que comparar los modelos.

ABSTRACT:

This study deals with the methodology followed to carry out a design and optimisation process for a bicycle crank. To this end, a study of the current market has been carried out, with special emphasis on the elements of the bicycle that influence the morphology of the connecting rod and the manufacturing processes used. Subsequently, the different types of additive technologies available and the materials that can be processed with each of them were studied. Next, a search was made for an aluminium alloy to be printed (AlSi10Mg) that simultaneously fulfilled the necessary mechanical properties. At the same time as the material was chosen, commercial printers with the capacity to use it were taken into account and it was selected with a view to mass production, so as to reduce the unit price of the product. Once the preliminary study was completed, the design process was started using the 3DExperience collaborative platform and its different applications. The design was then verified by means of a stress and deformation study. With the CAD model of the initial design, a topological optimisation process was carried out using the Structural Gerenerative Design application, from which a model was obtained that was refined and verified, obtaining results with which to compare.

As an alternative to the initial optimisation, a better optimisation option has been sought, modifying the geometry of the connecting rod to force a distribution of stresses on the connecting rod that favours the generation of an optimised model with better characteristics. With the model obtained, and subsequently rectified, a verification has been carried out, from which results have been extracted to compare the models.

Palabras clave: Biela, Optimización topológica, 3DExperience, Fabricación Aditiva.

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

Índice de contenidos

Índice de contenidos	5
Índice de figuras:	7
Índice de cuadros y tablas:	11
1 Introducción.....	12
1.1 La Bicicleta:	12
1.1.1 Tipos de bicicleta:	13
1.1.2 Componentes de la bicicleta:	14
1.2 La biela:	16
1.2.1 Elementos determinantes de la biela:.....	17
1.2.2. Materiales de fabricación:.....	21
1.2.3. Procesos de fabricación:.....	23
1.3 Fuerzas aplicadas sobre la biela:.....	24
1.4. Optimización topológica:.....	26
1.5. Fabricación Aditiva:	29
2. Objetivos:.....	33
3. Metodología:	34
3.1. Uso de la plataforma 3DExperience:.....	34
3.2. Elementos utilizados para la fabricación:.....	35
3.2.1. Máquina de fabricación aditiva:.....	35
3.2.2. Polvo metálico AlSi10Mg:.....	37
4. Diseño de biela:	38
4.1. Biela inicial:.....	38
4.1.1. Diseño CAD de la biela:.....	38

4.1.2. Análisis de esfuerzos:	49
4.2. Biela optimizada	62
4.2.1. Proceso de optimización:	62
4.2.1. Optimización alternativa:	74
5. Resultados:	81
6. Conclusiones:	82
Referencias biográficas:	84
Anexos:	87
Cálculos de fuerzas aplicadas sobre la biela:	87

Índice de figuras:

Ilustración 1. Componentes de una bicicleta (Fuente: [4])	14
Ilustración 2. Biela de una bicicleta (Fuente: https://www.bike24.es).....	16
Ilustración 3. Factor Q máximo (Fuente: solobici.es)	18
Ilustración 4. Pedalier roscado. (Fuente: santafixie.com)	19
Ilustración 5. Pedalier roscado con rodamientos externos.....	19
Ilustración 6. Eje pedalier a presión. (Fuente: santafixie.com)	20
Ilustración 7. Fuerzas sobre la biela (Fuente: [12])	24
Ilustración 8. Descomposición de fuerzas sobre biela en cuadrantes (Fuente: [12])	25
Ilustración 9. Optimización topológica de un mecanismo (Fuente:[13])	26
Ilustración 10. Gráfico Complejidad-Cantidad y Gráfico Coste unitario – Cantidad (Fuente:[19])	29
Ilustración 11. Proceso general de la fabricación aditiva (Fuente:[20]).....	30
Ilustración 12. DMP Factory 500 (Fuente: [21])	36
Ilustración 13. Propiedades mecánicas de AlSi10Mg (Fuente:[22]).....	37
Ilustración 14. Part Design: Sketch.	38
Ilustración 15. Part Design: Plantilla 1.....	39
Ilustración 16. Part Design: Plantilla 2.....	39
Ilustración 17. Part Design: Pad.....	40
Ilustración 18. Part Design: Pocket.....	40
Ilustración 19. Part Design: Cavidad eje pedalier.....	41
Ilustración 20. Part Design: Hembra eje pedalier.....	41
Ilustración 21. Part Design: Asiento para tapón.....	42
Ilustración 22. Part Design: Asiento para eje de pedal.	42
Ilustración 23. Part Design: Fijación plato DM.	43
Ilustración 24. Part Design: Agujeros para fijación plato.	43
Ilustración 25. Part Design: Asiento para plato DM.	44
Ilustración 26. Part Design: Taladro para roscas M5.....	44
Ilustración 27. Part Design: Chaflán 0,5 mm.	45

Ilustración 28. Part Design: Chaflán 1 mm.	45
Ilustración 29. Part Design: Redondeo caras superiores.....	46
Ilustración 30. Part Design: Redondeo caras laterales 1.	46
Ilustración 31. Part Design: Redondeo caras laterales 2.	47
Ilustración 32. Part Design: Chaflán aristas exteriores.....	47
Ilustración 33. Vista Isométrica 1.	48
Ilustración 34. Vista Isométrica 2.	48
Ilustración 35. Material Definition: Creación de nuevo material.....	49
Ilustración 36. Material Definition: Simulation Domain.	50
Ilustración 37. Material Definition: Densidad.	50
Ilustración 38. Material Adition: Límite elástico.	51
Ilustración 39. Material Definition: Límite último de rotura.....	51
Ilustración 40. Material Definition: Enlongación.....	52
Ilustración 41. Material Definition: Constante de elasticidad.....	52
Ilustración 42. Structural Generative Design: Analysis Case.	53
Ilustración 43. Structural Generative Design: Model Configuration.....	53
Ilustración 44. Structural Generative Design: Cargas.....	54
Ilustración 45. Structural Generative Design: Restricciones.	54
Ilustración 46. Structural Generative Design: Restricciones.	55
Ilustración 47. Structural Generative Design: Configuración de malla.	56
Ilustración 48. Structural Generative Design: resultados análisis de cargas (Caso 1).....	56
Ilustración 49. Structural Generative Design: resultados análisis de cargas (Caso 2).....	57
Ilustración 50. Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 1).	57
Ilustración 51. Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 1)	58
Ilustración 52. Tensiones de Von Mises, Vista 3 (Caso 1)	58
Ilustración 53. Factor de seguridad (Caso 1).	58
Ilustración 54. Reacciones (Caso 1).	59
Ilustración 55. Deformaciones (Caso 1).....	59
Ilustración 56. Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 2).	60
Ilustración 57. Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 2).	60
Ilustración 58. Tensiones de Von Mises, Vista 3 (Caso 2).	60

Ilustración 59. Factor de seguridad (Caso 2).	60
Ilustración 60. Reacciones (Caso 2).	61
Ilustración 61. Deformaciones (Caso 2).	61
Ilustración 62. Optimización topológica: Simplificación CAD.	62
Ilustración 63. Optimización topológica: Particiones.	63
Ilustración 64. Optimización topológica: Generación de OT.	63
Ilustración 65. Optimización topológica: Configuración del modelo.	64
Ilustración 66. Optimización topológica: Regiones a preservar.	64
Ilustración 67. Optimización topológica: Cargas.	65
Ilustración 68. Optimización topológica: Restricciones.	65
Ilustración 69. Optimización topológica: Casos de cargas.	66
Ilustración 70. Optimización topológica: Mallado.	66
Ilustración 71. Optimización topológica: Restricción de límite elástico.	67
Ilustración 72. Optimización topológica: OT0 (Vista Frontal).	67
Ilustración 73. Optimización topológica: OT0 (Vista Trasera).	67
Ilustración 74. Optimización topológica: Generación de modelo optimizado.	68
Ilustración 75. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 1).	69
Ilustración 76. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 1).	69
Ilustración 77. OT0: Factor de seguridad (Caso 1).	69
Ilustración 78. OT0: Deformaciones (Caso 1).	70
Ilustración 79. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 2).	70
Ilustración 80. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 2).	71
Ilustración 81. OT0: Factor de seguridad (Caso 2).	71
Ilustración 82. OT0: Deformaciones (Caso 2).	72
Ilustración 83. Biela Optimizada 1, vista 1.	72
Ilustración 84. Optimización Topológica 1, vista 2.	73
Ilustración 85. OT1: Cruz de San Andrés	74
Ilustración 86. OP1: Resultado optimización, vista 1.	75
Ilustración 87. OT1: Resultado optimización, vista 2.	75
Ilustración 88. OT2: Sólido generado.	75
Ilustración 89. OT1: Optimización de sólido generado.	76

Ilustración 90. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 1 (Caso 1).	76
Ilustración 91. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 2 (Caso 1).	76
Ilustración 92. OT1: Deformaciones (Caso 1).	77
Ilustración 93. OT1: Factor de seguridad (Caso 1).	77
Ilustración 94. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 1 (Caso 2).	78
Ilustración 95. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 2 (Caso 2).	78
Ilustración 96. OT1: Deformaciones (Caso 2).	78
Ilustración 97. OT1: Factor de seguridad (Caso 2).	78
Ilustración 98. OT1: Isométrica 1.....	79
Ilustración 99. OT1: Isométrica 2.....	80

Índice de cuadros y tablas:

Tabla 1. Propiedades mecánicas de materiales	22
Tabla 2. Resultados.....	81

1 Introducción

1.1 La Bicicleta:

El 12 de junio de 1817, el inventor alemán Karl Freiherr von Drais presentó el primer concepto de bicicleta [1], con la peculiaridad de estar fabricada en madera y con ausencia de pedales.

En 1839, Kirkpatrick Macmillan añadió los pedales, que transmitían la fuerza a través de unas varillas de conexión hacia la rueda trasera para hacerla girar, siendo un sistema muy pesado [2].

En 1861, Pierre Michaux propuso la integración de los pedales en la rueda delantera, con el inconveniente de la dificultad que generaba este sistema a la hora de mantener el equilibrio.

En 1879, James Starley introdujo el famoso modelo de bicicleta compuesto por una rueda delantera de un diámetro mucho mayor que la rueda trasera, buscando mejorar el equilibrio sobre la bicicleta, pero haciéndola más peligrosa.

En 1885, John Kemp Starley, diseñó el concepto de bicicleta moderna que existe en la actualidad y le da una definición a su propio nombre. Con transmisión de cadena, frenos y ruedas con cámara de aire. A partir de este modelo se han desarrollado diferentes tipos de bicicleta durante los siguientes años [3].

1.1.1 Tipos de bicicleta:

Las bicicletas están clasificadas en función del tipo de actividad para las que están diseñadas, existiendo diferencias geométricas o componentes específicos para cada una de ellas. De tal manera que, actualmente, se distinguen los siguientes principales tipos:

- **Bicicleta de Carretera:** están construidas para circular por asfalto, buscando la mayor eficiencia. Por lo tanto, tienen geometrías aerodinámicas, persiguen la máxima ligereza y poseen ruedas de gran diámetro pero de perfil delgado.
- **Bicicletas de Montaña:** son bicicletas todoterreno. Se caracterizan por sus ruedas de perfil ancho, amortiguaciones y sistemas de frenado de disco.
- **Bicicletas de Gravel:** están diseñadas con geometrías similares a las bicicletas de carretera, solo que permitiendo una postura más relajada para recorrer largas distancias. Posee componentes que les permite transitar por caminos de tierra, como ruedas más anchas o transmisiones con más desarrollo.
- **Bicicletas de Ciclocross:** parecidas a las gravel, solo que para este tipo de bicicleta, las geometrías son más agresivas, ya que se busca eficiencia para la competición de cortas distancias. Otra diferencia son los grosores de las ruedas respecto a las gravel, ya que en este caso son ligeramente más delgadas, además de poseer un patrón en su superficie para mejorar el agarre.
- **Bicicletas Urbanas:** están diseñadas para desplazamientos por ciudades. Tienen una geometría que permite una postura recta, por lo que se prioriza la comodidad y son de un tamaño reducido frente a los otros tipos de bicicleta.
- **Bicicletas Eléctricas:** son variantes eléctricas de los diferentes tipos de bicicletas nombrados anteriormente. Se caracterizan por contener un motor eléctrico que asiste en la pedalada, por lo que su peso es mayor.

- **Bicicletas BMX:** son bicicletas hechas para hacer acrobacias, por lo que son pequeñas y manejables, además de robustas.

1.1.2 Componentes de la bicicleta:

Una bicicleta está constituida por una serie de componentes que la definen. Podremos encontrar los siguientes elementos generales en cualquier tipo de bicicleta:



Ilustración 1. Componentes de una bicicleta (Fuente: [4])

- **Cuadro:** es el componente base de la bicicleta, sobre el que se ensamblan el resto de componentes. Dependiendo del tipo de bicicleta que se trate, tendrá una determinada geometría y un tipo de material, por lo que la calidad de la bicicleta depende en gran medida del diseño de este. El cuadro está formado por dos tubos horizontales (tubo superior y tubo inferior), unidos por un tubo vertical situado en el tren delantero del cuadro (telescopio), y a otro en el tren trasero, al que van unidos a su vez otros dos tubos que llegan al eje de la rueda trasera (vaina superior y vaina inferior).

- **Sistema de dirección:** es la unión de los elementos necesarios para dirigir la rueda delantera de la bicicleta, y por lo tanto, la bicicleta. Los componentes que lo forman son:
 - El manillar, que es el elemento sobre el que apoyan las manos para dirigir la bicicleta.
 - La potencia, cuya finalidad es unir el manillar con el cuerpo de la bicicleta y determinar la posición del ciclista.
 - La horquilla, que es el componente sobre el que va la rueda delantera y la une a la bicicleta.
 - El tubo de dirección, que tiene la función de transmitir el movimiento de giro del manillar a la horquilla.

- **Sistema de transmisión:** su principal función es transmitir la fuerza generada por la persona hasta la rueda trasera y generar un movimiento. Dicho sistema está compuesto por los siguientes elementos:
 - *Pedales:* plataformas sobre las que se apoyan los pies.
 - *Pedalier:* sistema de rodamientos situados en el eje del cuadro sobre el que rotan los pedales. Su función es permitir el movimiento circular respecto al cuadro de la bicicleta.
 - *Bielas:* elementos encargados de separar los pedales del centro de pedalier, para generar un par con la fuerza producida sobre estos. Su función es transmitir la fuerza generada en los pedales hasta el plato.
 - *Plato:* es la rueda dentada concéntrica al pedalier y anclada a la biela.
 - *Piñones:* conjunto de ruedas dentadas de distinto diámetro y número de dientes, que permiten diferentes desarrollos. Están anclados al buje de la rueda trasera, el cual permite el giro en un único sentido.
 - *Cadena:* componente cuya función es transmitir la fuerza generada sobre el plato hasta los piñones.
 - *Ruedas:* elementos encargados de transformar la fuerza generada, que las hace rotar, en el movimiento lineal de la bicicleta.

- *Sistema de cambio:* es el conjunto de elementos que permiten la variación de desarrollo que permite el juego de piñones y platos. Está formado por los desviadores y los pulsadores, así como los cables.
- **Sistema de frenado:** conjunto de componentes cuya finalidad es detener el movimiento de la bicicleta. Está formado por:
 - *Pulsadores o manetas:* encargados de transmitir al elemento de frenado la propia acción de frenar. Están situados sobre el manillar.
 - *Zapatas o Discos:* son los elementos de frenado, que a través de la fricción, ya sea contra la llanta de la rueda o contra un disco, reducen la velocidad de la bicicleta.
- **Sillín:** es el elemento de apoyo de la persona sobre la bicicleta. [5]

1.2 La biela:

Elemento mecánico, perteneciente al sistema de transmisión, encargado de transferir la fuerza generada en los pedales hacia el plato, el cual (a través de la cadena) transmite el movimiento a los piñones y por ende a la rueda trasera, provocando el movimiento de la bicicleta.



Ilustración 2. Biela de una bicicleta (Fuente: <https://www.bike24.es>)

Es un componente que influye en el rendimiento y en la salud del ciclista, por lo que su morfología tiene gran importancia.

Generalmente están fabricadas de aleaciones con base de acero, aluminio, titanio o fibra de carbono. Por lo tanto, no existe un único proceso de fabricación para estas, sino que (dependiendo del material) se presentan diferentes alternativas para su materialización.

1.2.1 Elementos determinantes de la biela:

La morfología de la biela está definida por las uniones que presenta con los diferentes elementos con los que se ensambla, por la curvatura que presentan y por la longitud entre el eje del pedalier y el eje del pedal.

A) Longitud de la biela:

Es la distancia medida desde el eje de pedalier hasta el eje del pedal, siendo un parámetro de gran importancia. En el mercado podemos encontrar unos valores generales, que van desde los 160 mm, en incrementos de 2,5 mm o 5 mm, hasta los 185 mm.

La longitud de la biela no afecta a la eficiencia metabólica del pedaleo, pero sí a la eficiencia mecánica. Inicialmente se puede pensar que, cuanto mayor longitud de biela, mayor par se va a generar ya que se aleja el punto de aplicación de la fuerza respecto del pedalier, pero no es la realidad. Esto se debe a que, a una mayor longitud de biela, se reduce la cadencia de pedaleo, por lo que para mantener la potencia es necesario aumentar la fuerza aplicada sobre los pedales. También afecta a largo plazo en la salud, ya que cuanto más longitud de biela, se produce una mayor flexión de las articulaciones, que pueden desembocar en lesiones.

La posición sobre la bicicleta también se ve afectada por la longitud de la biela, ya que están directamente relacionadas. Una longitud de biela más corta, baja la posición del cuerpo, reduciendo la resistencia aerodinámica.

Sobre las principales medidas comerciales de bielas, la diferencia de rendimiento es escasa, por lo que la longitud elegida por el ciclista dependerá de: su estilo de pedaleo y de su altura. Un estudio biomecánico será lo que determine el resultado óptimo.

Para este estudio se utilizará una longitud de 170 mm, ya que es un valor neutro entre las medidas más usadas. [6]

B) Factor Q:

Corresponde a la distancia que existe entre las piernas del ciclista. El factor Q total es la suma de dos valores: el factor Q máximo (distancia entre la cara exterior de una biela y la cara exterior de la otra biela) y el factor Q mínimo (distancia entre la biela y el pie del ciclista). En el mercado se utiliza el valor de “factor Q máximo”.

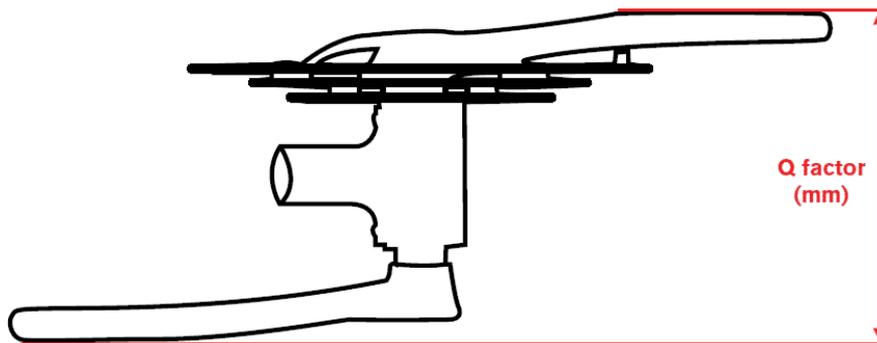


Ilustración 3. Factor Q máximo (Fuente: solobici.es)

Es un parámetro que depende de la anatomía del ciclista e influye de forma directa sobre la postura, por lo que es importante para la eficiencia del pedaleo. Un valor correcto significa una alineación óptima de tren inferior, y por tanto, no habrá descompensación muscular que provoque lesiones o sobreesfuerzos.

El factor Q es el que va a determinar la curvatura que van a tener la bielas a diseñar y, como el método de fabricación utilizado será la fabricación aditiva, se podrá modificar según las necesidades del ciclista a la hora de la materialización.

C) Unión al eje de pedalier:

La unión entre la biela y el pedalier va a depender el tipo de pedalier que esté ensamblado en la bicicleta. Existen dos familias principales:

- **Eje de pedalier roscado:** contienen el eje, que une las bielas, y los rodamientos, que permiten su giro, en el interior de un cartucho cilíndrico que se enrosca sobre el cuadro de la bicicleta. Las bielas se anclan a los extremos del eje que sobresalen del cartucho, y que tienen una determinada forma.

Existe una variante en la que los rodamientos están situados fuera del cartucho y el eje se ensambla sobre una de las bielas directamente.

Para este tipo de pedalier, las bielas deberán tener una cavidad con la forma específica de los extremos del eje.



Ilustración 4. Pedalier roscado. (Fuente: santafixie.com)



Ilustración 5. Pedalier roscado con rodamientos externos.

- **Eje de pedalier a presión:** en este caso, los rodamientos se ensamblan sobre el cuadro de la bicicleta sin necesidad de roscas, que si pensamos en los cuadros de carbono es una gran ventaja. La manera en la que se unen al cuadro es mediante un ajuste forzado, aplicando presión sobre dichos rodamientos hasta que asienten. El eje se monta sobre una de las bielas, ya sea a presión o con un roscado.

Por lo tanto, para este tipo de pedalier, las bielas necesitarán un roscado para unirse al eje.



Ilustración 6. Eje pedalier a presión. (Fuente: santafixie.com)

En este estudio se tomará de referencia un eje de pedalier a presión, por lo tanto, se dejará un agujero para poder realizarle un roscado.

D) Unión a platos:

Existen dos posibles tipos de anclaje de la biela a los platos, que dependerá del tipo de plato que se quiera utilizar: platos Direct Mount y platos BCD.

- **Direct Mount:** la unión con la biela es de forma directa a través de tornillos que los mantienen unidos. Es el sistema más simple, lo que implica menor peso y menor mantenimiento, además de que no son necesarias herramientas específicas. El inconveniente que presenta el sistema se presenta a la hora de desmontar el plato, ya que es necesaria la extracción de las bielas de la bicicleta.

- **BCD:** la unión del plato y la biela se realiza a través de unos brazos que está incorporados en la propia biela, los cuales tienen unos agujeros roscados que permiten que se atornille el plato. El nombre del sistema hace referencia a la medida de la distancia en arco que hay entre los tornillos que unen los componentes. Es el más utilizado.

El sistema que se va a utilizar en el estudio va a ser el “Direct Mount”, ya que para la fabricación de la biela, al ser a través de fabricación aditiva, se encontrarán limitaciones en las camas de impresión, y el sistema BCD supone un aumento del volumen de la biela, por lo que el sistema más simple (Direct Mount) será la opción más óptima.

E) Unión a pedales:

Las bielas poseen un agujero roscado, en uno de sus extremos, con el objetivo de unir los pedales a través de estos. Además, se debe tener en cuenta que los pedales tienen roscas de diferente sentido, es decir, el pedal derecho posee una rosca a derechas, mientras que en el pedal izquierdo es a izquierdas. Se pueden encontrar los siguientes tipos de roscas:

- **Rosca francesa:** es una rosca de M14 x 1.25, la cual ya casi no se utiliza.
- **Rosca americana:** rosca de ½” x 20 TPI, utilizada en bicicletas clásicas y BMX.
- **Rosca inglesa:** es la más utilizada actualmente, siendo de 9/16” x 20 TPI.

Como la mayoría de los pedales en el mercado poseen rosca inglesa, para el diseño de la biela de este estudio se pensará en el uso de dicho tipo de rosca.

1.2.2. Materiales de fabricación:

A la hora de fabricar una biela existen tres materiales principales, que se escogerán en función de las necesidades que requiera la modalidad de ciclismo en la que vayan a ser utilizadas:

- **Acero:** se puede encontrar en bicicletas antiguas o en bicicletas BMX. Es un material con buena resistencia y maquinabilidad, teniendo como desventaja una mayor densidad frente al resto de materiales que se utilizan para la fabricación de bielas. Estas características hacen que sea el material óptimo para modalidades en las que

las bielas van a estar sometidas a impactos y que el peso pierde importancia. Específicamente, el acero que se emplea generalmente es el AISI 4130. [7]

- **Aluminio:** se utiliza en la gama media y baja de bicicletas de MTB y carretera, en las que empieza a cobrar gran importancia el peso, además no sufren impactos tan fuertes como en otras modalidades, por lo que la resistencia exigida al material no es tan alta. La aleación utilizada es aluminio 7050, debido a que es liviana, tenaz y tiene buena resistencia mecánica.[8]
- **Fibra de carbono:** se emplea en bielas para bicicletas de gama alta, en modalidades en las que el peso sea especialmente importante, como MTB o carretera. Es un material con una resistencia mecánica elevada y de gran rigidez (mejor transmisión de esfuerzos), que combinado con su baja densidad, se convierte en un buen material para la construcción de las bielas. Se utiliza fibra de carbono de alta resistencia (0° , 20° y 45°) junto con resinas epoxy. [9]

Para evaluar el material óptimo en cada caso se observará los siguientes parámetros de cada material: límite elástico (σ_e), densidad (ρ) y módulo de Young (E).

	Límite elástico, σ_e [MPa]	Densidad, ρ [Kg/m ³]	Módulo de Young, E [GPa]
Acero AISI 4130	930	7800	190-210
Aluminio 7050	455	2600-2800	70-80
Composite (58% Fibra, 42% Matriz)	1500	1100-1750	140

Tabla 1. Propiedades mecánicas de materiales

En el caso de este estudio, conociendo ya el proceso que se va a emplear para la materialización de la biela y los materiales aptos, se buscará una aleación de aluminio que cumpla los principales requisitos.

1.2.3. Procesos de fabricación:

El proceso de fabricación empleado dependerá del material seleccionado, existiendo los siguientes procesos principales:

Para el caso de las bielas de acero, se utiliza el proceso de fundición. Este proceso consiste en lo siguiente: se lleva la aleación de acero a su punto de fusión, y una vez se consiga el estado líquido se introduce en un molde con la forma que se desea conseguir. Cuando haya solidificado, se procede a someter al producto obtenido a un proceso de mecanizado, del cual se obtendrá el acabado superficial deseado y un mecanizado de las roscas necesarias.

Las bielas de aluminio se pueden fabricar mediante el mismo proceso que las de acero, pero por regla general, el proceso más empleado con este material es el forjado en frío. Este proceso consiste en introducir un tocho de aluminio en una forja, en la que se colocarán unos moldes con las formas que se quieran obtener de la biela. Al igual que en el proceso de fundición, es necesario un mecanizado posterior para obtener acabados adecuados y las roscas pertinentes.

Finalmente, para bielas de carbono se empleará el siguiente proceso: en primer lugar, se prepararán unos pre-impregnados con fibra de carbono y epoxi de dos tipos (uno de fibra larga para las cara exteriores y otro BMC para usarlo de relleno); el siguiente paso es preparar los elemento metálicos necesarios para poder realizar posteriormente el mecanizado de las roscas; a continuación se coloca el prepreg de fibra larga sobre el molde, haciendo las capas necesarias para obtener el espesor adecuado y con la orientación de las fibras óptima; el cuarto paso es, una vez cerrado el molde, rellenar con BMC de forma que el prepreg de fibra larga quede cubierto; el penúltimo paso es aplicarle presión y calor al molde durante un periodo de tiempo; finalmente se retira el molde y se procede a rectificar las superficies hasta obtener el acabado deseado, además se mecanizan las roscas sobre los elementos metálicos que se colocaron durante la fabricación.[10]

Otra alternativa para la fabricación de bielas de carbono es el uso del “Resin Transfer Molding” (RTM). Esto consiste en colocar en un molde metálico láminas de fibra de carbono con preformas. Una vez relleno el molde, se cierra herméticamente y se inyecta resina epoxi a presión que se infundiona con las fibras y posteriormente se cura, formando la biela. Finalmente se somete a un proceso de acabado, en el que se rectifican las imperfecciones superficiales y se mecanizan las roscas. [11]

1.3 Fuerzas aplicadas sobre la biela:

El origen de las cargas a las que está sometida la biela se encuentra sobre los pedales, que es la plataforma a través de la cual se transmite la fuerza a la bicicleta. Como estamos ante un sistema giratorio, las fuerzas van a cambiar en módulo, dirección y sentido en función del ángulo de giro, además de que se debe tener en cuenta el mecanismo que forma nuestro tren inferior, que limita los esfuerzos en ciertas posiciones.

Las fuerzas sobre la biela se localizan sobre el eje del pedal, pudiendo descomponerse en: fuerza normal (F_y), fuerza tangencial (F_x), fuerza efectiva (EF) y fuerza resultante (RF).



Ilustración 7. Fuerzas sobre la biela (Fuente: [12])

La resultante de la componente tangencial (F_x) y la componente normal (F_y) es la fuerza resultante (RF), que representa la fuerza ejercida sobre el pedal y que varía su dirección y sentido en función del ángulo de rotación. Por otro lado, la fuerza efectiva (EF) posee siempre una dirección perpendicular a la biela. La relación entre la EF y la RF representa la eficiencia de la fuerza de pedaleo, de lo cual se puede deducir que, cuando la fuerza resultante coincide en dirección con la fuerza efectiva, la eficiencia alcanzará el 100%.

Para estudiar las fuerzas detalladamente sobre la biela se descompone el sistema en cuatro cuadrantes, en el que dos de ellos representan las fase de propulsión y los dos restantes la fase de recuperación.

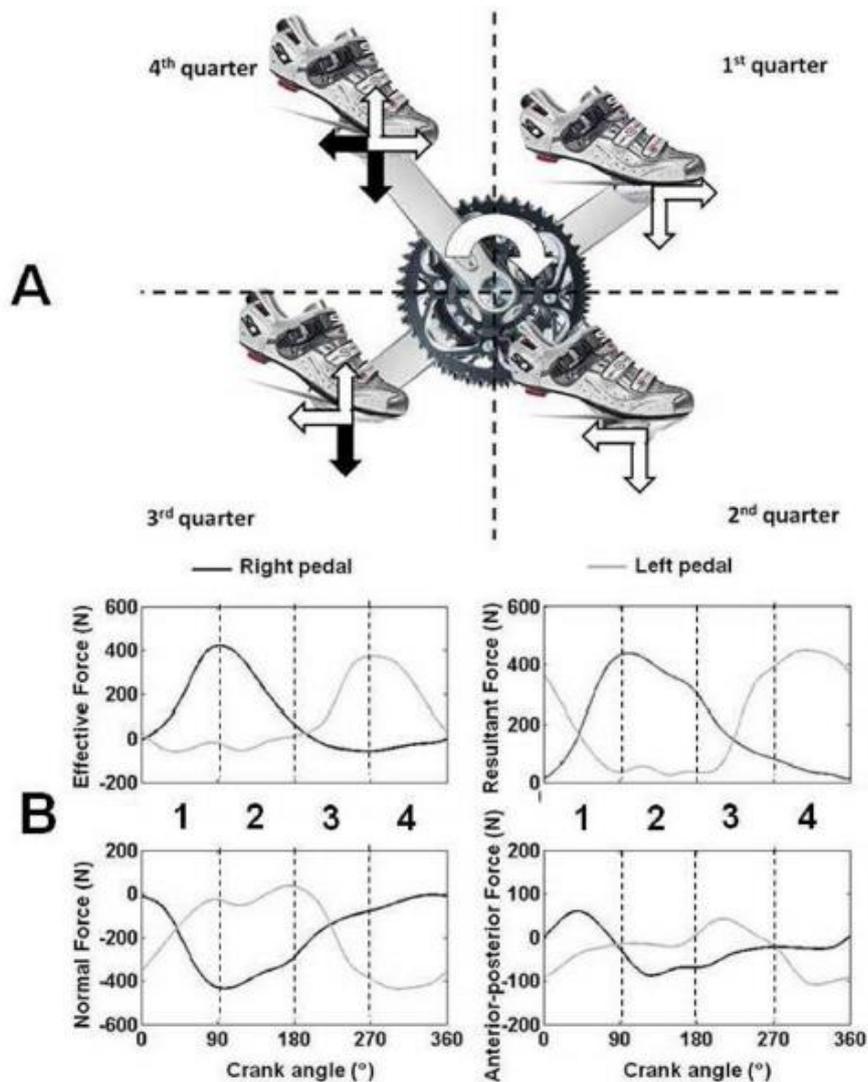


Ilustración 8. Descomposición de fuerzas sobre biela en cuadrantes (Fuente: [12])

El primer y segundo cuadrante representan las fase de propulsión, que como se puede observar (Ilustración 8), es la zona de mayores esfuerzos. Esto se debe a que el sistema formado por nuestro tren inferior genera la máxima carga en estos dos cuadrantes.

El tercer y cuarto cuadrante representan las fase de recuperación, en la que la fuerza efectiva es reducida, pudiendo llegar incluso a valores negativos debido a las limitaciones de nuestro tren inferior.

Por lo tanto, la posición más desfavorable, en cuanto a esfuerzos se refiere, se encuentra aproximadamente a 90° . Esto se debe a que el plano del pedal es paralelo a el plano de la biela, lo que quiere decir que la dirección de la RF y de la EF es la misma, por lo que la relación entre la EF y la RF es cercana a 1, es decir, que la fuerza resultante del pedal se transmite como fuerza efectiva a la biela. Luego, la posición de la biela para realizar el estudio de cargas será esta. [12]

1.4. Optimización topológica:

Método matemático de análisis estructural que tiene como finalidad optimizar la distribución de un material dentro de un espacio definido, en función de 3 parámetros: restricciones de diseño (masa, cargas, apoyos), variables de diseño (mallado) y la función objetivo (resultado buscado).



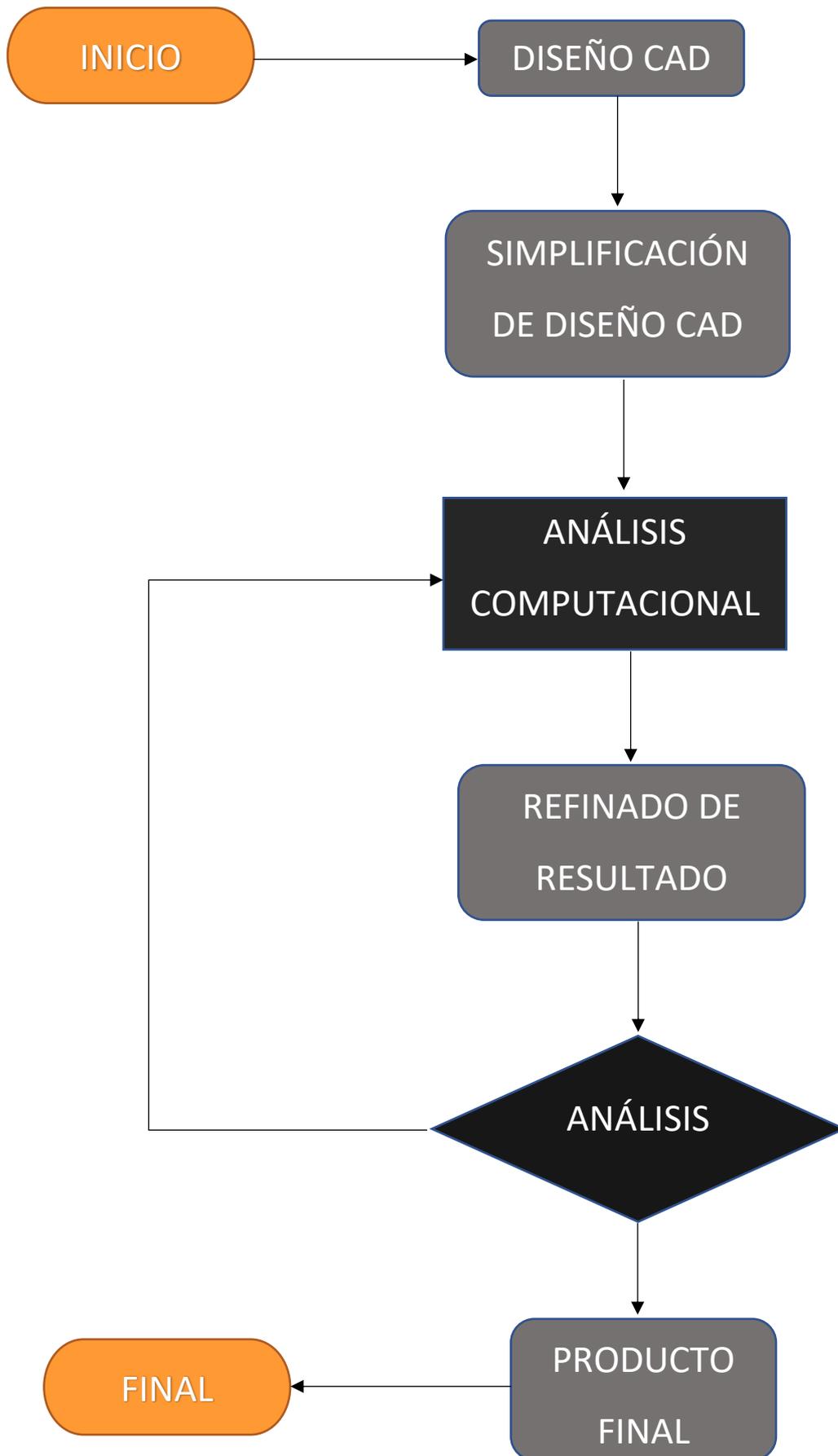
Ilustración 9. Optimización topológica de un mecanismo (Fuente:[13])

El método se basa en el uso de algoritmos iterativos, que minimizan o maximizan la función objetivo para obtener el resultado deseado.

Existen dos principales métodos de optimización topológica: el método SIMP (Solid Isotropic Material) y el método ESO (Evolutionary Structural Optimization). [14]

- **Método SIMP:** el sistema a optimizar se discretiza en elementos finitos para poder ser analizado. Una vez hecho el análisis, se lleva a cabo una optimización evaluando la densidad de cada elemento definido, de forma que se elimina material en las zonas en las que no es necesario, penalizando los elementos con densidades intermedias que son imposibles de materializar. Con el resultado obtenido se vuelve a realizar un análisis para comprobar la validez, de no ser así se vuelve a realizar el proceso anterior de optimización hasta que se obtenga una convergencia. Por lo tanto, el método se basa en obtener la estructura óptima de un sistema, a partir de la redistribución del material que lo forma y utilizando como variable la densidad [15]. Es un método de optimización basado en la densidad, que por norma general, es el utilizado por softwares CAD para realizar optimizaciones topológicas. [16]
- **Método ESO:** sigue el mismo proceso de optimización que el método SIMP, solo que en este caso, el criterio en la optimización está definido por un valor llamado sensibilidad. Este valor de referencia determina que elementos son útiles y cuales no, de forma que si el valor de la sensibilidad de un elemento es menor que la sensibilidad referencia, este se elimina del dominio. Por lo tanto, este método elimina material del dominio en función de un criterio de rechazo definido previamente. Dentro de la optimización topológica, pertenece a los métodos evolutivos [17].

Cuando se realiza una optimización topológica de un diseño en un software CAD, se sigue el siguiente proceso:



1.5. Fabricación Aditiva:

La fabricación aditiva se puede definir como un proceso de fabricación basado en tecnologías aditivas. Es decir, materializa modelos 3D depositando, solidificando o uniendo el material capa a capa.

Su origen se remonta a la década de los 80, de la mano de Hideo Kodama, cuando surge la necesidad de mejorar la técnica de prototipado rápido. Posteriormente, sería Chuck Hull (Co-fundador de 3DSystemes) el que presentaría la patente de la conocida técnica “estereolitografía”, en la que realmente su aportación fue el formato STL (STereOLithography), ya que la propia técnica ya había sido definida por Kodama. Con el paso de los años se han desarrollado nuevas técnicas, hasta el punto de que lo que en un principio había sido pensado para prototipado, actualmente se utiliza para desarrollar piezas o productos finales y funcionales. [18]

Una de las ventajas más importantes que proporciona la fabricación aditiva es su prácticamente nula limitación de geometrías. Esto abre una puerta a la fabricación de piezas optimizadas topológicamente, que junto a la posibilidad que ofrece de materializar piezas multimaterial, genera grandes posibilidades.

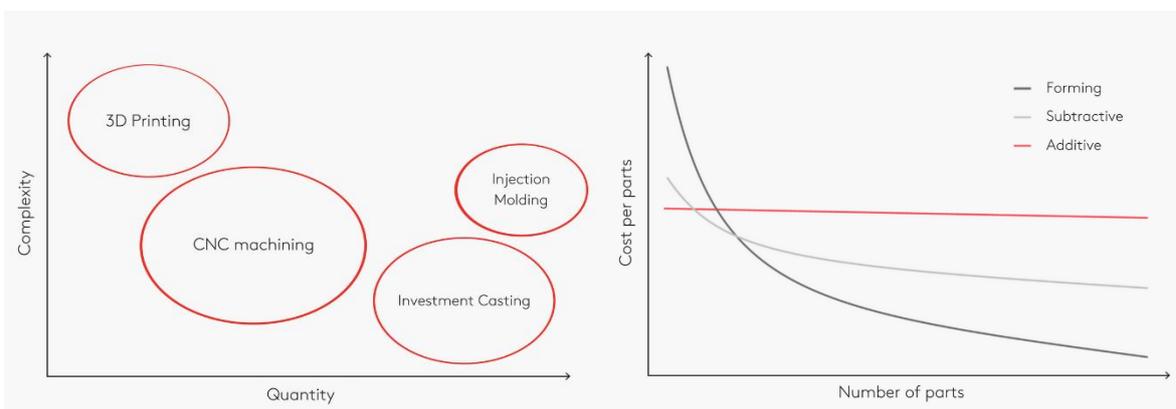


Ilustración 10. Gráfico Complejidad-Cantidad y Gráfico Coste unitario – Cantidad (Fuente:[19])

También tiene la desventaja de que el material utilizado está ligado a las tecnologías disponibles, así como el tamaño del producto a imprimir. Además, económicamente hablando, es un proceso de fabricación en el cual, el coste unitario no disminuye prácticamente con el aumento de la producción.

El proceso general que sigue la fabricación aditiva es el siguiente:

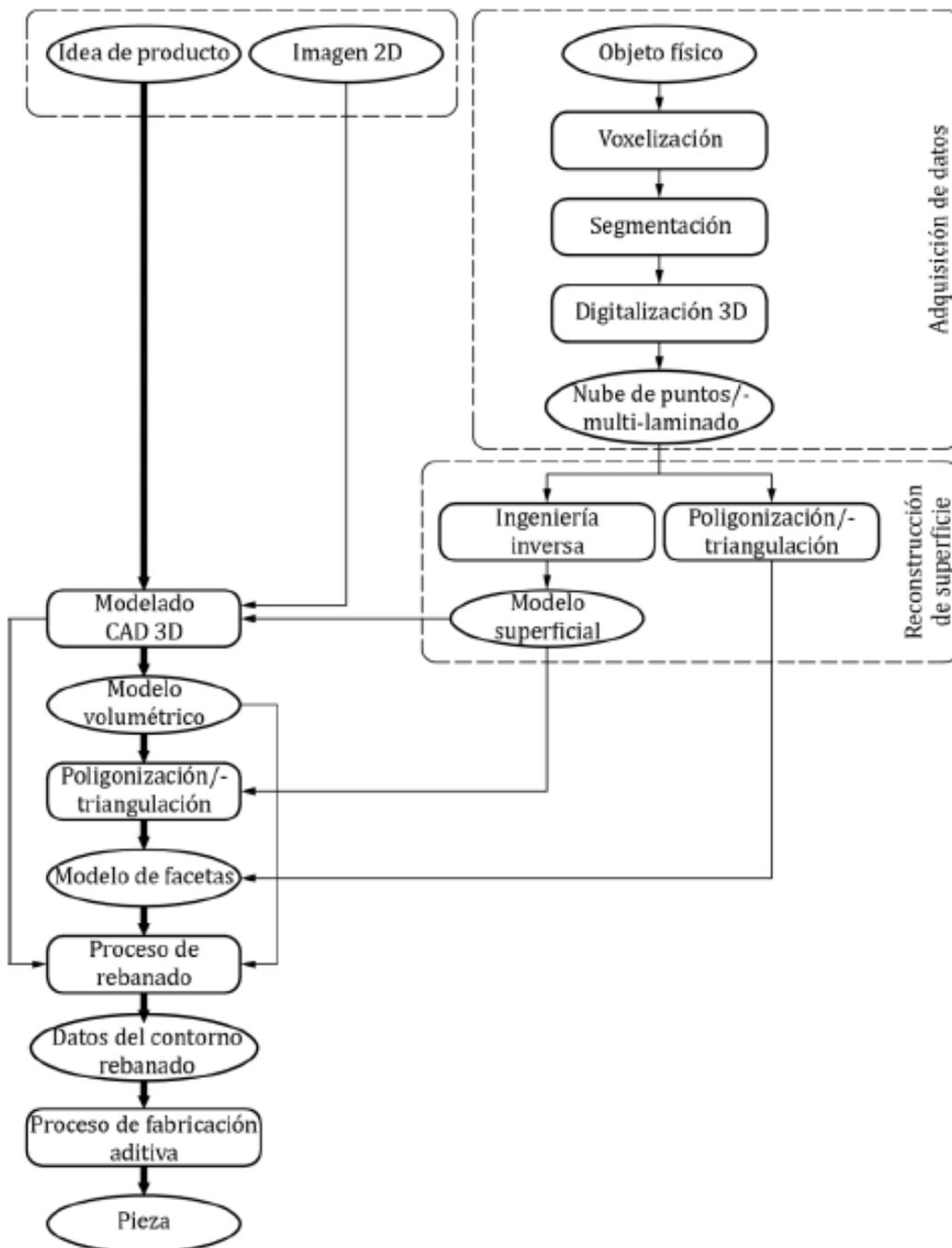


Ilustración 11. Proceso general de la fabricación aditiva (Fuente:[20])

El primer paso del proceso es crear un modelo 3D de la idea del producto, que por lo general, se realiza a través de sistemas CAD. En el caso de que el producto ya exista físicamente se procede a su digitalización, en la que se registra la geometría a través de una nube de puntos, con la que posteriormente se obtienen curvas y superficies que dan la información necesaria para crear el modelo CAD del producto.

Una vez realizado el modelo CAD, se lleva a cabo el proceso de rebanado, el cual consiste en segmentar dicho modelo en capas. Se realiza a través de un software específico.

Finalmente se introduce la información obtenida del paso anterior en la máquina de fabricación aditiva, la cual materializa la pieza final. Se debe tener en cuenta que, en función del proceso utilizado o el componente diseñado, puede ser necesario un post-procesado de la pieza.

Dentro la de fabricación aditiva se distinguen diferentes tecnologías:

- **Proyección de aglutinante, BJT (binder jetting):** su funcionamiento se basa en proyectar un aglutinante en estado líquido en posiciones determinadas para unir, mediante reacción química y/o térmica, materiales en polvo.
- **Deposición de energía focalizada, DED (Direct Energy Deposition):** proceso de fabricación aditiva que, a través de energía térmica focalizada (láser, arco de plasma o haz de electrones) funde el material según lo va depositando. El material puede ser polvo o un hilo.
- **Extrusión de material, MEX (Material Extrusion):** consiste en proyectar el material, selectivamente, a través de una matriz caliente con un orificio. El material suele ser un filamento o una pasta (termoplásticos y cerámicas estructurales) y el mecanismo de unión una reacción química y/o térmica.
- **Proyección de material, MJT (Material Jetting):** la metodología que sigue consiste en depositar selectivamente material en forma de gotas (fotopolímero líquido, cera fundida) que al mismo tiempo se cura con luz UV presente en el cabezal.

- **Fusión de lecho en polvo, PBF (Powder Bed Fusion):** el material situado en una cama de lecho en polvo se funde de forma selectiva a través de energía térmica (láser, haz de electrones, lámparas de infrarrojos) que lo funde/sinteriza.
- **Laminado de hojas, SHL (Sheet lamination):** láminas de material son cortadas con una forma determinada a través de un láser de CO_2 o mediante corte mecánico.
- **Fotopolimerización en tanque o cuba, VPP (Vat Photopolymerization):** proceso que consiste en curar selectivamente, mediante polimerización activada por luz UV, un polímero en estado líquido contenido en una cuba. [20]

2. Objetivos:

El objeto principal del estudio consiste en el diseño y posterior optimización topológica de una biela de bicicleta, para que pueda ser materializada a través de técnicas de fabricación aditiva.

Como objetivos secundarios se persigue la reducción de peso del componente, dada la importancia de dicha característica en ciertas modalidades de ciclismo. Además, también se busca implementar el uso de una plataforma de trabajo y diseño colaborativo, como es el caso de 3DExperience.

3. Metodología:

En este capítulo se tratará los diferentes recursos empleados para desarrollar el estudio y cumplir los objetivos.

3.1. Uso de la plataforma 3DExperience:

La plataforma colaborativa 3DExperience surge por la necesidad de las empresas por satisfacer los nuevos ecosistemas de trabajo que están sugiriendo la industria, basados en la colaboración en tiempo real de los diferentes departamentos que participan en un proyecto.

3DExperience es una plataforma de trabajo y diseño colaborativa, la cual permite la conexión e implicación de las diferentes competencias que están presentes durante el desarrollo de un proyecto, permitiendo que trabajen de forma conjunta y obteniendo como resultado una optimización del proceso seguido para la materialización de dicho proyecto. La forma en la que la plataforma logra esto es a través de los roles, a los que están asociadas diferentes aplicaciones.

Para la realización del estudio se emplearán aplicaciones contenidas en los roles de diseño, las cuales serán:

- *Part Desing*: proveniente de los roles de diseño, y que se va a utilizar para el diseño inicial de la biela de la bicicleta.
- *Structural Generative Desing*: módulo que se empleará para la elaboración de la optimización topológica de la biela y que además permitirá el análisis de cargas para cada resultado obtenido o para el diseño inicial.
- *Material Definition*: que será el módulo que permitirá introducir las características del polvo metálico utilizado para la fabricación de la biela.

3.2. Elementos utilizados para la fabricación:

Para materializar la biela será necesario una máquina que posea una cama con la suficiente capacidad como para poder imprimir la biela, de la manera más rápida y económica posible. También se debe tener en cuenta que dicha máquina tenga la capacidad de imprimir un material con unas propiedades mecánicas lo suficientemente buenas, ligero y con un coste económico razonable.

Con esto se pretende producir una biela con unas características lo suficientemente buenas, pero compensado en la mayor cantidad el inconveniente que tiene la fabricación aditiva con el precio unitario de las piezas producidas.

3.2.1. Máquina de fabricación aditiva:

Se va a emplear el modelo DMP Factory 500 de 3DSystems, que es la solución que mejor se adapta a las necesidades planteadas.

Es una máquina de fabricación aditiva con la tecnología DMP (Direct Metal Printing) de 3DSystemes. Esta tecnología permite imprimir piezas metálicas de gran complejidad a partir de archivos CAD, a través de DMLS (Direct Metal Laser Sintering), así como optimizaciones topológicas con gran precisión.

Está diseñada para la producción en serie de piezas, ya que tiene un sistema de múltiples láseres que sinterizan al mismo tiempo. Posee una cama de 500 x 500 x 500 mm, lo cual permite fabricar hasta 12 bielas al mismo tiempo. Además, es capaz de producir piezas con una repetibilidad muy elevada y con una calidad uniforme.

La máquina está formada por 5 módulos, que con su funcionamiento en conjunto logran reducir los tiempo de producción. Los módulos son los siguientes:

- **Printer Module:** es la cabina donde se realiza el proceso de fabricación.

- **Rmovable Print Module:** es la cama de impresión que va en el interior del *Printer Module*, la cual se puede extraer de este, permitiendo sustituirla por una cama preparada para una nueva producción.
- **Depowdering Module:** módulo encargado de retirar el polvo sobrante de las piezas creadas.
- **Powder Recycling Module:** filtra y recicla el polvo utilizado en las impresiones. También se encarga de cargar los *Removable Print Modules* para que esté listo para una nueva impresión.
- **Transport Module:** es un toro que facilita el transporte y la colocación de los *Removable Print Modules*.
- **Parking Module:** módulo de almacenamiento de los *Removable Print Modules* que está listos para una producción.

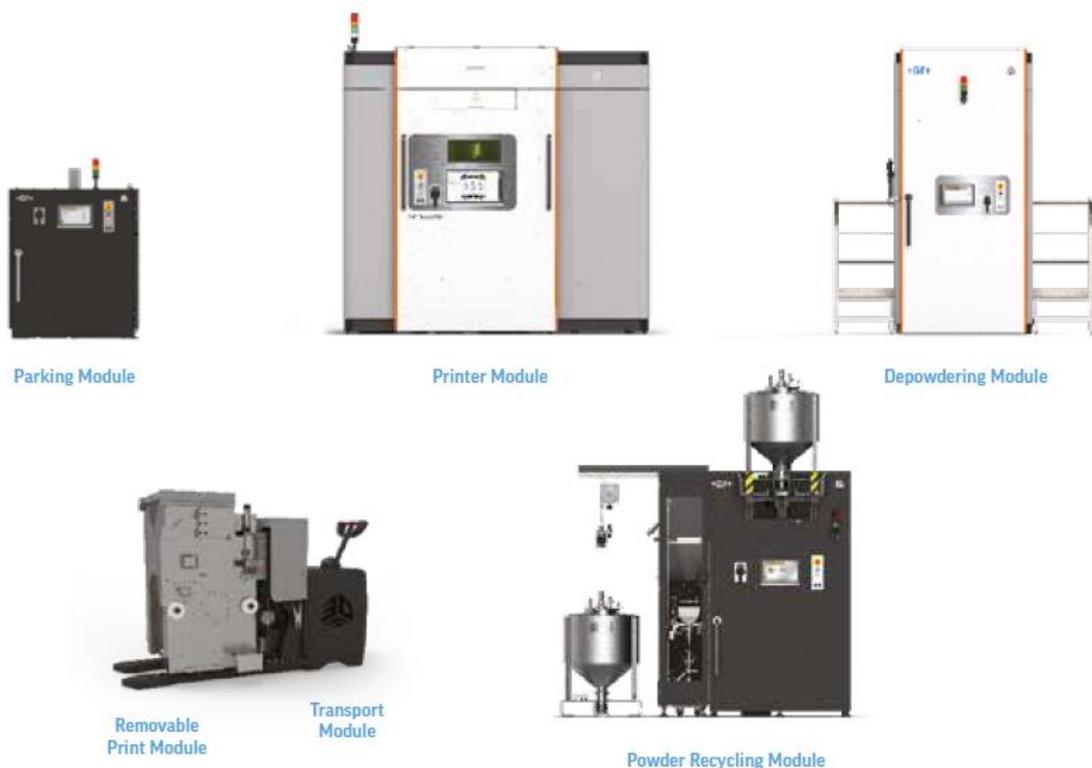


Ilustración 12. DMP Factory 500 (Fuente: [21])

Dentro de los materiales que permite imprimir la máquina, se encuentra la aleación de aluminio AlSi10Mg, con buenas propiedades mecánicas y ligera. Por lo tanto, cumple los requisitos necesarios.

3.2.2. Polvo metálico AlSi10Mg:

Se trata de una aleación de aluminio con unas propiedades mecánicas buenas, que junto a su baja densidad, lo convierte en un material ideal para el objetivo del estudio. Además, es uno de los metales de impresión más económicos en el mercado.

Es utilizado en la industria aeroespacial, en el sector de la automoción y en la refrigeración de componentes electrónicos gracias a sus buenas propiedades térmicas.

Sus propiedades son las siguientes:

MEASUREMENT	STANDARD GRADE	PERFORMANCE GRADE
Density	>2.59 g/cm ³	> 2.65g/cm ³
Relative Density	>97.0%	>99.0%
Tensile Strength	>250 MPa	>300 MPa
Yield Strength	>180 MPa	>190 MPa
E-Modulus	70 GPa	70 GPa
Elongation at Break	>1.0%	>2.0%
Roughness R _a	<20 μm	<16 μm
Roughness R _z	<80 μm	<70 μm
Hardness	>80 HV	>100 HV

Ilustración 13. Propiedades mecánicas de AlSi10Mg (Fuente:[22])

4. Diseño de biela:

Para realizar una optimización topológica es necesario partir de un modelo previo, por lo que se diseñará una biela inicial y se le someterá a un estudio para validarla. Una vez obtenida una biela válida se procederá a la optimización, la cual será sometida al mismo proceso de validación que la biela de partida. Finalmente se compararán los resultados obtenidos.

4.1. Biela inicial:

Para el diseño de la biela se va a emplear la aplicación “Part Design” de 3DEXPERIENCE, con la que se generará un modelo CAD del producto, siguiendo los parámetros explicados en el apartado 1.2.1 del documento.

4.1.1. Diseño CAD de la biela:

El proceso de diseño es el siguiente:

1. Dibujo de los *Sketch* que darán la forma a la biela en dos planos diferentes. De esta manera se estará generando dos plantillas que servirán de base para futuras operaciones de extrusión y corte:

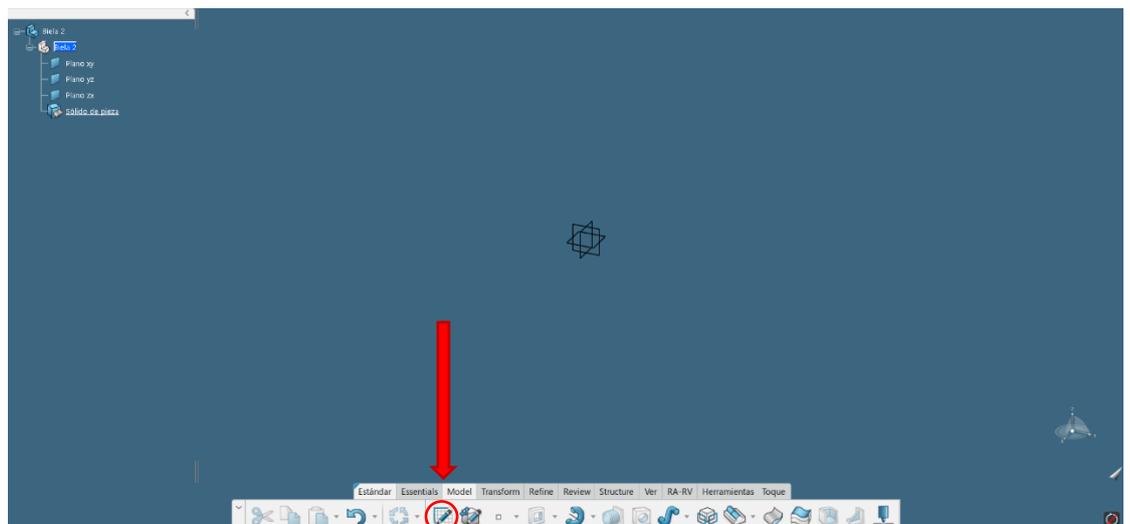


Ilustración 14. Part Design: Sketch.

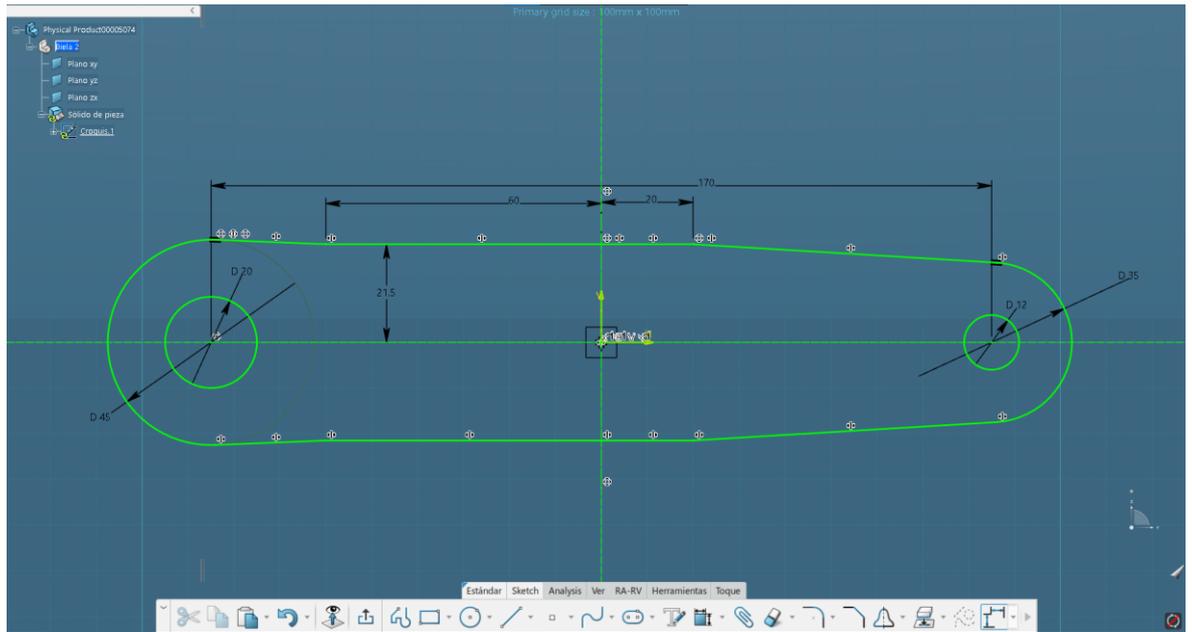


Ilustración 15. Part Design: Plantilla 1.

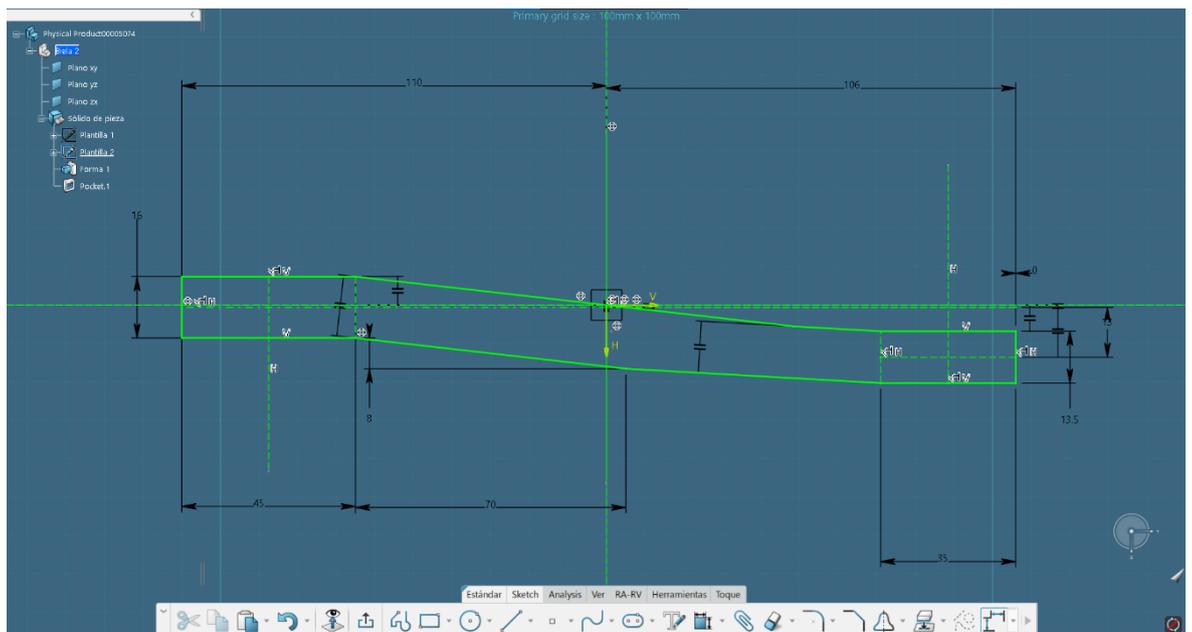


Ilustración 16. Part Design: Plantilla 2.

2. El segundo paso consiste formar el cuerpo de la biela. Esto se conseguirá a través de las operaciones *Pad* y *Pocket* que se localizan en la barra de herramientas *Essentials*. En primer lugar se extruirá la plantilla 1 con la herramienta *Pad* y posteriormente, con la plantilla 2 y la herramienta *Pocket* se refinará la forma principal de la biela:

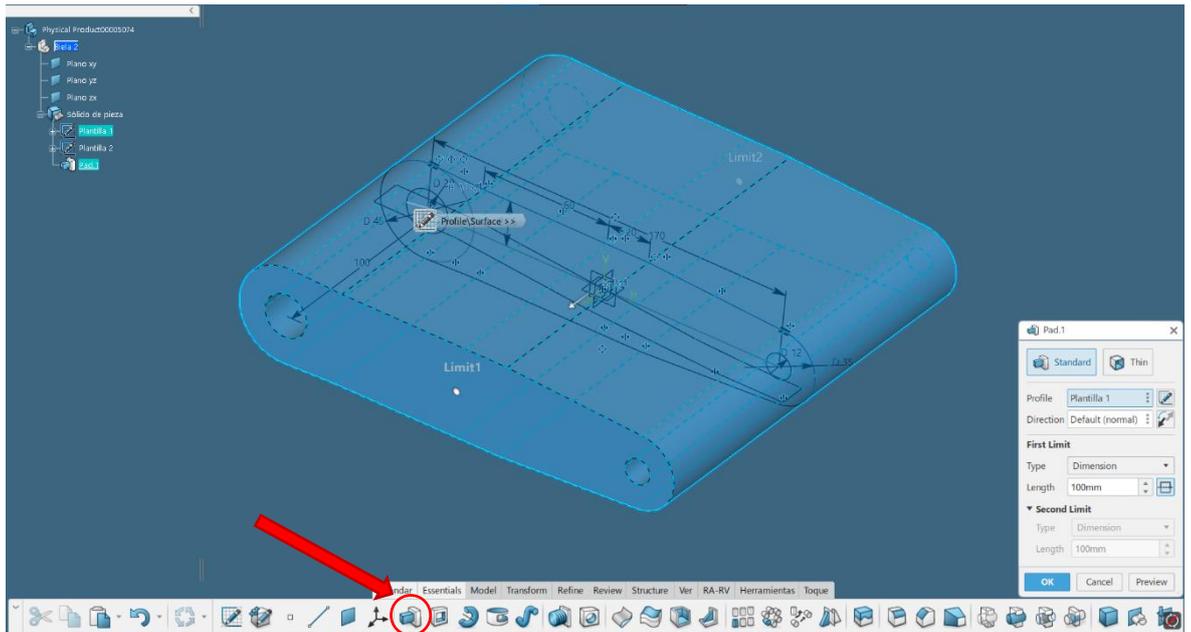


Ilustración 17. Part Design: Pad.

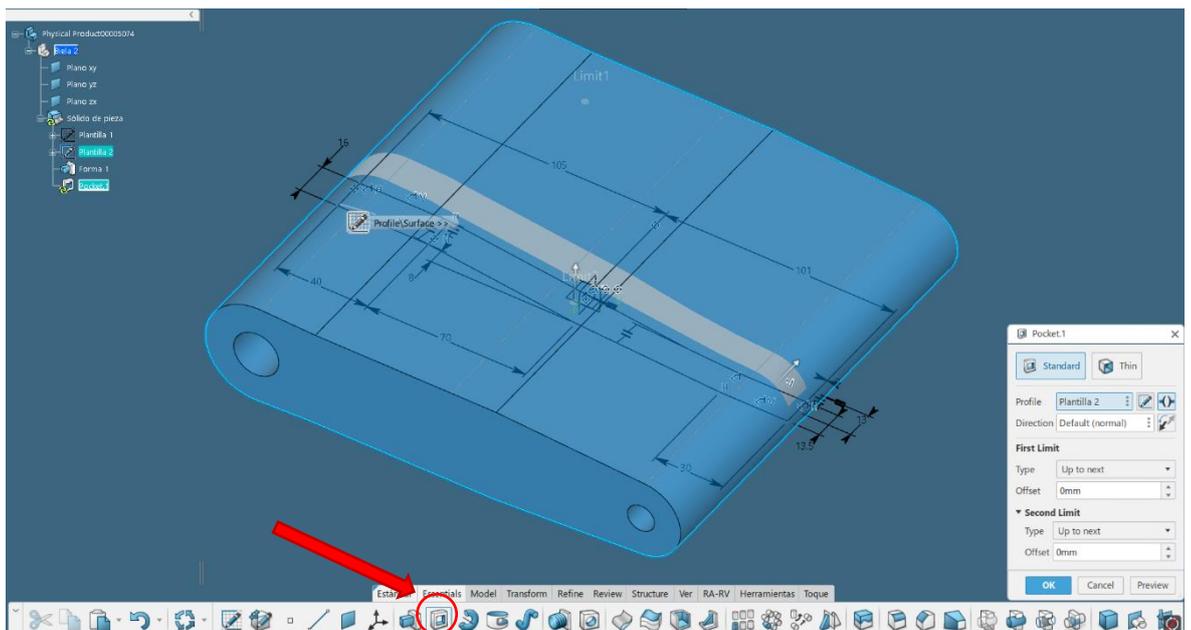


Ilustración 18. Part Design: Pocket.

Con esta técnica de diseño se está creando una biela paramétrica, de tal forma que si se quiere modificar la longitud de biela o de la curvatura, bastaría con modificar las cotas de las plantillas, y todo el diseño se ajustará.

3. Como tercer paso, se generará el anclaje para el eje del pedalier. En esta operación se procederá con una extrusión, utilizando la herramienta *Pad* y un corte con la forma estrellada del eje a través de *Pocket*:

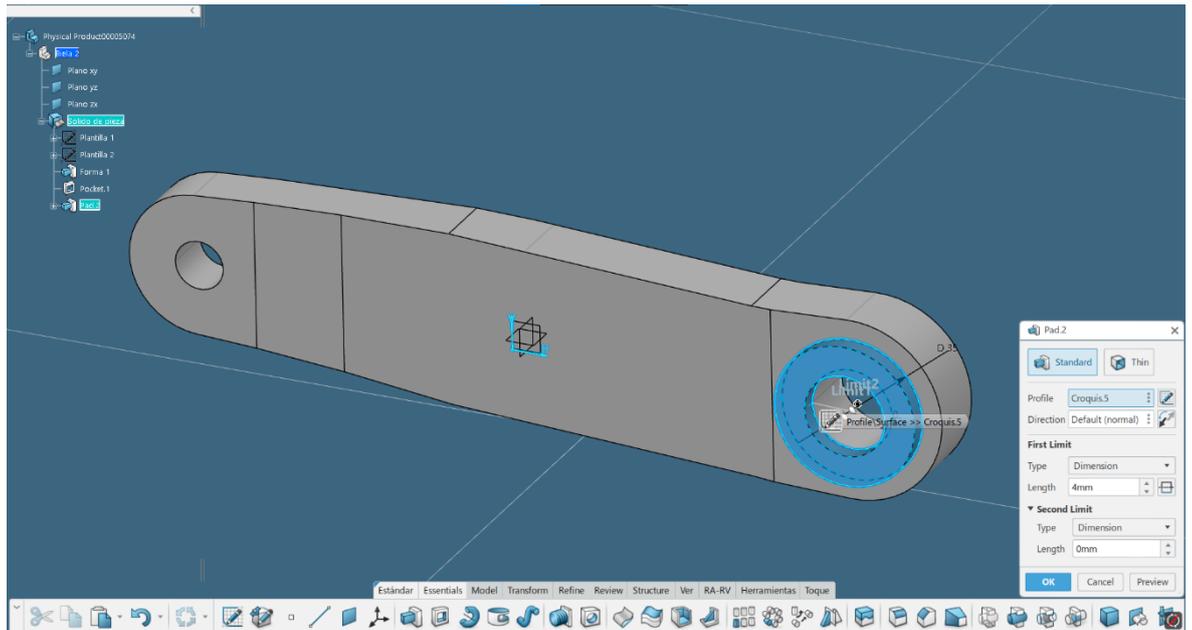


Ilustración 19. Part Design: Cavidad eje pedalier.

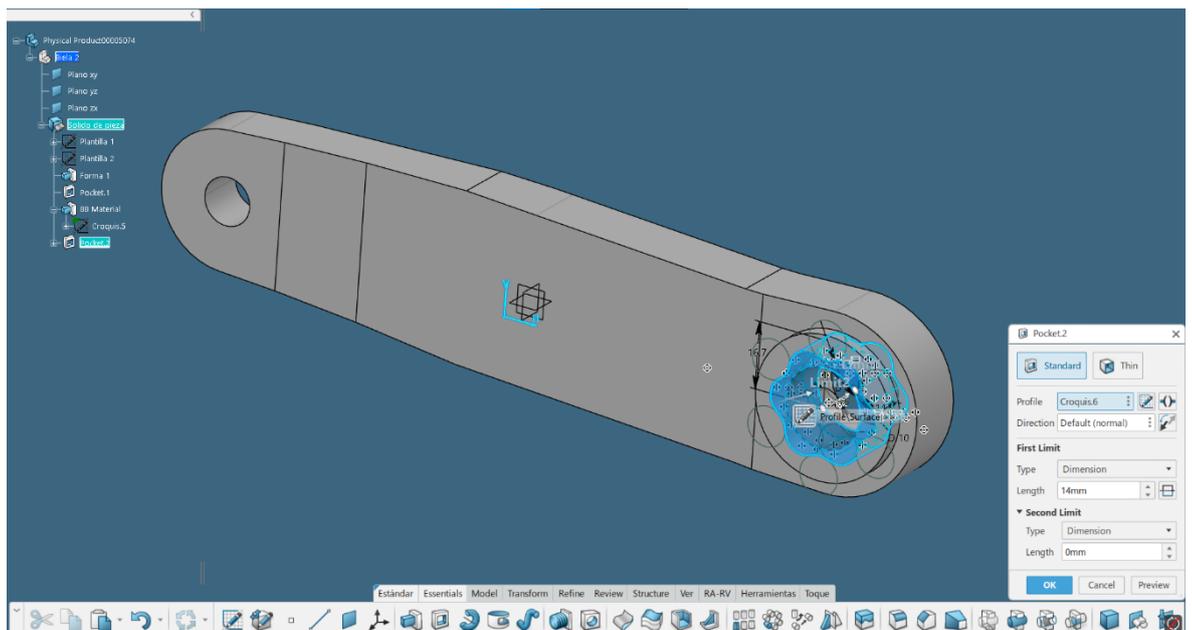


Ilustración 20. Part Design: Hembra eje pedalier.

El patrón del agujero hembra del eje de pedalier tiene las medidas de un eje comercial.

4. Es necesario crear un asiento para el eje del pedal y para el tapón roscado que cierra el hueco del eje del pedalier, para evitar la entrada de suciedad y darle una seguridad añadida a la fijación de este, ya que en su interior está roscado para ensamblar el tapón. Para realizar estas operaciones se utilizará un *Pocket*:

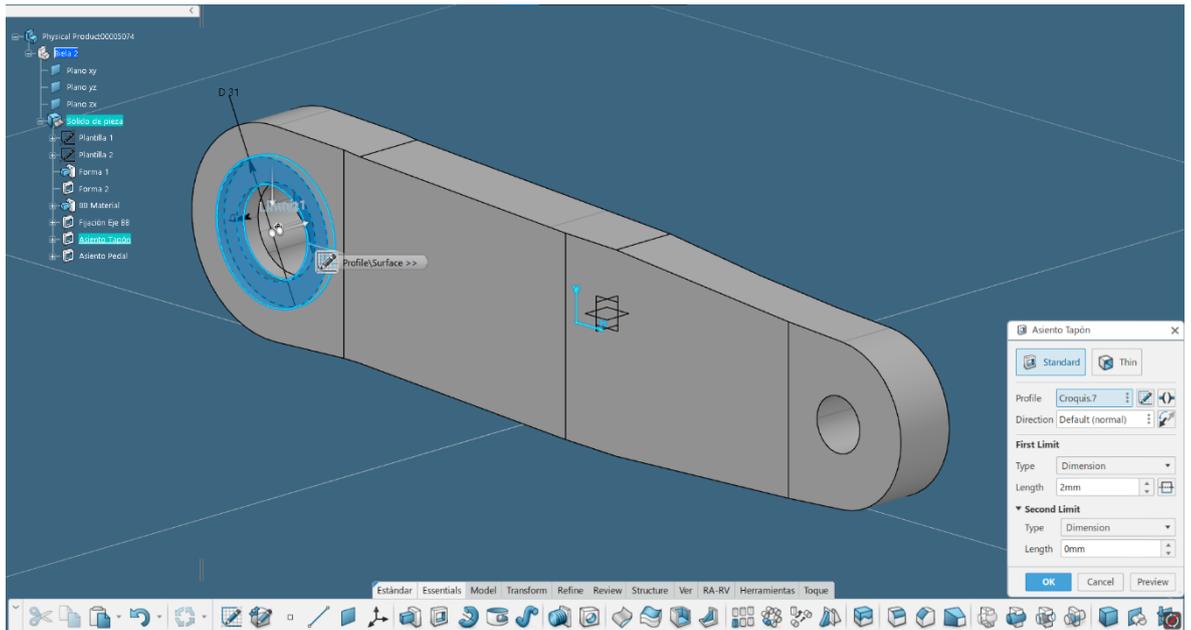


Ilustración 21. Part Design: Asiento para tapón.

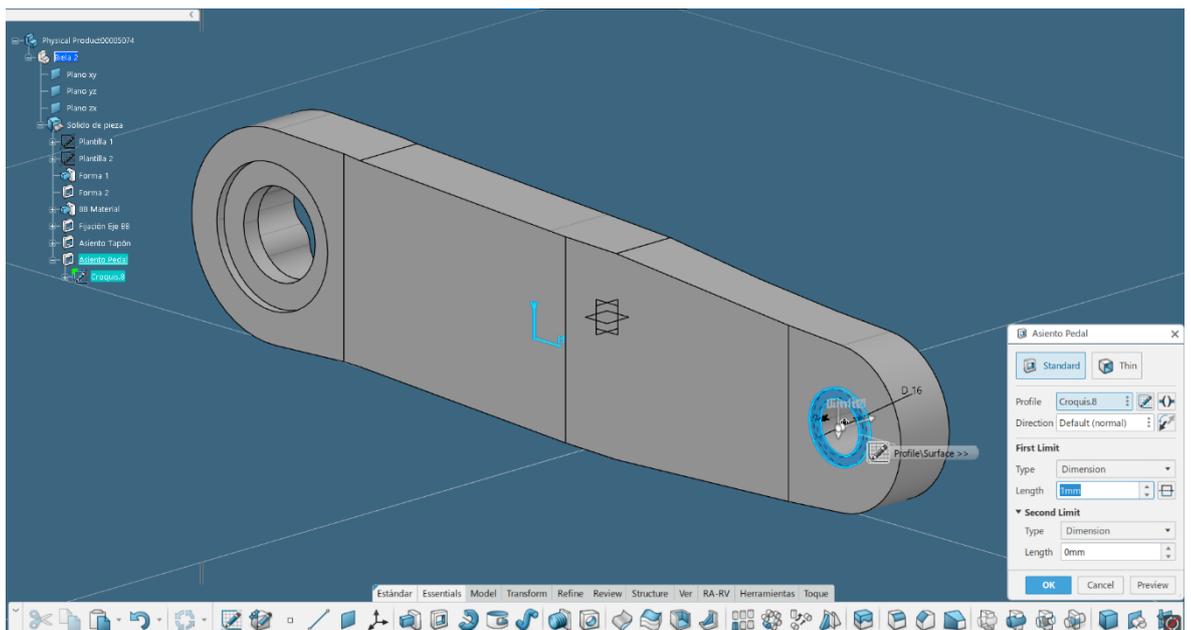


Ilustración 22. Part Design: Asiento para eje de pedal.

5. El quinto paso es realizar el anclaje del plato de tipo *Direct Mount*, para lo cual se deberá crear el macho con el patrón de la nombrada tipología de plato, así como las roscas para la fijación de este. Las dimensiones para las operaciones están normalizadas, por lo que se procederá creando un croquis en el que se dibujarán. Posteriormente se utilizará la herramienta *Pocket* y la herramienta *Circular Pattern* para vaciar la parte del sólido que sobra. En cuanto a los

taladros para la fijación, se realizarán de la misma forma, siendo los tornillos utilizados unos ISO 7380 TORX M5 x 10.

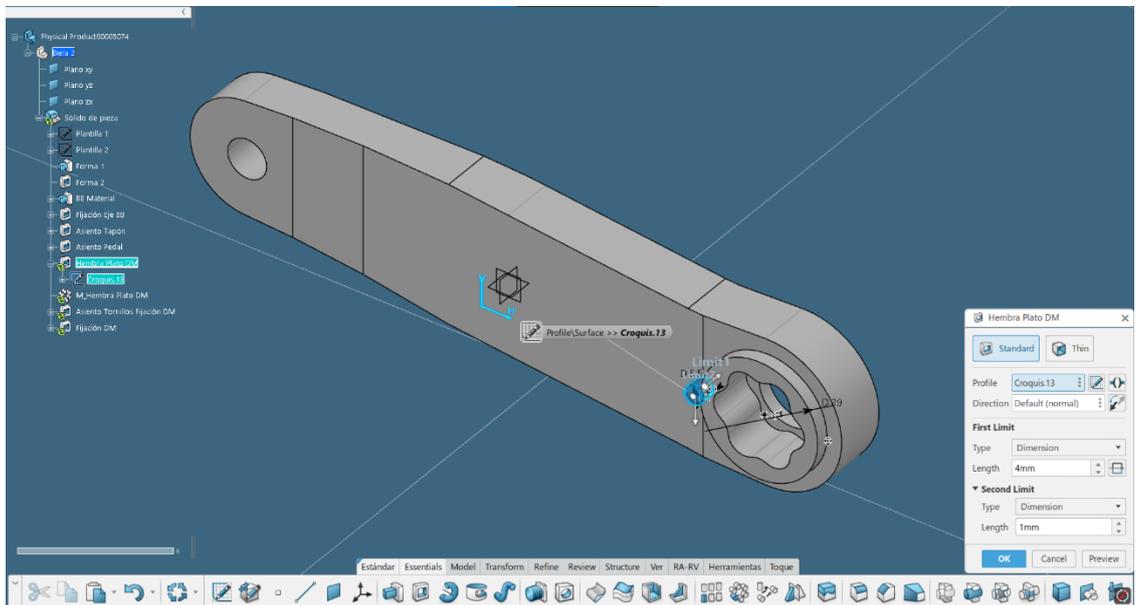


Ilustración 23. Part Design: Fijación plato DM.

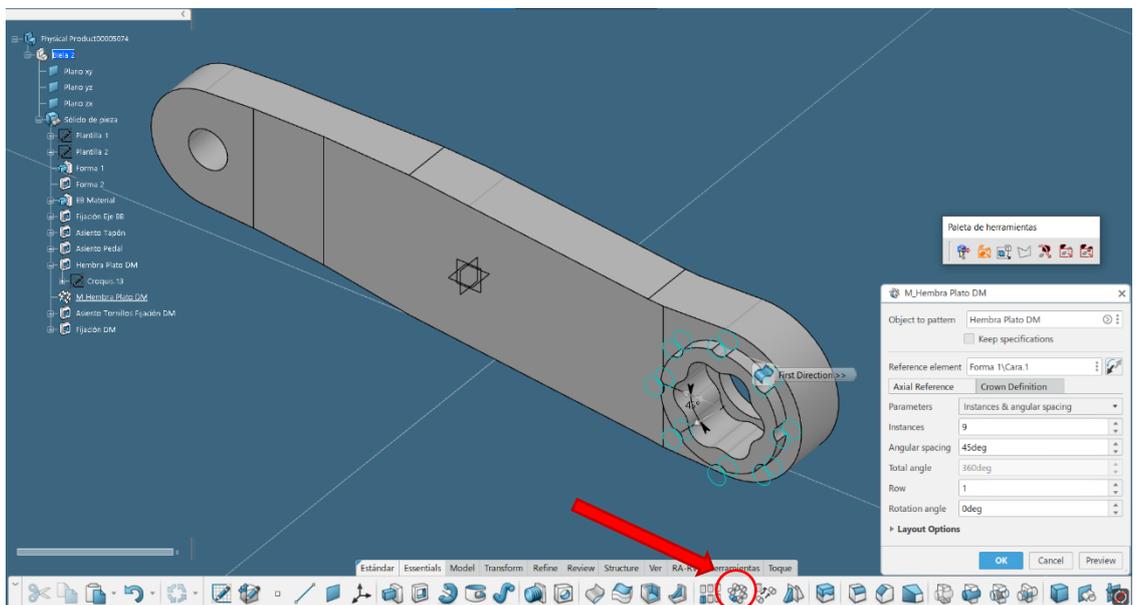


Ilustración 24. Part Design: Agujeros para fijación plato.

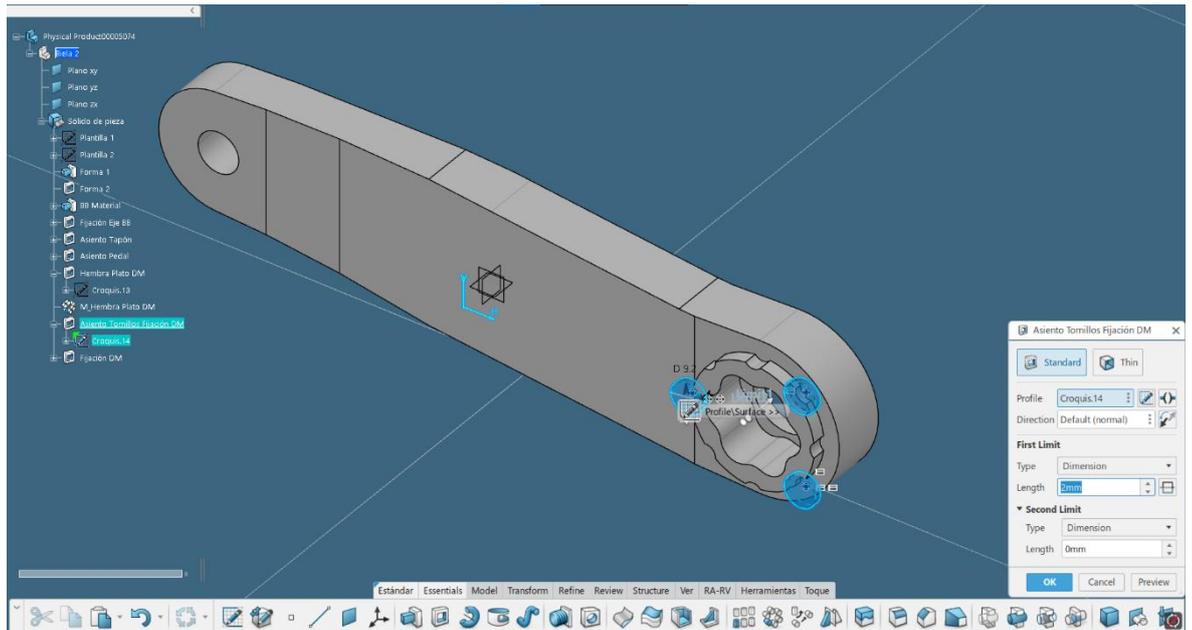


Ilustración 25. Part Design: Asiento para plato DM.

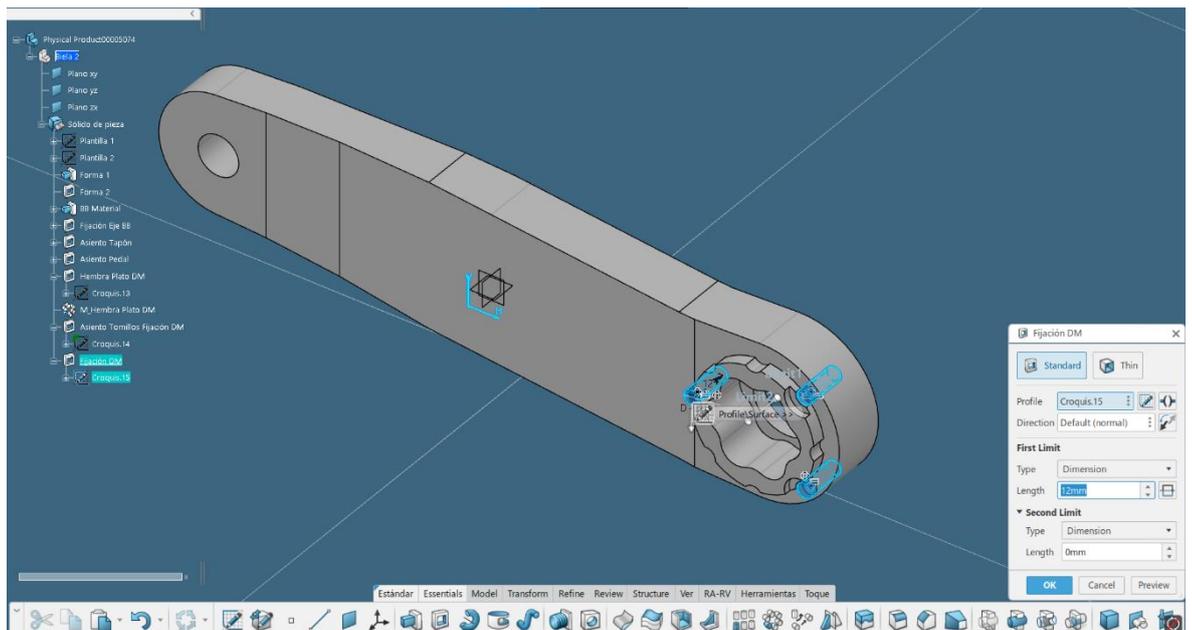


Ilustración 26. Part Design: Taladro para roscas M5.

6. La siguiente operación que se tiene que realizar es el redondeo de aristas vivas en los orificios donde van alojados los ejes, ya que de esta manera se facilitará su acople. Para crear los redondeos se va a utilizar la herramienta *Chanfer*:

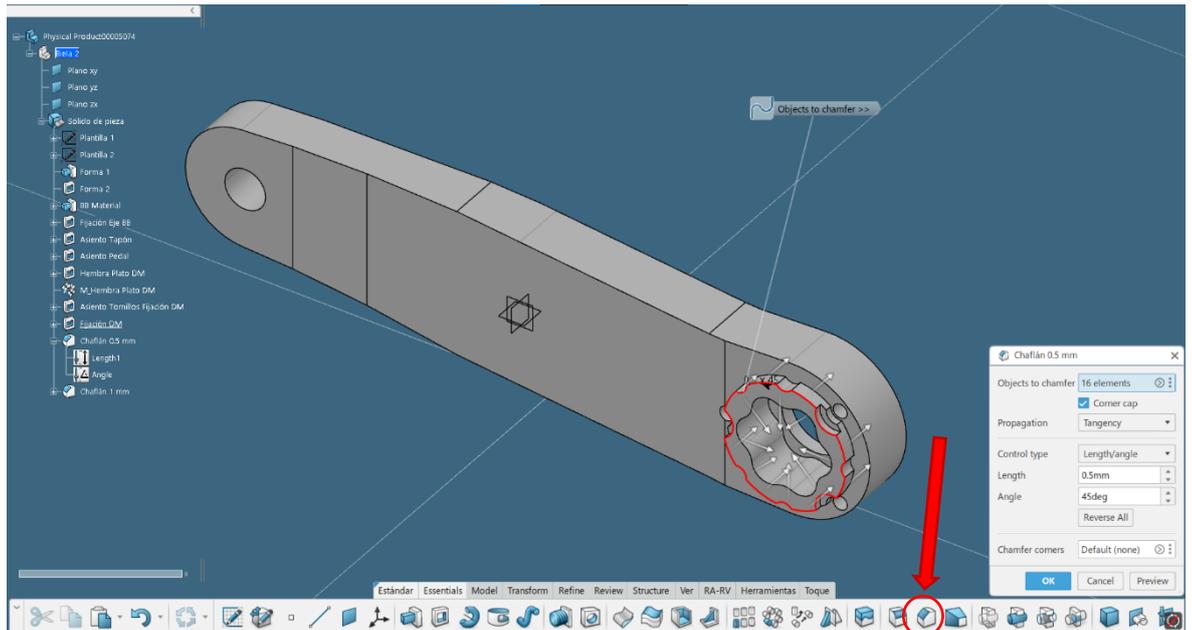


Ilustración 27. Part Design: Chaflán 0,5 mm.

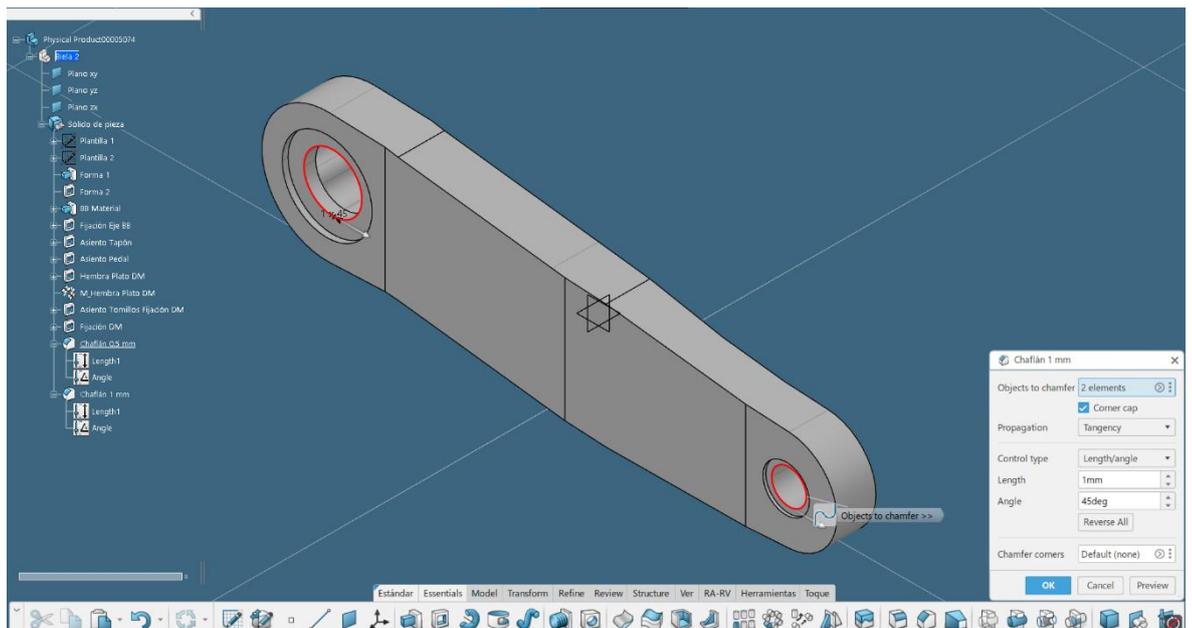


Ilustración 28. Part Design: Chaflán 1 mm.

7. Finalmente, para rematar el diseño de la biela, se redondearán las aristas que están a lo largo del cuerpo de la biela con la herramienta *Edge Fillet*. También se achaflanarán las aristas vivas con la herramienta *Chanfer*, para evitar cortes y eliminar zonas de concentración de tensiones:

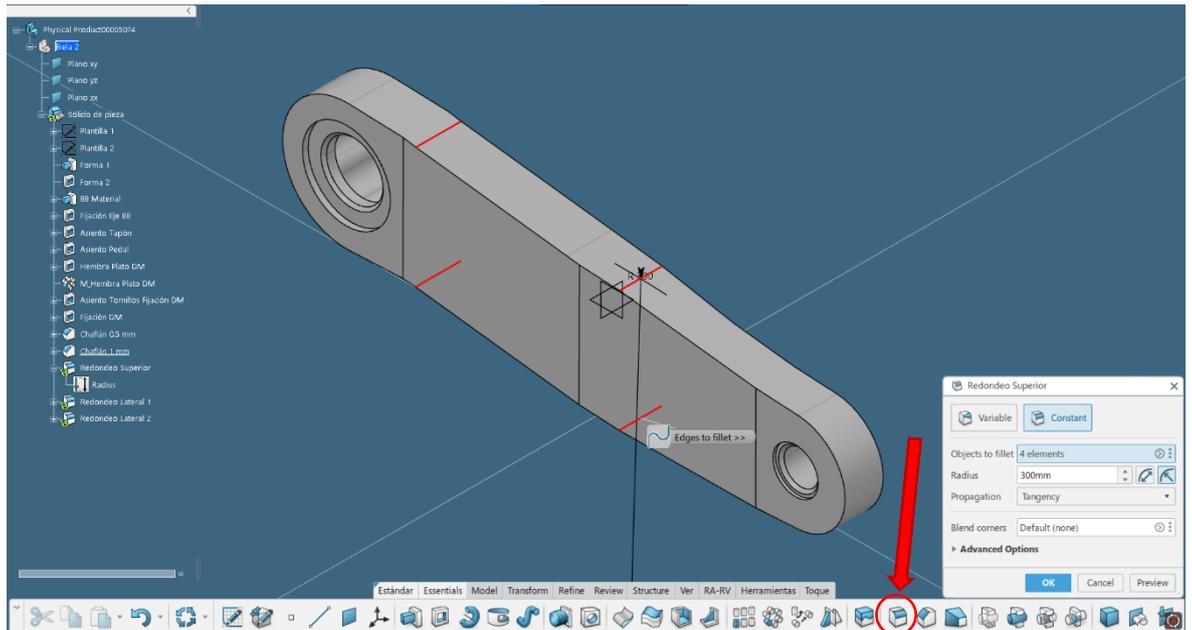


Ilustración 29. Part Design: Redondeo caras superiores.

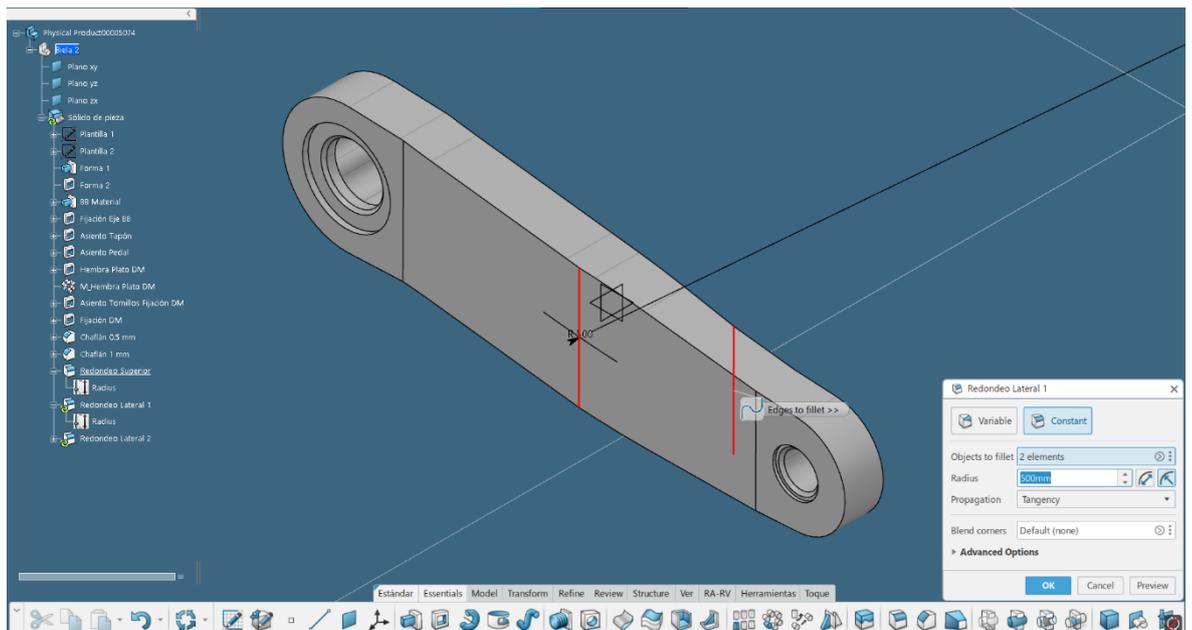


Ilustración 30. Part Design: Redondeo caras laterales 1.

El redondeo de las caras laterales se hace en dos operaciones por la diferencia de dimensiones que deben tener, ya que la curvatura de las esquinas que están pegadas a los agujeros de los ejes tienen menos superficie antes de invadir estos.

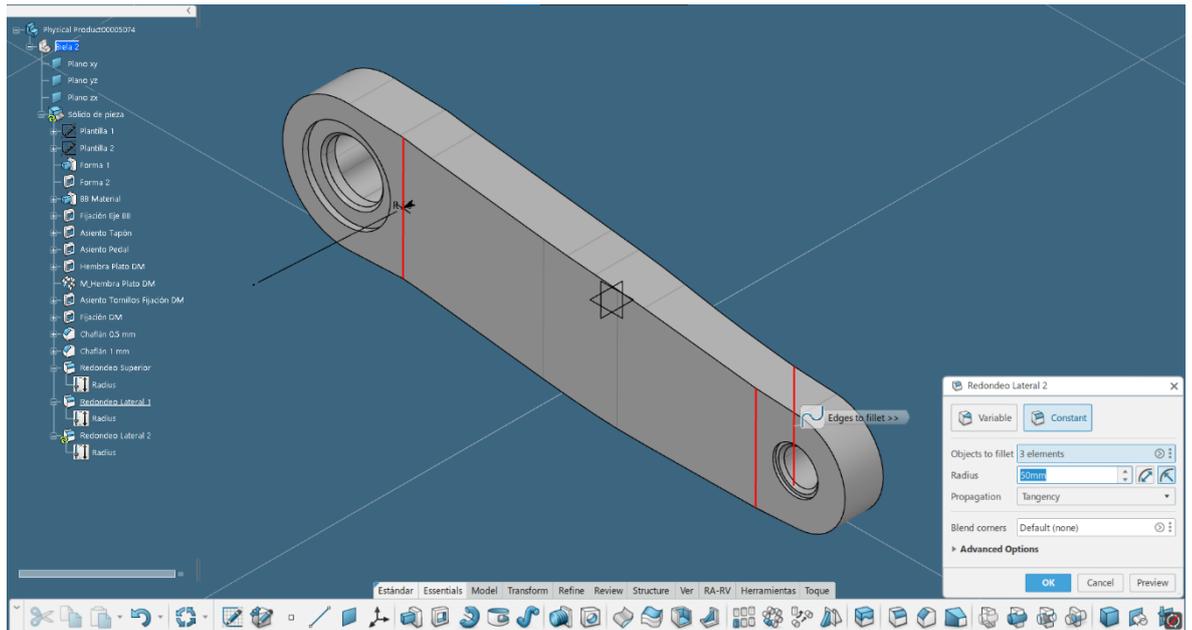


Ilustración 31. Part Design: Redondeo caras laterales 2.

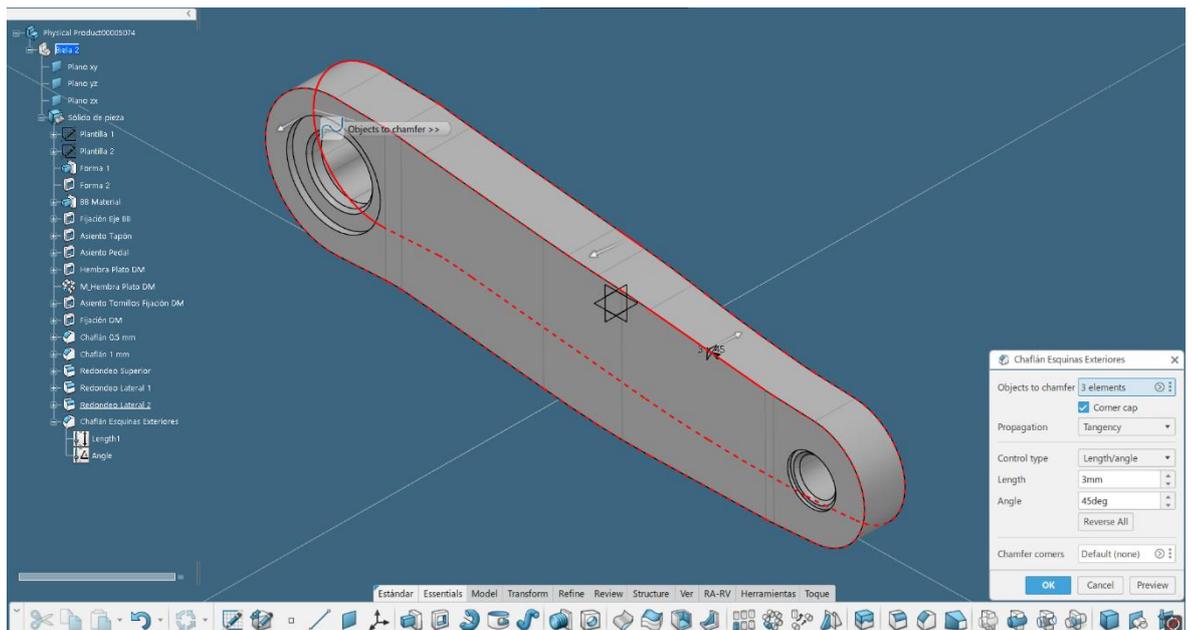


Ilustración 32. Part Design: Chañón aristas exteriores.

Con el conjunto de las operaciones mostradas queda finalizado el diseño de la biela, con el que se ha conseguido generar un modelo CAD paramétrico de la biela derecha, que es en la que está situado el plato. Para el modelo CAD de la biela izquierda se procede de la misma forma, solo que eliminando las operaciones generadas para el anclaje del plato (Ilustración 25 e Ilustración 26).

El resultado final es el siguiente:

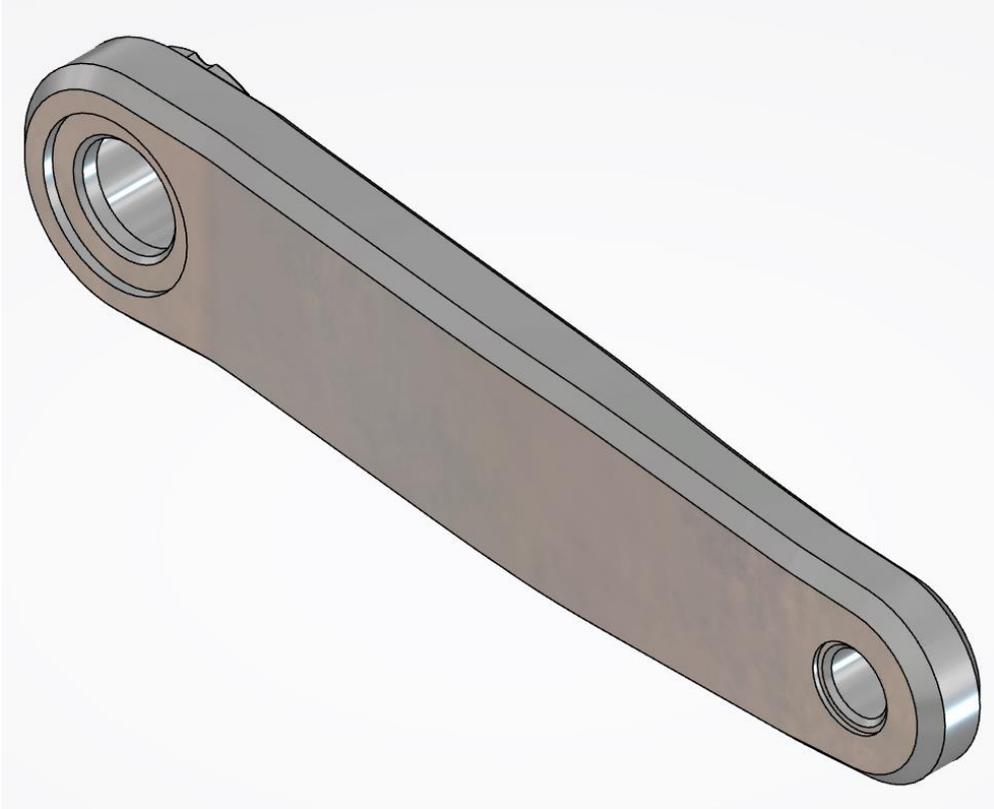


Ilustración 33. Vista Isométrica 1.

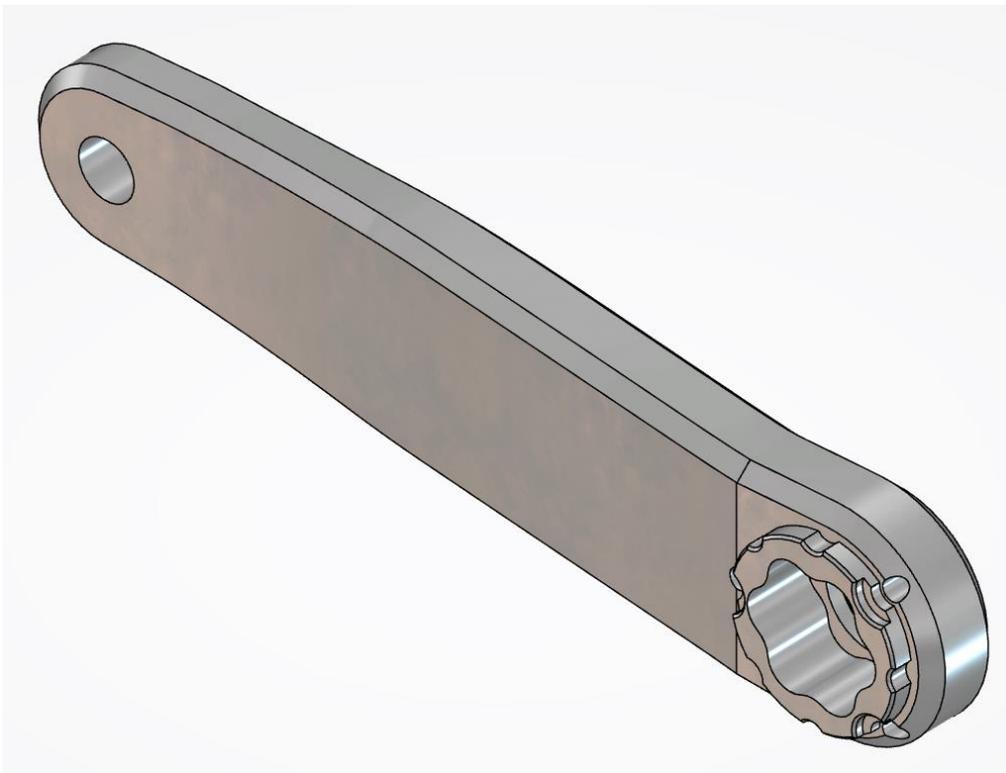


Ilustración 34. Vista Isométrica 2.

4.1.2. Análisis de esfuerzos:

Una vez diseñada la biela, se debe verificar a través de un análisis de esfuerzos. Para ello, se van a emplear dos aplicaciones de 3DEXPERIENCE: *Material Definition* y *Structural Generative Design*.



En primer lugar se usará la aplicación de *Material Definition* para añadir a la biblioteca de material el polvo metálico seleccionado previamente (AlSi10Mg). Se añadirán sus propiedades mecánicas y el proceso es el siguiente:

1. Una vez abierta la aplicación, se debe seleccionar el icono de *Agregar Material*:

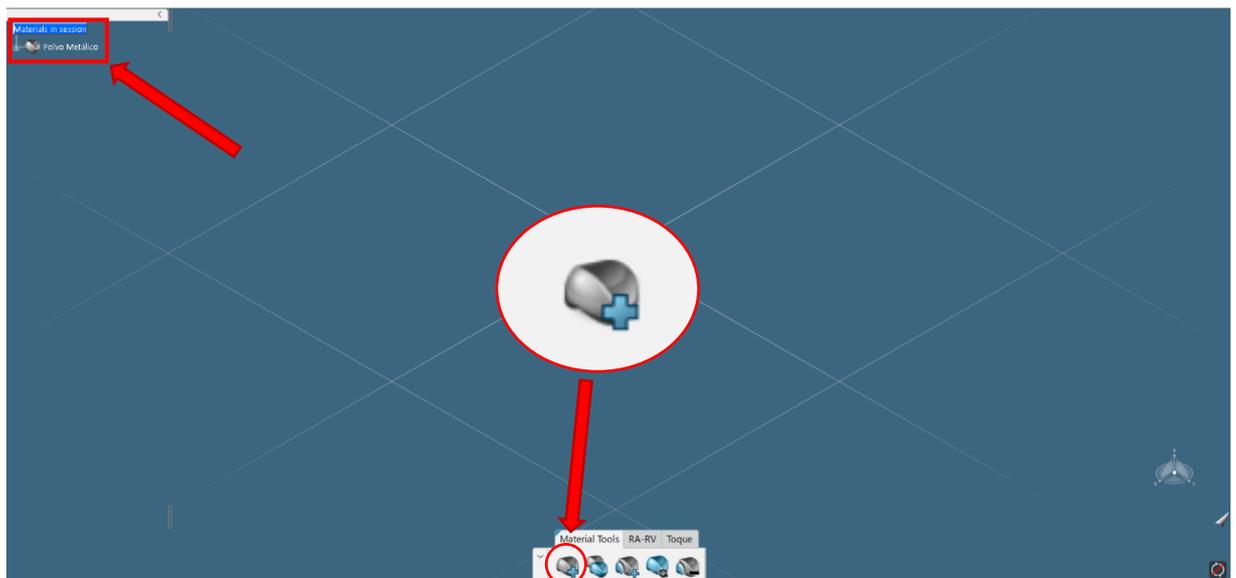


Ilustración 35. Material Definition: Creación de nuevo material.

Esta opción creará un elemento en el árbol de operaciones, que será nuestro material.

2. El siguiente paso consiste en añadir las propiedades mecánicas de nuestro material. Para lo cual, seleccionaremos el icono de *Agregar Dominio*. Se abrirá una pestaña, en la que elegiremos la opción de *Simulation Domain*:

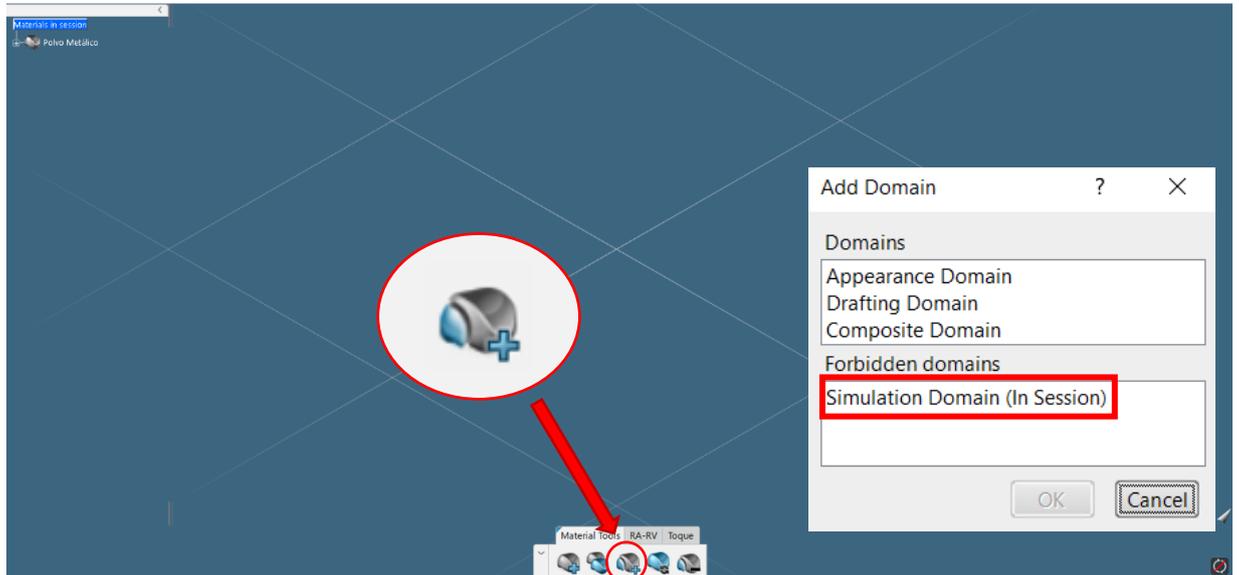


Ilustración 36. Material Definition: Simulation Domain.

Se habrá creado un elemento en el árbol de operaciones dentro del material que se añadió previamente. Dentro de este nuevo elemento se añadirán la características mecánicas del material.

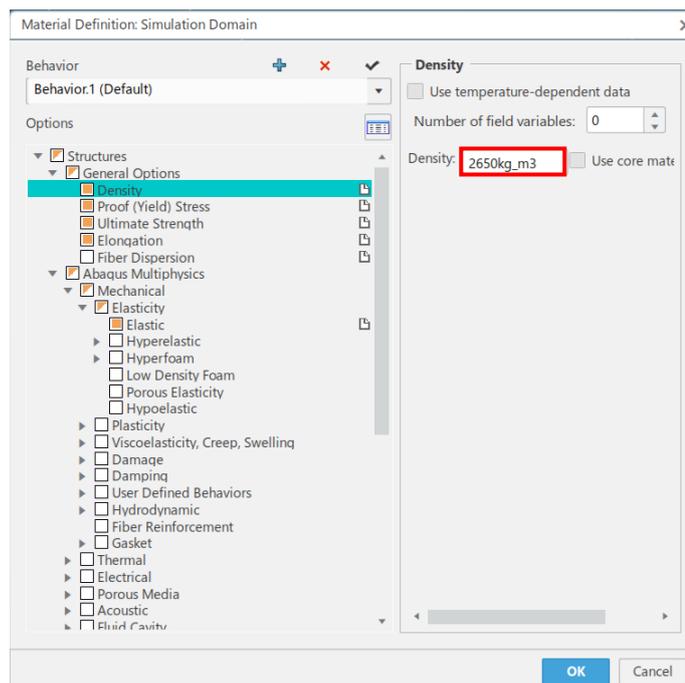


Ilustración 37. Material Definition: Densidad.

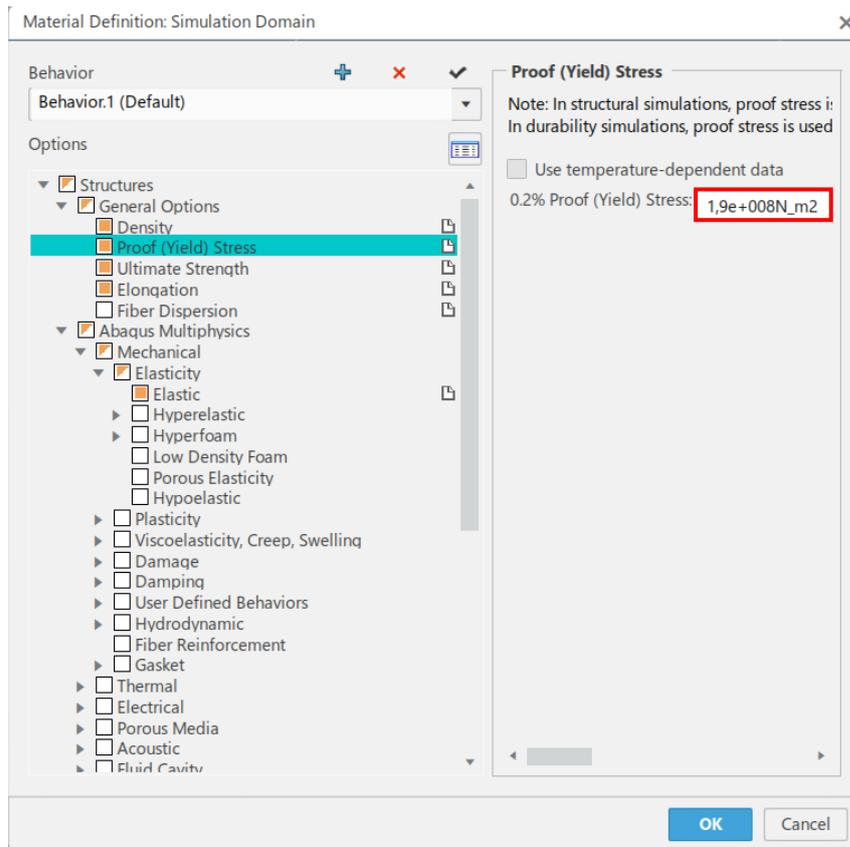


Ilustración 38. Material Adition: Límite elástico.

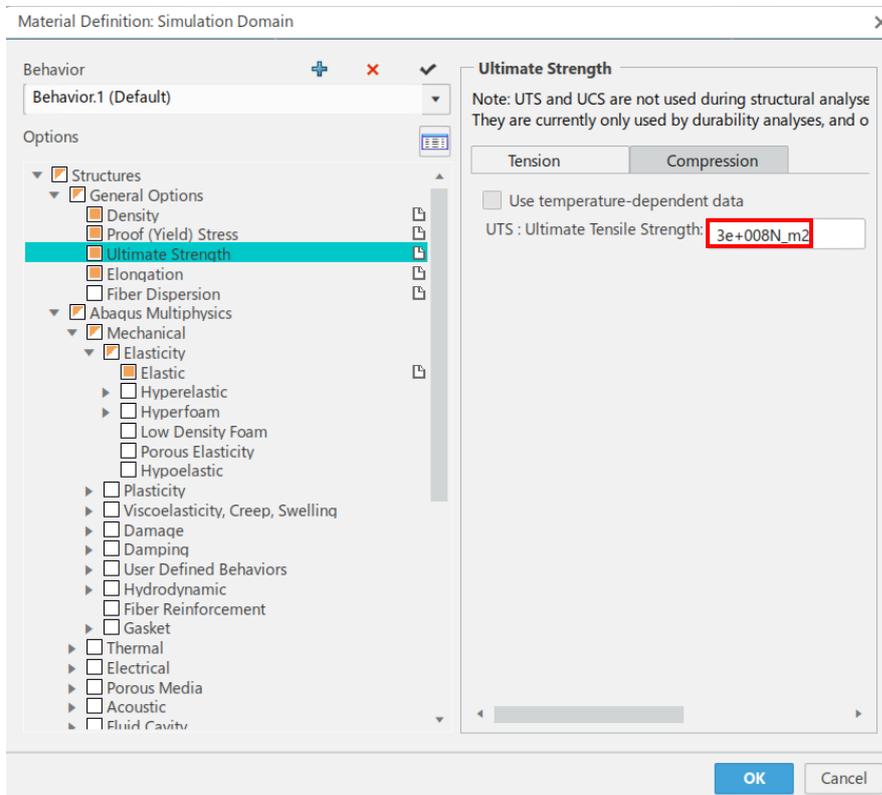


Ilustración 39. Material Definition: Límite último de rotura.

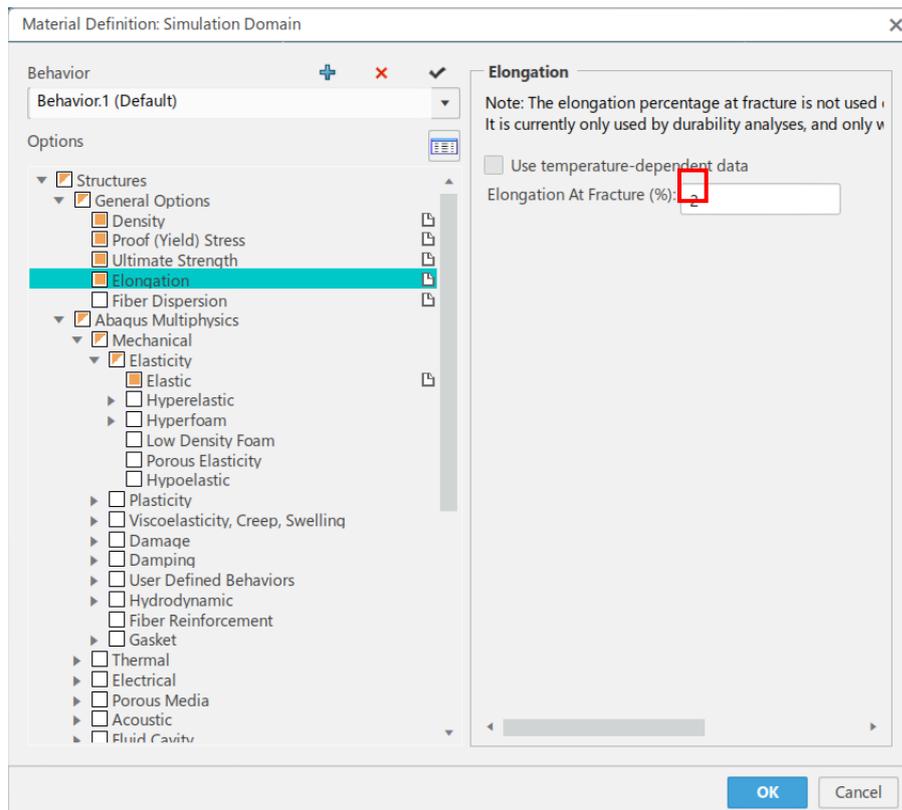


Ilustración 40. Material Definition: Enlongación.

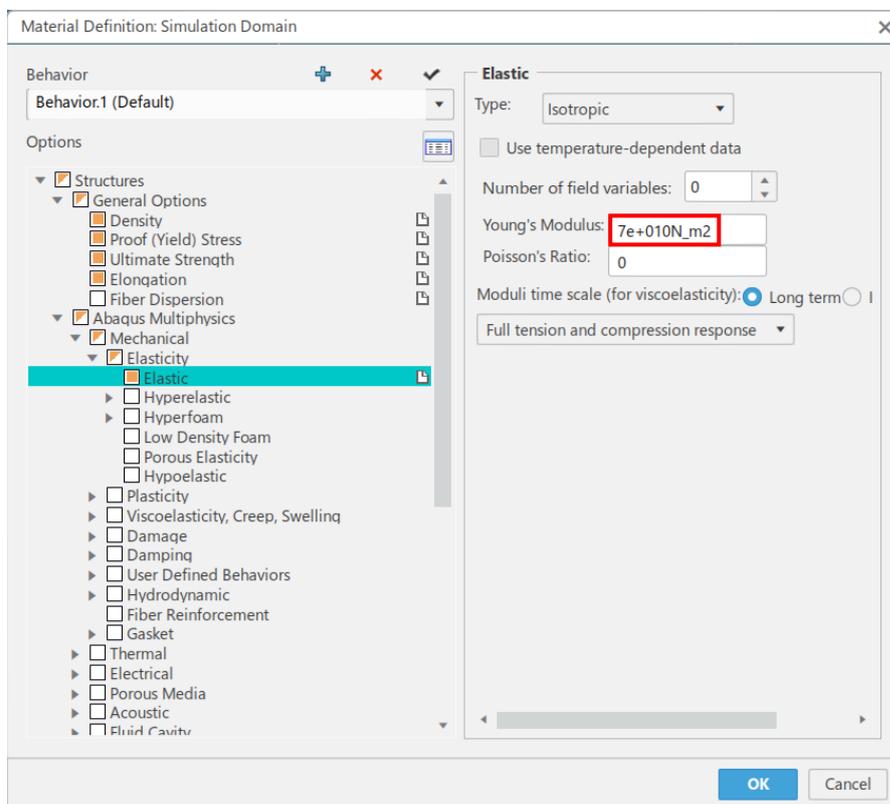


Ilustración 41. Material Definition: Constante de elasticidad.

Una vez definido el material, se pasará a la aplicación *Structural Generative Design*, en la que se realizará el análisis de esfuerzos para verificar que el diseño inicial propuesto es correcto.

El proceso seguido es el siguiente:

- Crear un caso de análisis nuevo, lo cual se hará a través del icono *Analysis Case*:

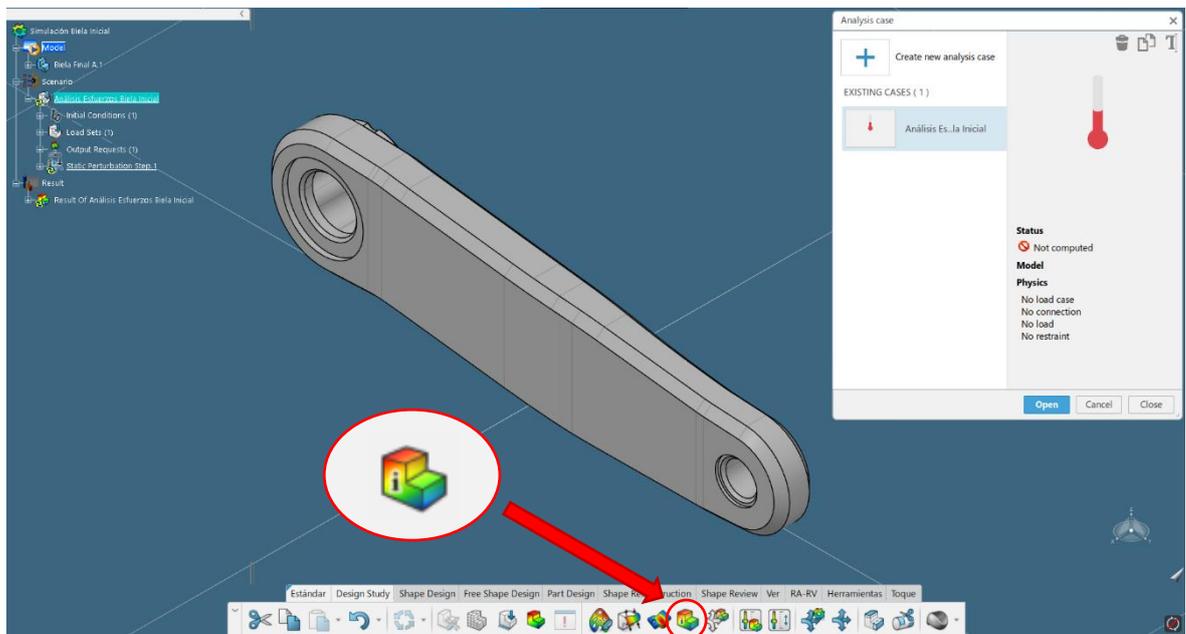


Ilustración 42. *Structural Generative Design*: Analysis Case.

- Una vez creado el caso de análisis, se introducirán los parámetros necesarios para realizar la simulación: cargas, restricciones, mallado y casos de cargas.

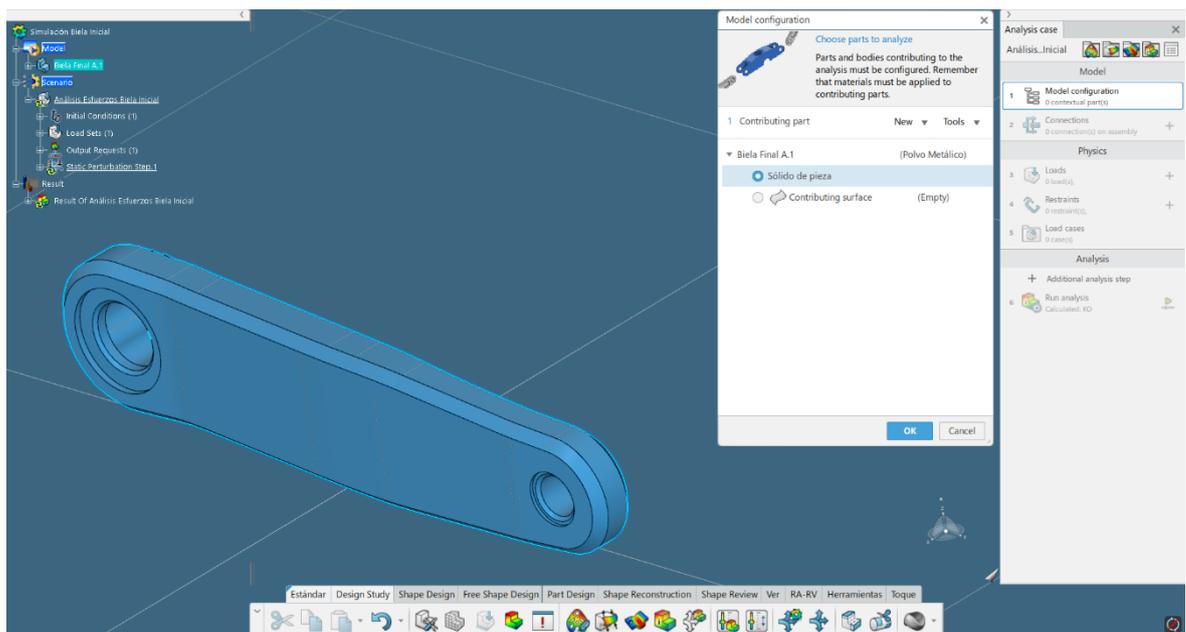


Ilustración 43. *Structural Generative Design*: Model Configuration.

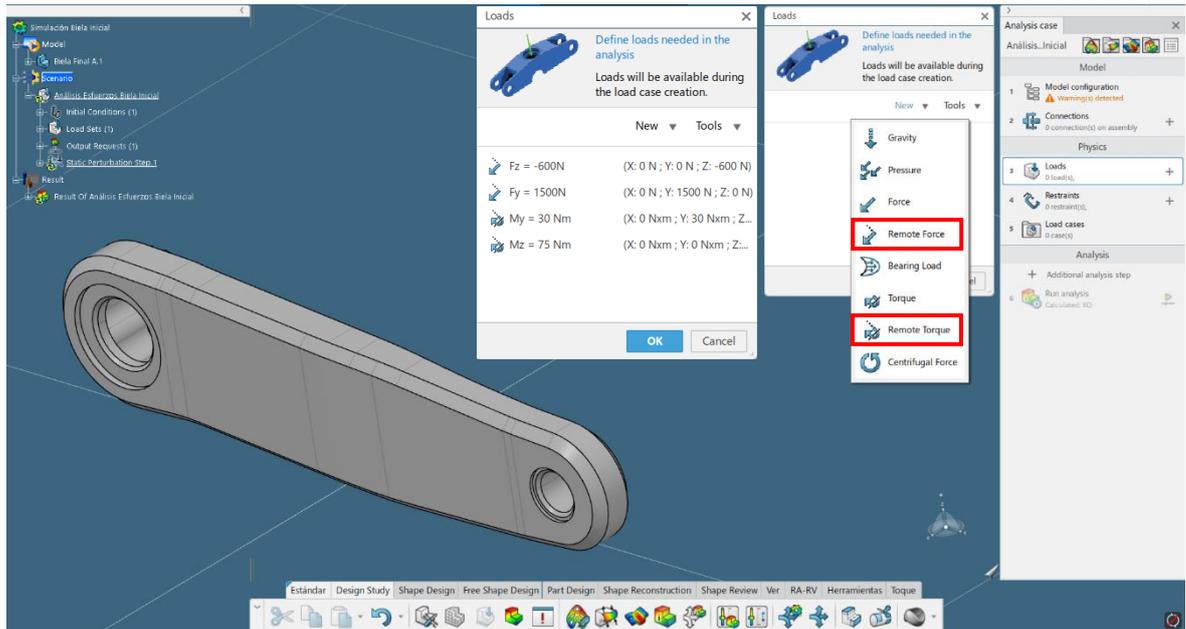


Ilustración 44. Structural Generative Design: Cargas.

Las cargas introducidas son el resultado de cálculos previos, los cuales se facilitan en el Anexo.

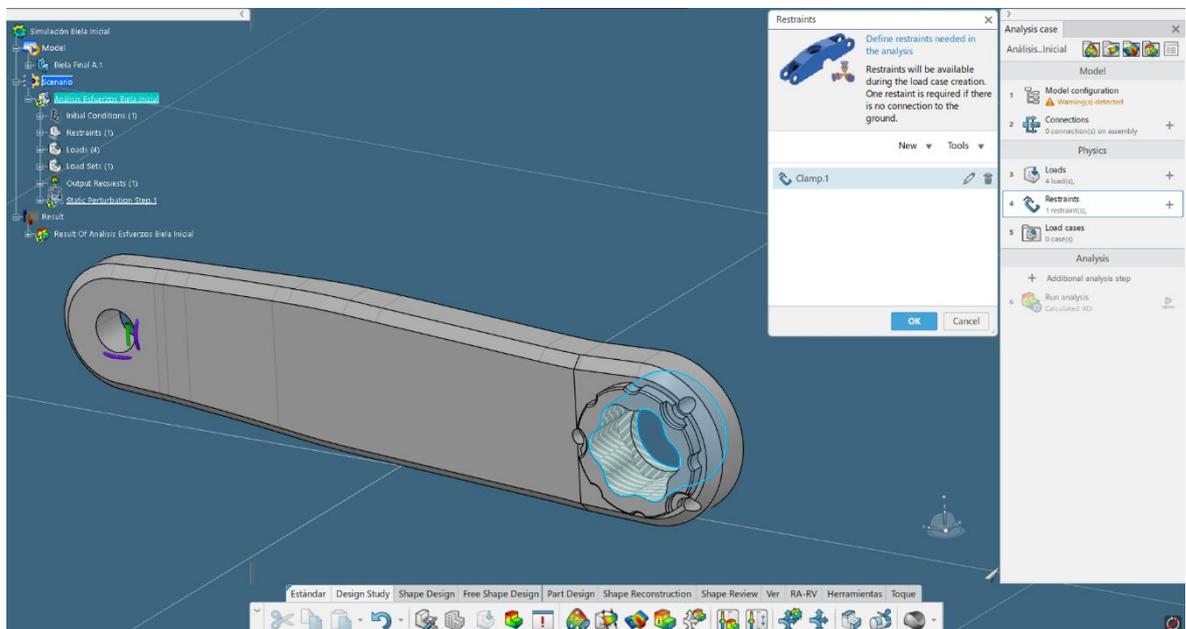


Ilustración 45. Structural Generative Design: Restricciones.

Como restricciones, se han fijado las caras que están en contacto con el eje del pedalier, ya que es la parte que fija la biela a la bicicleta y representaría un empotramiento.

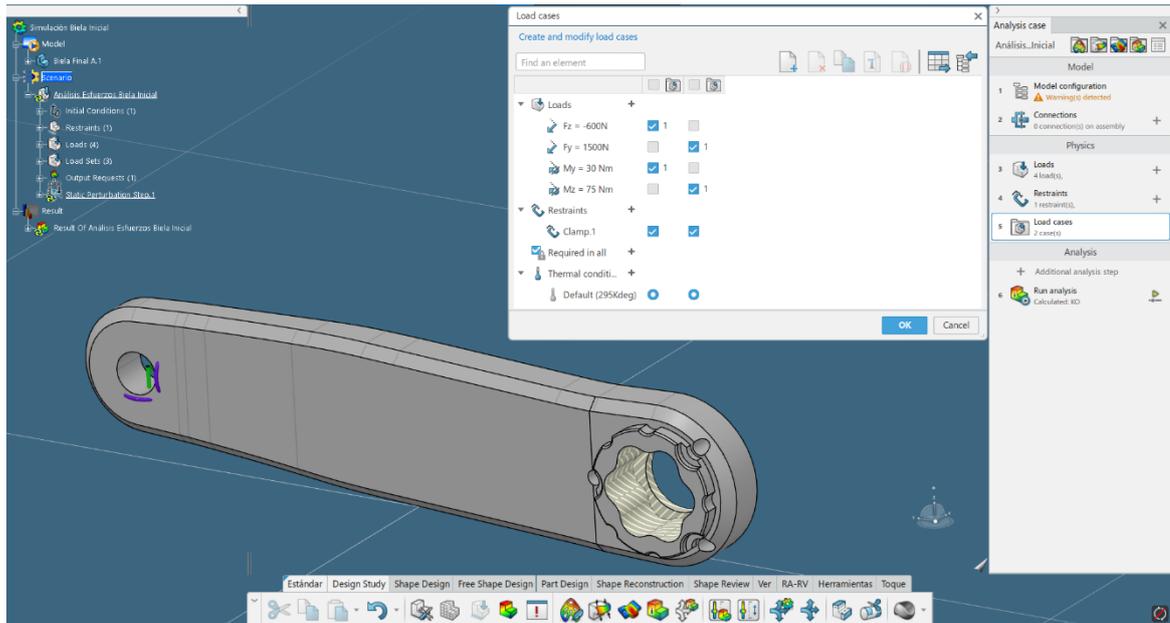


Ilustración 46. Structural Generative Design: Restricciones.

En este paso, se están estableciendo dos configuraciones de cargas diferentes, ya que para el estudio se van a comprobar dos casos diferentes. La primera configuración representa un sprint con la máxima potencia registrada por un ciclista profesional actualmente, mientras que la segunda configuración representa la situación de subirse a la bicicleta apoyando todo el peso de una persona sobre uno de los pedales. De esta manera se podrá comprobar, en la misma simulación, dos situaciones diferentes.

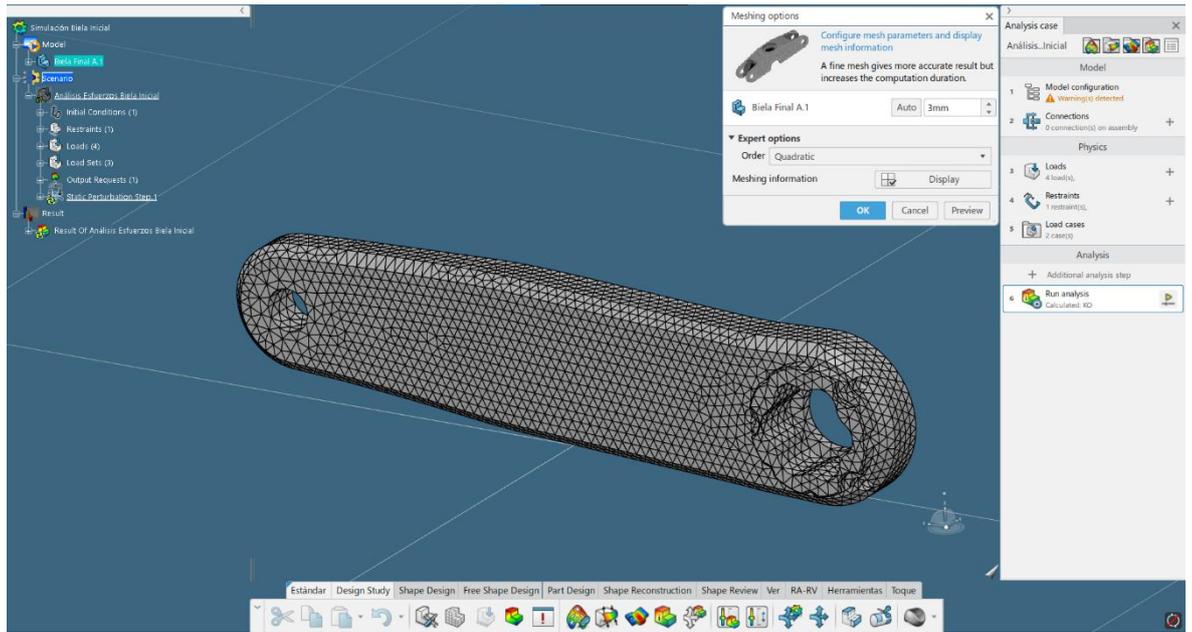


Ilustración 47. Structural Generative Design: Configuración de malla.

Finalmente, se inicia la computación y se obtienen los resultados para los dos caso de cargas planteados:

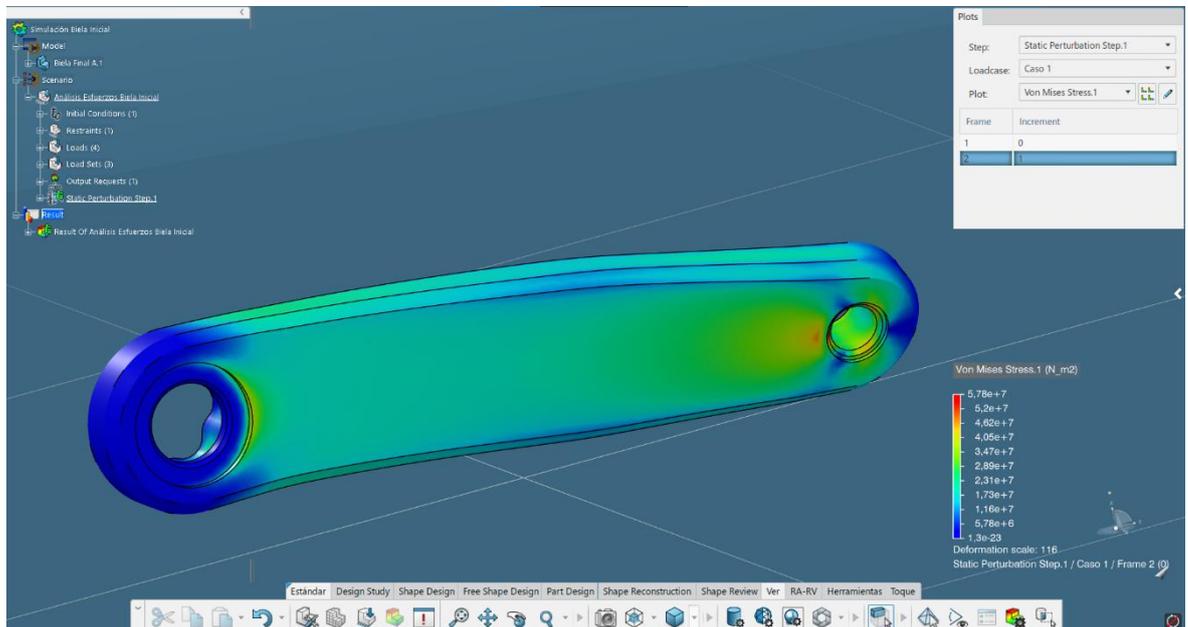


Ilustración 48. Structural Generative Design: resultados análisis de cargas (Caso 1).

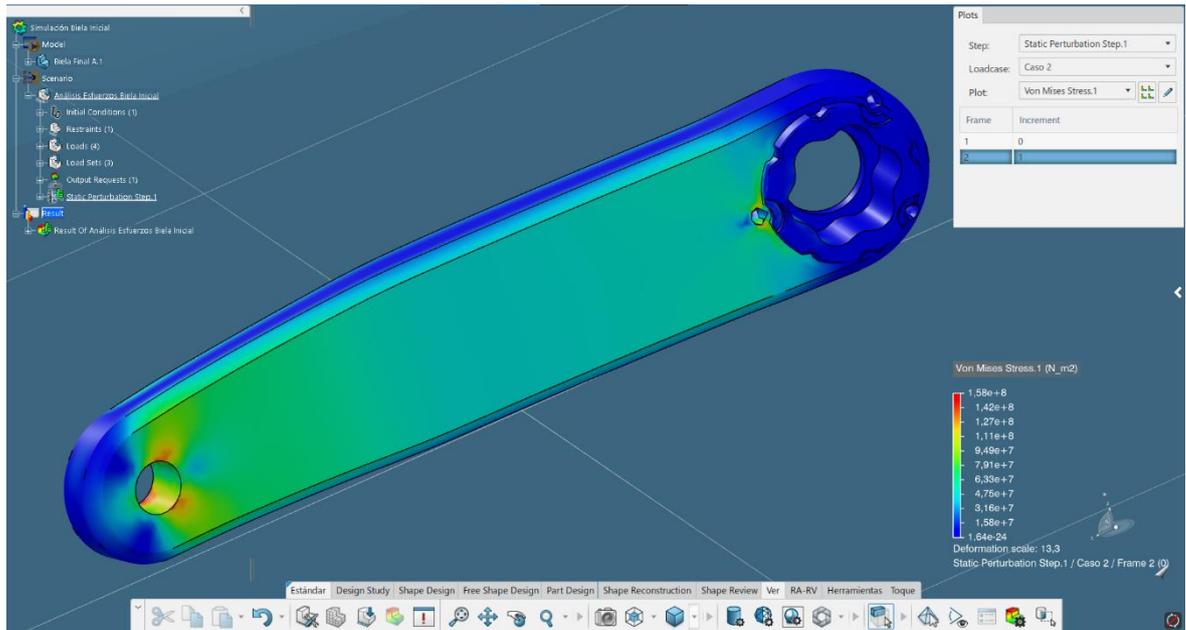


Ilustración 49. Structural Generative Design: resultados análisis de cargas (Caso 2).

La interfaz que se muestra en las dos ilustraciones anteriores permite visualizar para cada caso de cargas, diferentes parámetros que permiten verificar la validez del diseño (Tensiones de Von Mises, deformaciones, reacciones, factor de seguridad, etc.).

Para finalizar el análisis, se estudiarán los resultados obtenidos para cada uno de los casos:

- **Caso 1:**

El caso 1 representa un sprint de un ciclista a máxima potencia, que pedaleando, es el momento de máximas tensiones sobre la biela. La biela estaría a 90° y sometida a una fuerza vertical de 600 N aplicados sobre el centro del pedal.

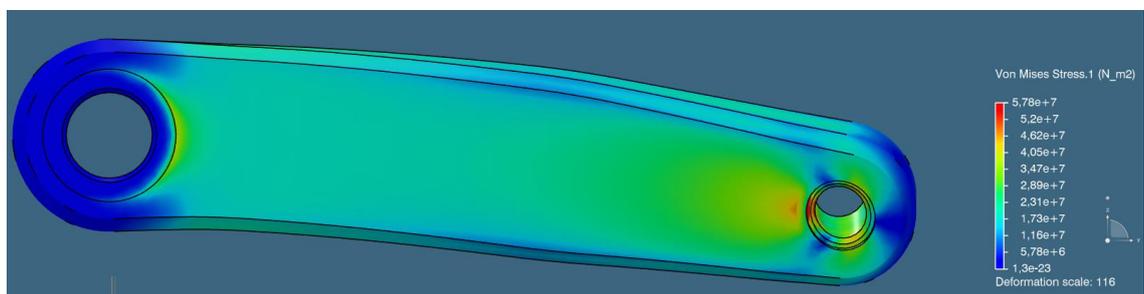


Ilustración 50. Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 1).

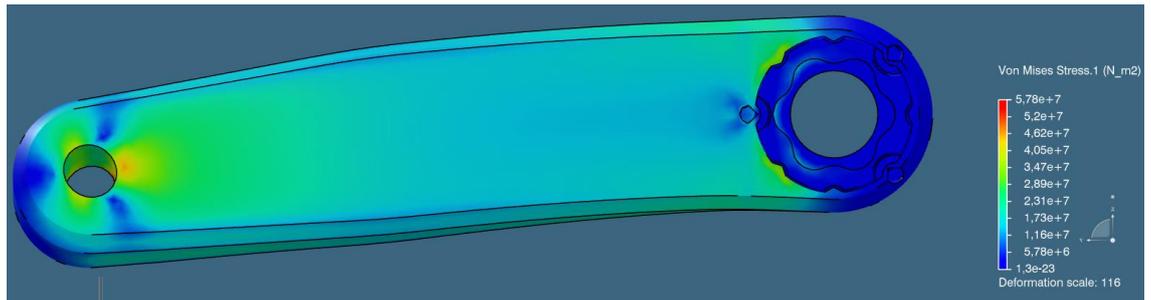


Ilustración 51. Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 1)

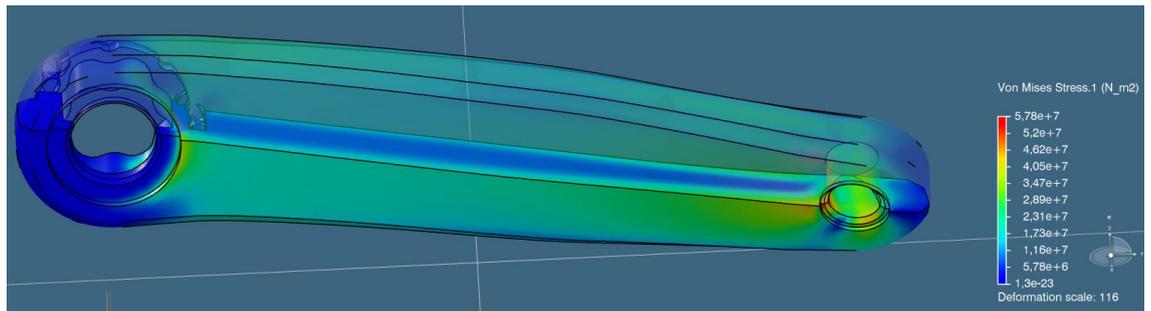


Ilustración 52. Tensiones de Von Mises, Vista 3 (Caso 1)

Se comienza analizando las tensiones de Von Mises, ya que es el parámetro que representa las tensiones sobre la biela. Como se puede observar (Ilustración 50, ilustración 51 e ilustración 52), las tensiones máximas se localizan en las conexiones de los ejes ya que los agujeros son concentradores de tensiones. Aun así, son muy inferiores al límite elástico del material seleccionado. Por otro lado, si se observa la *Ilustración 52* podemos comprobar que las tensiones se distribuyen por las caras exteriores de la biela, estando el volumen interior muy poco cargado.

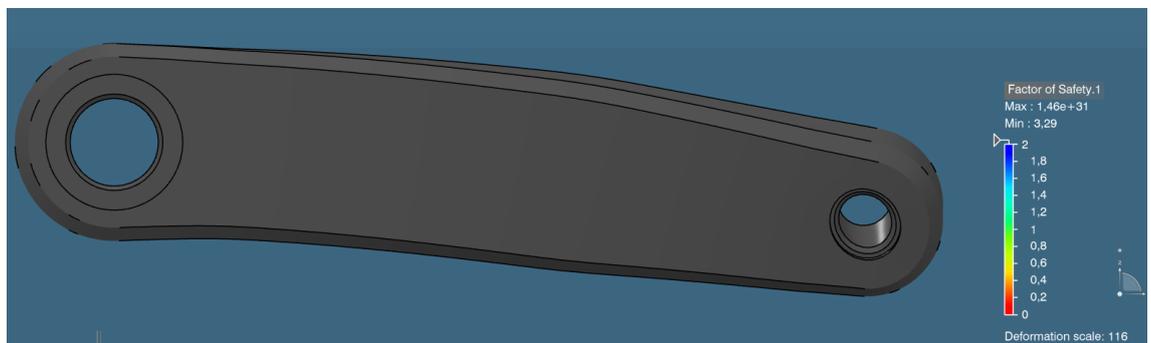


Ilustración 53. Factor de seguridad (Caso 1).

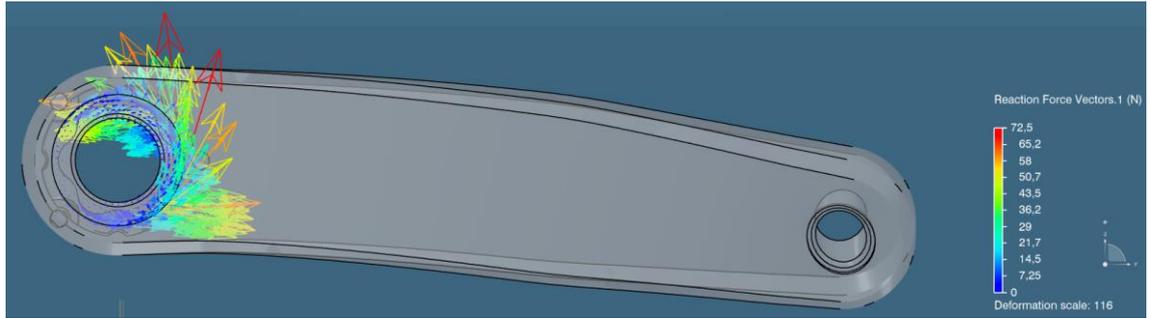


Ilustración 54. Reacciones (Caso 1).

En la *Ilustración 53* podemos observar como el factor de seguridad mínimo que se puede localizar en la biela es de 3.29, lo cual es un punto a favor para el diseño a la hora de la comprobación de la resistencia de la biela para el estado de carga.

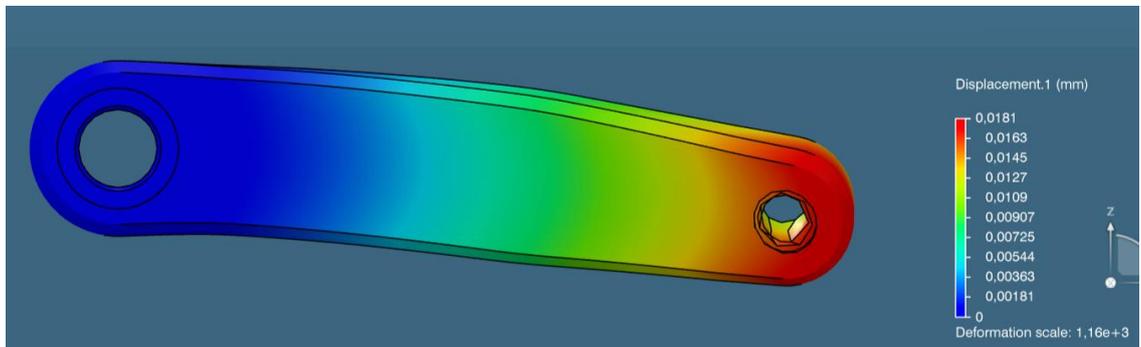


Ilustración 55. Deformaciones (Caso 1).

En cuanto a la rigidez de la biela, podemos observar en la *Ilustración 55* como el máximo desplazamiento que se produce es de 0.0181 mm. Teniendo en cuenta los esfuerzos a los que está sometido y el tipo de pieza que es, se considera un valor aceptable.

- **Caso 2:**

El caso dos representa la situación en la que un ciclista se sube a la bicicleta, apoyando todo su peso sobre uno de los pedales. La biela está colocada a 180° y está sometida a una fuerza vertical de 1500N sobre el centro del pedal.

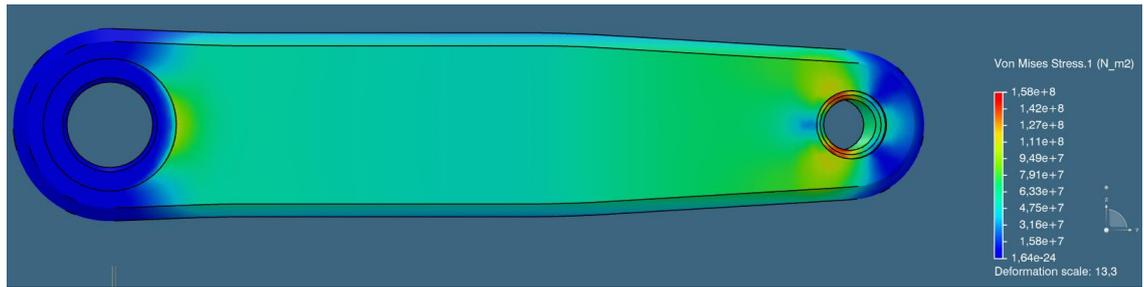


Ilustración 56. Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 2).

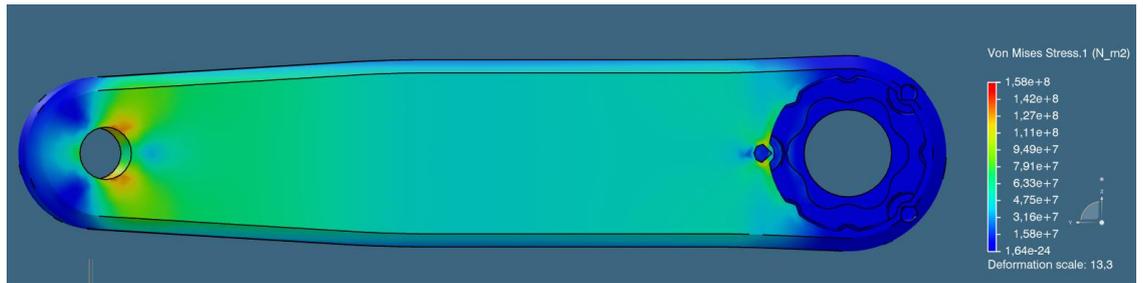


Ilustración 57. Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 2).

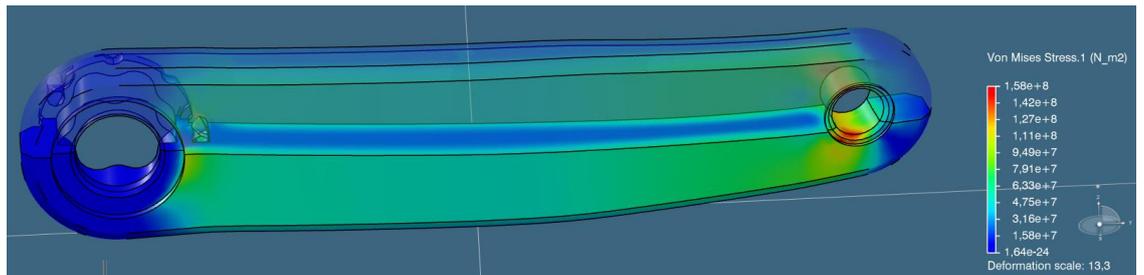


Ilustración 58. Tensiones de Von Mises, Vista 3 (Caso 2).

Se puede comprobar, que para el segundo estado de cargas, el valor de la tensión máxima alcanzada es mayor que en el primer caso. Aun así, la distribución de tensiones a lo largo del cuerpo de la biela es similar entre ambos casos, siendo el punto de máximas tensiones los agujeros donde se alojan los ejes.

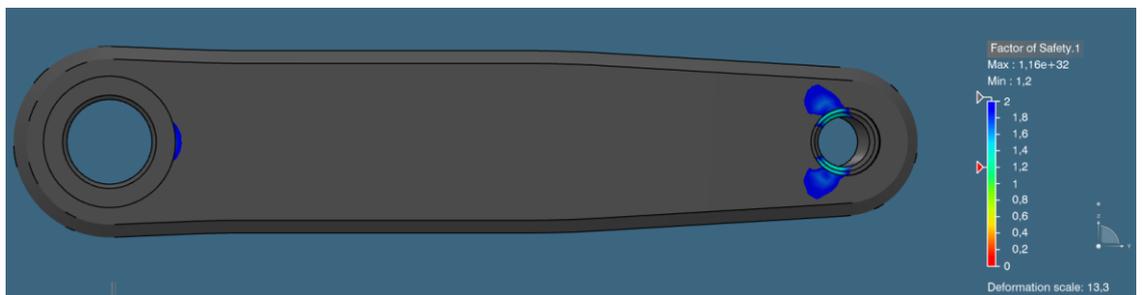


Ilustración 59. Factor de seguridad (Caso 2).

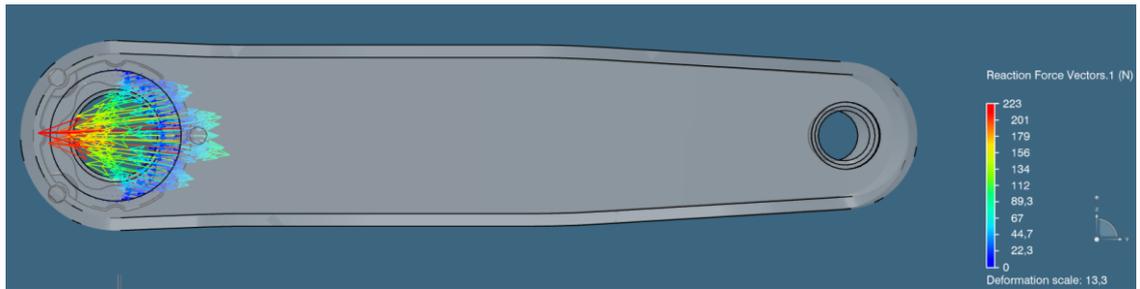


Ilustración 60. Reacciones (Caso 2).

En este caso, el factor de seguridad mínimo es de 1.2, lo cual significa que para llegar al límite de elasticidad de la biela harían falta 1700 N.

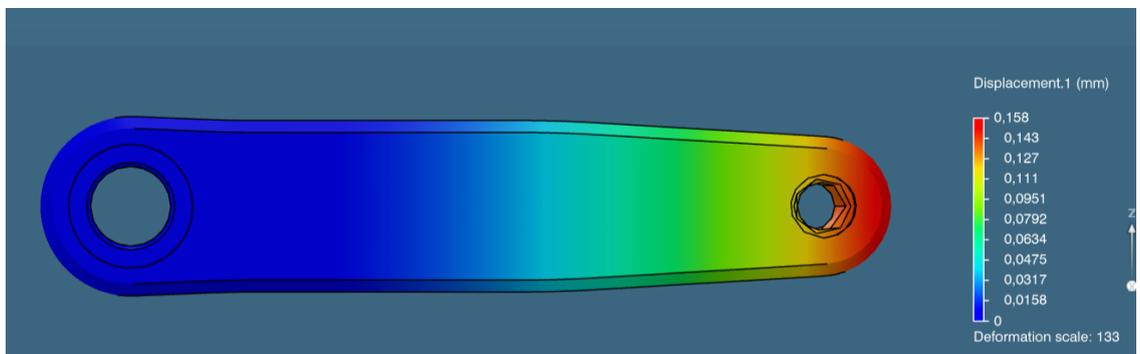


Ilustración 61. Deformaciones (Caso 2).

Respecto a las deformaciones, es apreciable el incremento comparado al primer caso estudiado, ya que las cargas a las que está sometida la biela son mucho mayores. El valor máximo de deformación es de 0,158 mm.

Las conclusiones que se pueden obtener del análisis son que para ambos casos la biela está dentro del límite elástico, por lo que resistirá adecuadamente los esfuerzos máximos a los que va a estar sometida. Por otra parte, el caso más desfavorable en cuanto a máxima tensión soportada es el segundo, teniendo un factor de seguridad justo pero aceptable. Por lo tanto, el diseño inicial de la biela es válido.

4.2. Biela optimizada

Para realizar la optimización topológica de la biela se empleará la aplicación *Structural Topological Design*. Esta herramienta permitirá desarrollar el ciclo de optimización topológica explicado en el apartado 1.4 del estudio.

Se establecerá un tamaño de malla determinado, un sistema de cargas y se buscará maximizar la rigidez de la biela sin sobrepasar el límite elástico del material. Para lograr este objetivo se utilizará como variable la masa de la biela.

4.2.1. Proceso de optimización:

Se han seguido los siguientes pasos para optimizar la biela inicial:

1. Simplificar la geometría de la biela para facilitar el proceso de computación. La simplificación consiste en eliminar el patrón del agujero donde se ensambla el eje del pedalier, además de los cajeados usados de asientos para el tapón del pedalier y para el apoyo del eje del pedal sobre la biela.

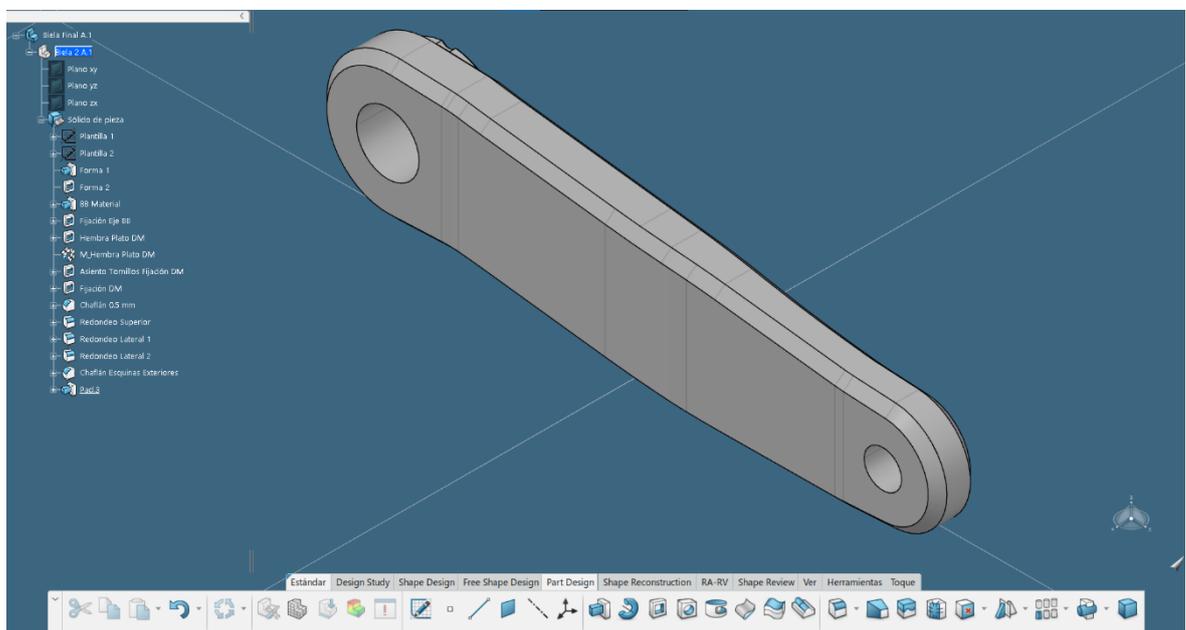


Ilustración 62. Optimización topológica: Simplificación CAD.

2. Realizar particiones del sólido para poder generar las zonas congeladas de la optimización posteriormente. Estas particiones consistirán en aislar las zonas de anclaje que no deben perder masa a su alrededor y se realizará empleando la herramienta *Partition Design Space*:

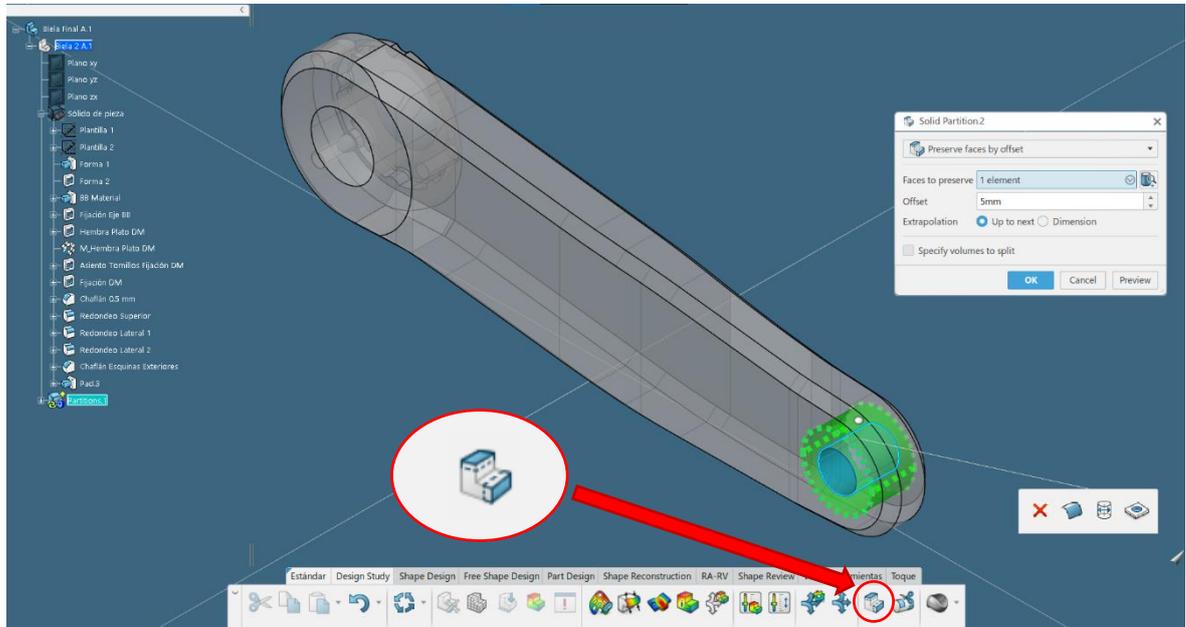


Ilustración 63. Optimización topológica: Particiones.

3. Generar un entorno de optimización topológica a través de la herramienta *Topology Optimization*:

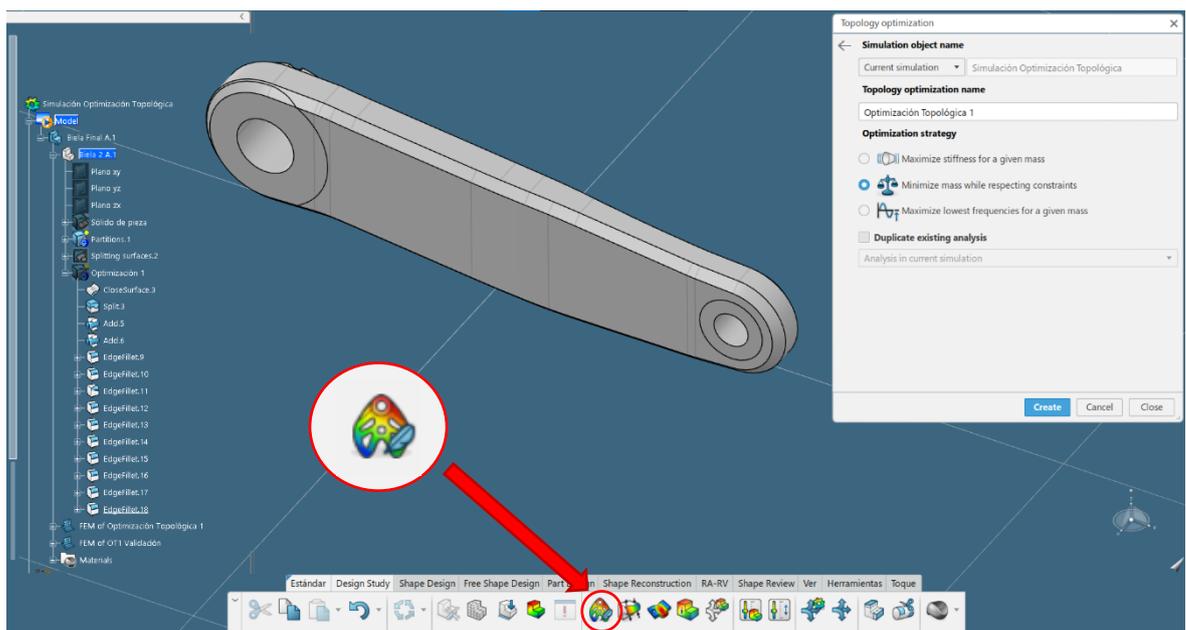


Ilustración 64. Optimización topológica: Generación de OT.

- Definir las regiones del sólido que se van a utilizar para la optimización. En este apartado se debe seleccionar las particiones realizadas en el segundo paso explicado del proceso:

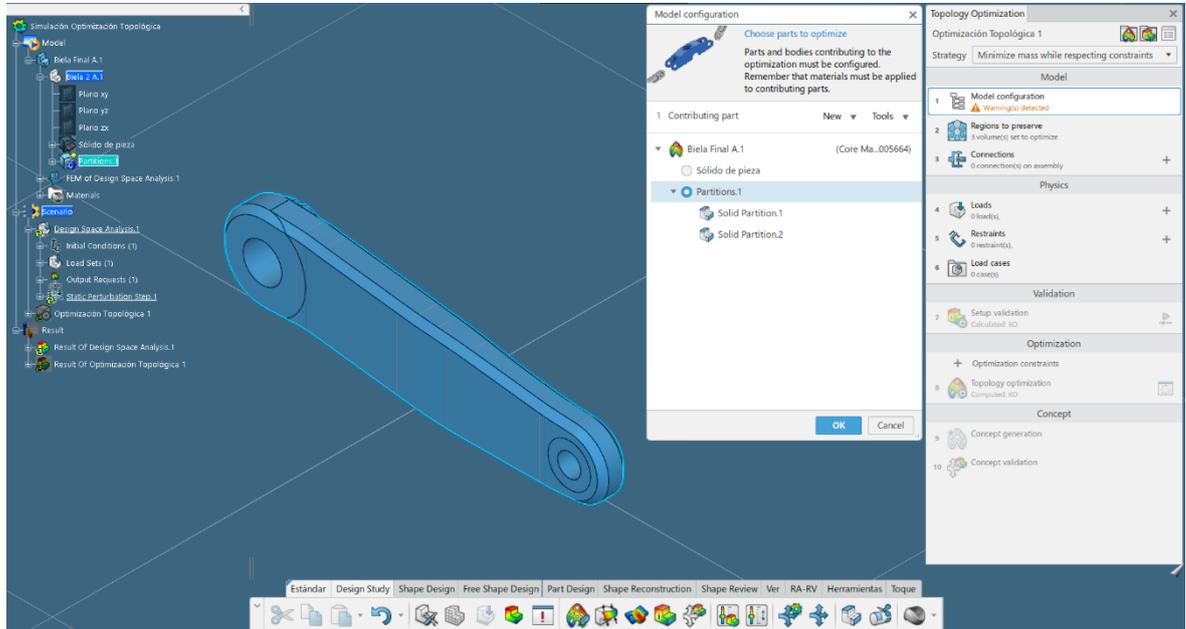


Ilustración 65. Optimización topológica: Configuración del modelo.

- Definir las regiones del sólido que se van a preservar durante la optimización, y cuáles van a ser optimizadas:

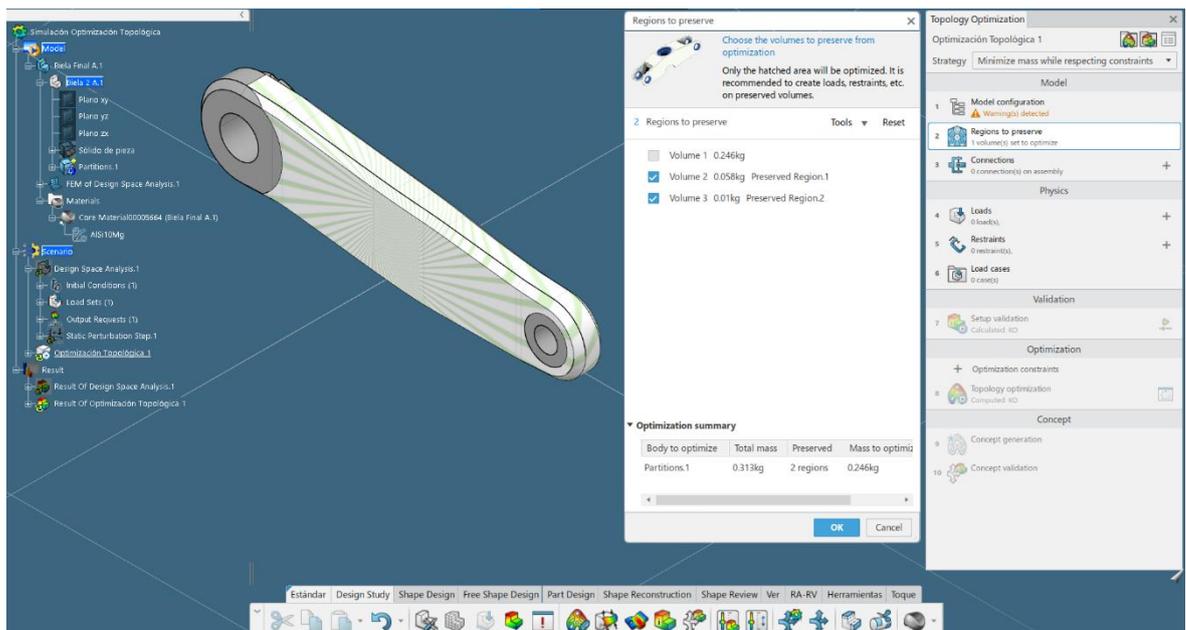


Ilustración 66. Optimización topológica: Regiones a preservar.

6. Definición de las cargas para el estudio. Las cargas empleadas son las mismas que se han empleado durante el análisis de esfuerzos de la biela inicial, las cuales están definidas y justificadas en el Anexo:

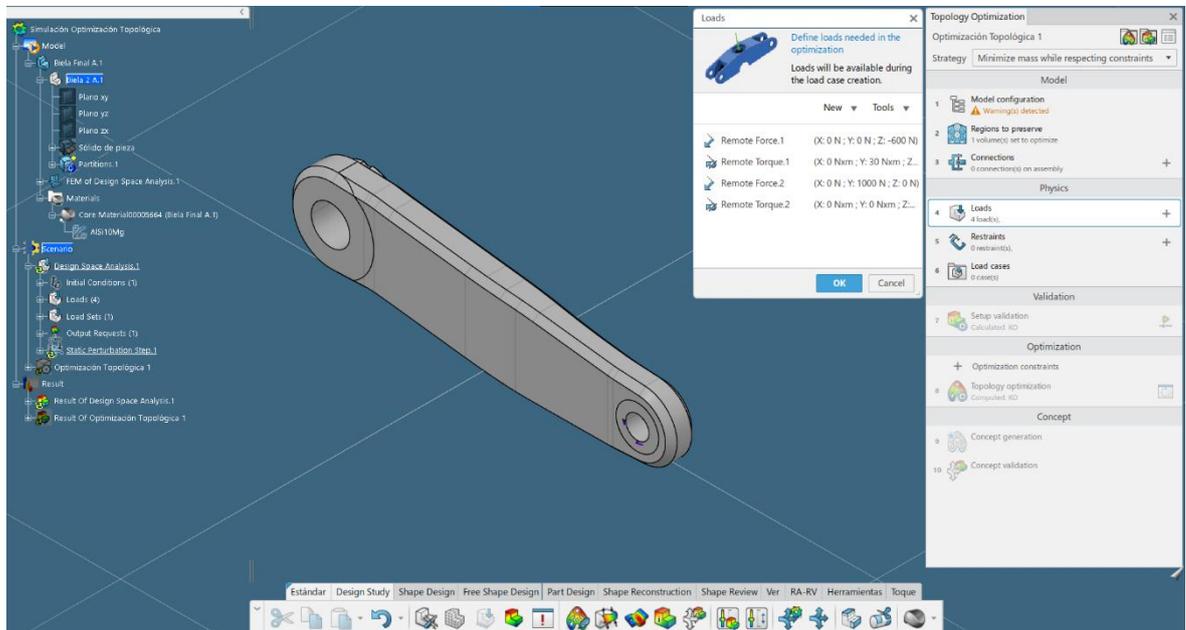


Ilustración 67. Optimización topológica: Cargas.

7. Establecer las restricciones o anclajes de la biela:

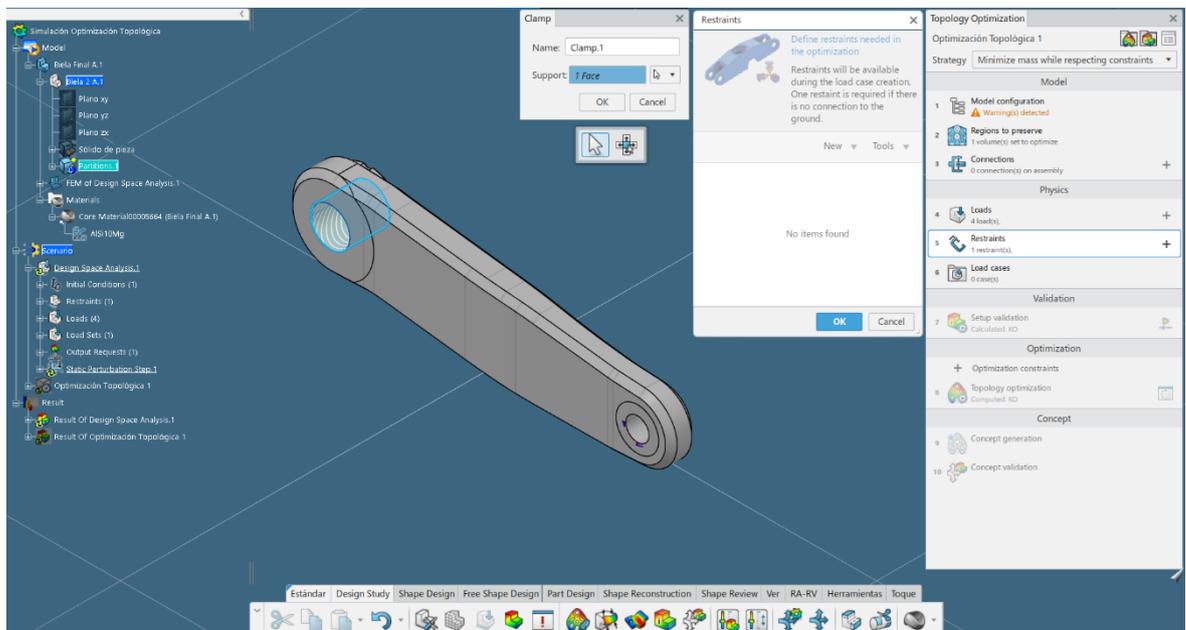


Ilustración 68. Optimización topológica: Restricciones.

8. Generar los casos de esfuerzos a los que está sometida la biela. De esta forma, posteriormente, se podrá comparar los resultados para los dos estados de cargas definidos, por separado:

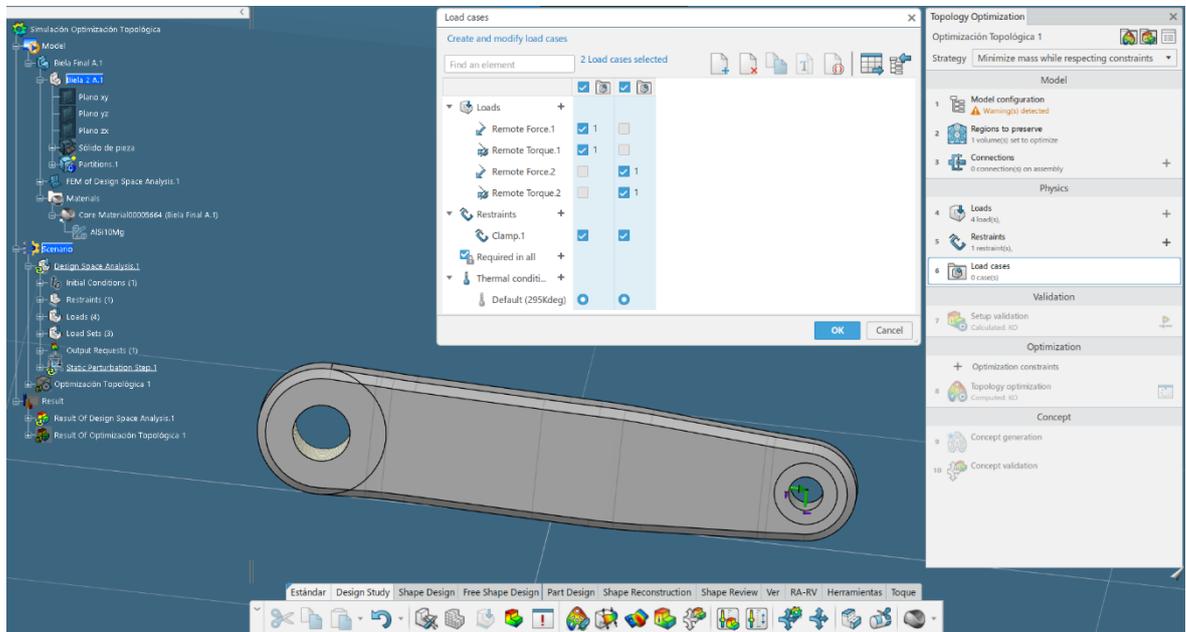


Ilustración 69. Optimización topológica: Casos de cargas.

9. Definición de malla:

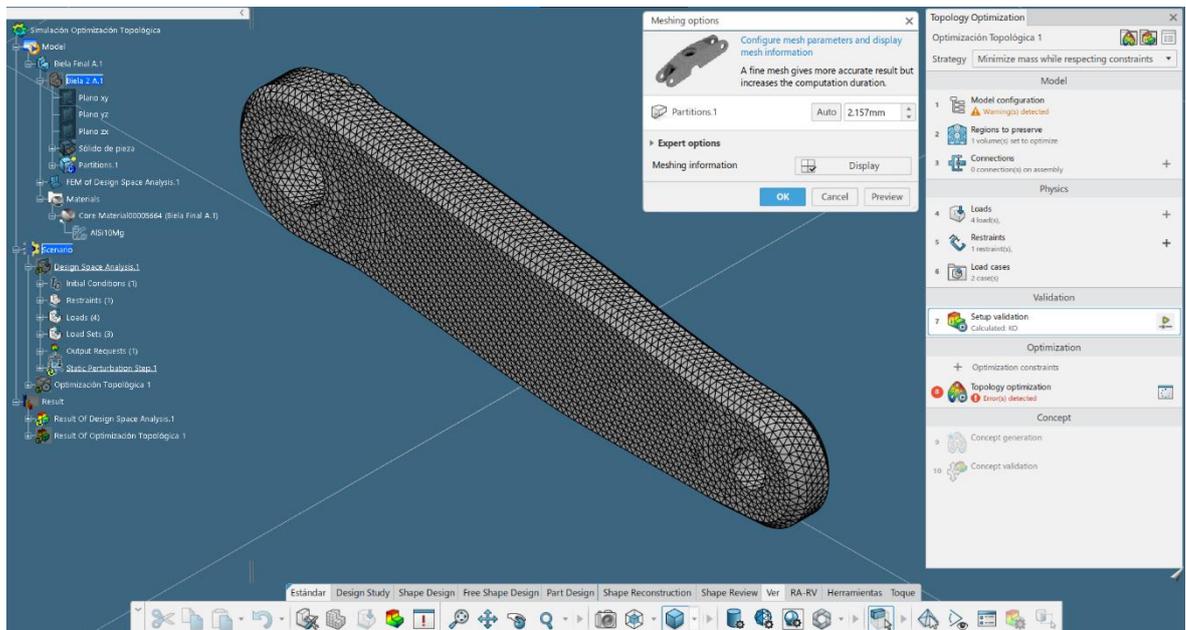


Ilustración 70. Optimización topológica: Mallado.

10. Para realizar una optimización en la que se minimice la masa respetando el límite elástico, se debe añadir dicha restricción:

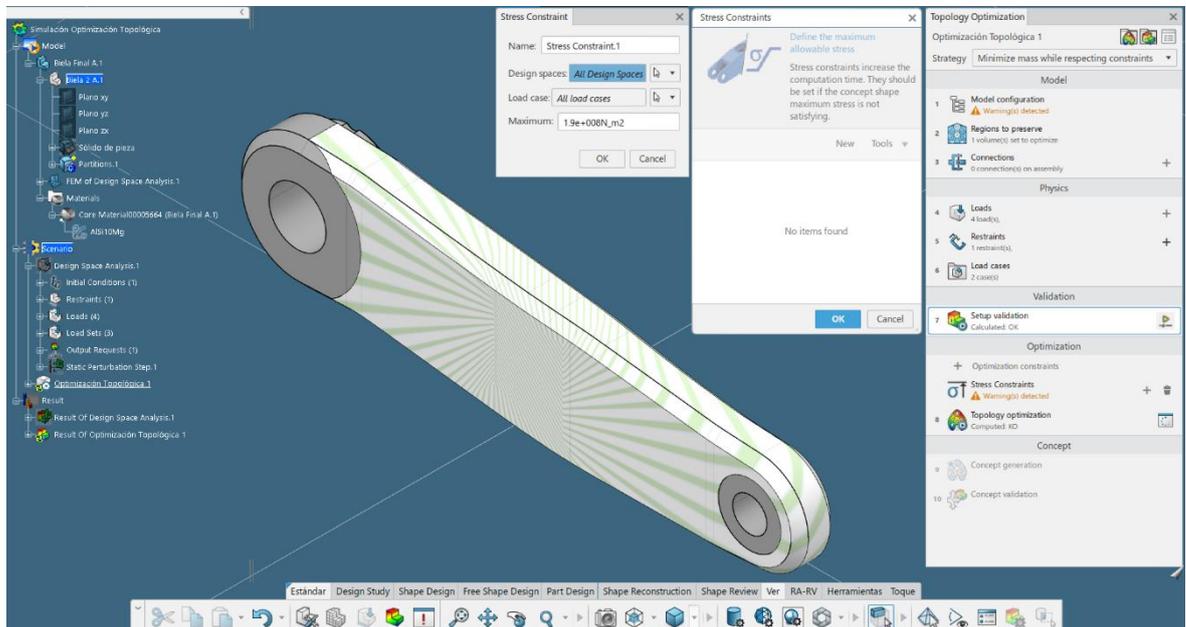


Ilustración 71. Optimización topológica: Restricción de límite elástico.

11. Realizar la computación de la optimización topológica, de la que obtiene la siguiente información:

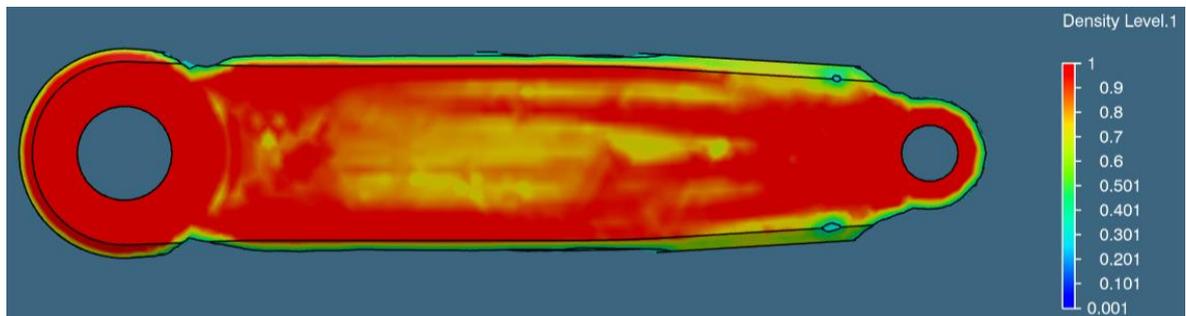


Ilustración 72. Optimización topológica: OTO (Vista Frontal).

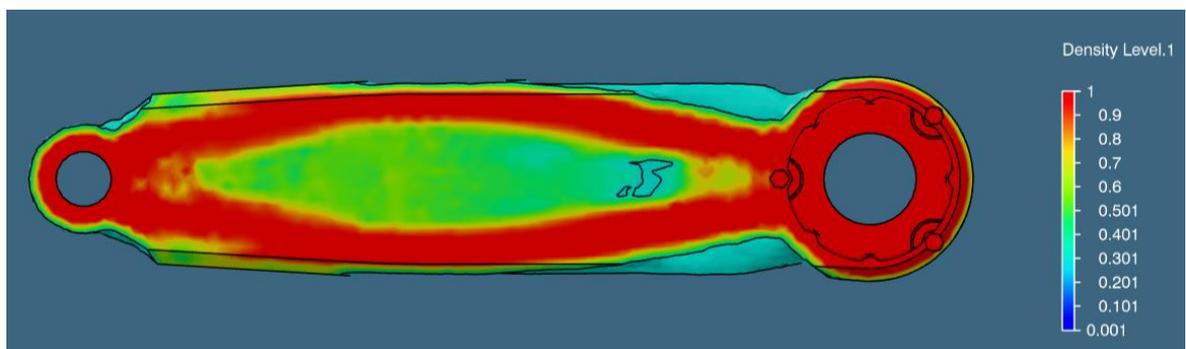


Ilustración 73. Optimización topológica: OTO (Vista Trasera)

12. Generación del modelo optimizado. En esta pestaña se podrá modificar la cantidad de material que se le quiere eliminar al material, pero por defecto el programa muestra la cantidad óptima para mantenerse dentro de las restricciones establecidas previamente. También se muestra una huella de la densidad que es necesaria sobre el volumen del sólido para cumplir con los objetivos de optimización:

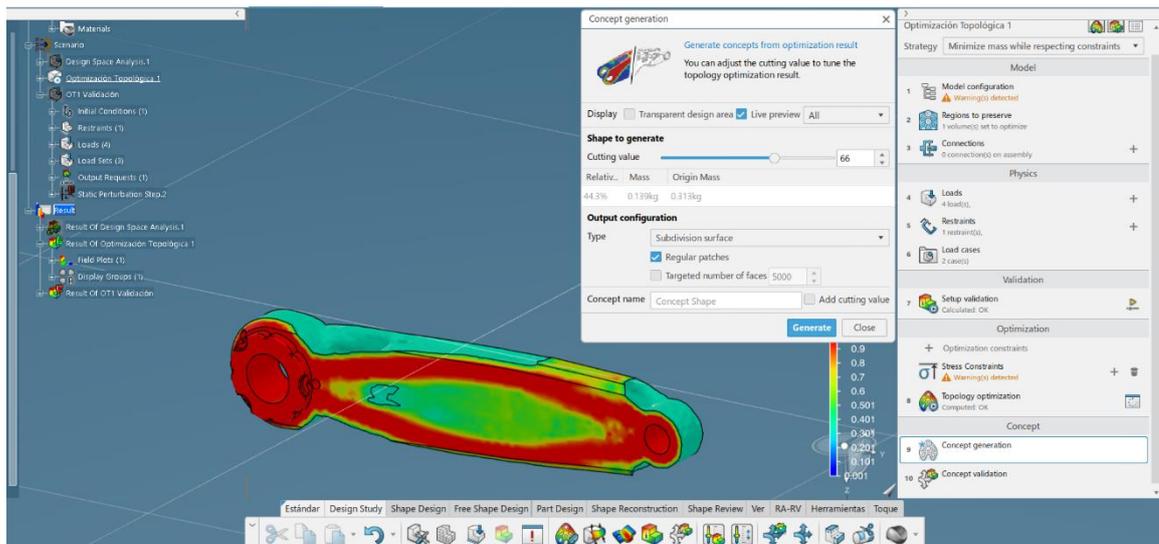
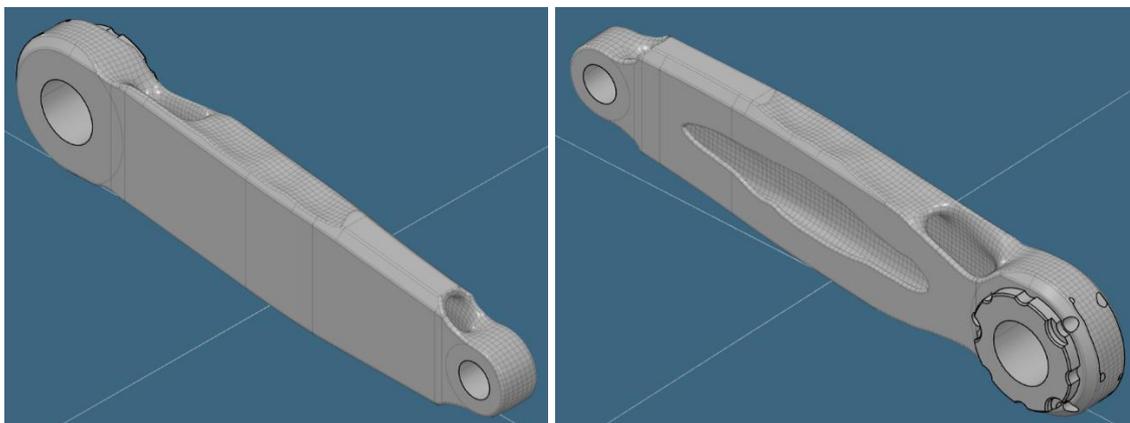


Ilustración 74. Optimización topológica: Generación de modelo optimizado.

13. Refinamiento del resultado obtenido, ya que el modelo que se genera presenta esquinas agudas y regiones de difícil materialización, por lo que se solucionan estos defectos a través de las herramientas del *Part Design*:



14. Finalmente, se debe validar el modelo. Para esto, se realizar un estudio de tensiones y deformaciones, de tal manera que cumpla con los requisitos buscados durante el diseño de la biela. Se analizarán los dos casos establecidos durante el estudio.

- **Caso 1:**

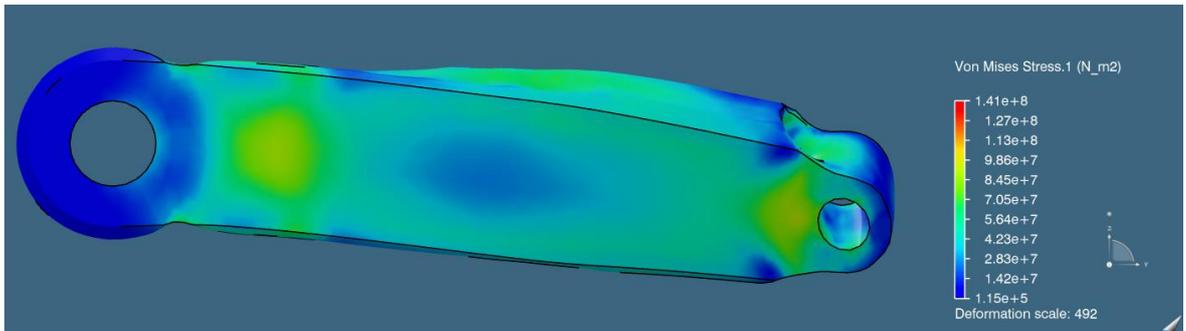


Ilustración 75. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 1).

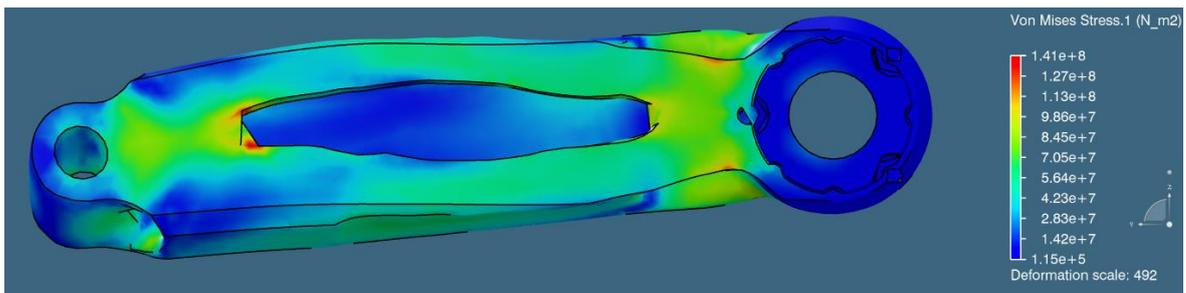


Ilustración 76. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 1).

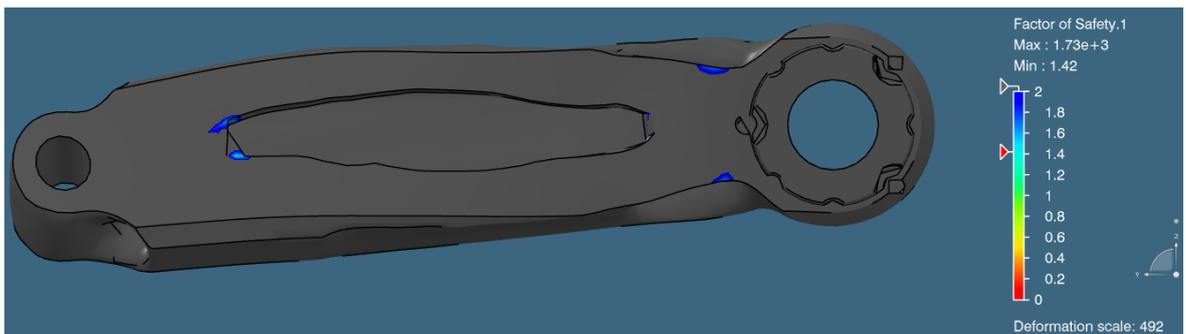


Ilustración 77. OT0: Factor de seguridad (Caso 1).

En *Ilustración 75* se puede apreciar como las tensiones tienen una distribución diferente al análisis de la biela de partida. Ahora los esfuerzos máximos no solo se localizan en los puntos de anclaje con el eje del pedal o el eje del pedalier, si no que aparecen sobre la superficie exterior de la biela donde la torsión es máxima.

Si se observa la *Ilustración 76*, se puede comprobar como en los cambios de sección transversal se están acumulando los valores máximos de tensión registrados, lo cual era de esperar ya que son zonas concentradoras de tensiones. Aun así, el valor más alto registrado es de 141 Mpa, que es inferior a los 190 MPa que tiene el AlSi10Mg como límite elástico.

Se observa también el factor de seguridad, sobre la *Figura 77*, donde se consigue un valor mínimo de 1.42, que es inferior al obtenido durante el análisis de la biela inicial. Sigue siendo un valor válido, dado que los esfuerzos utilizados para el análisis están sobredimensionados.

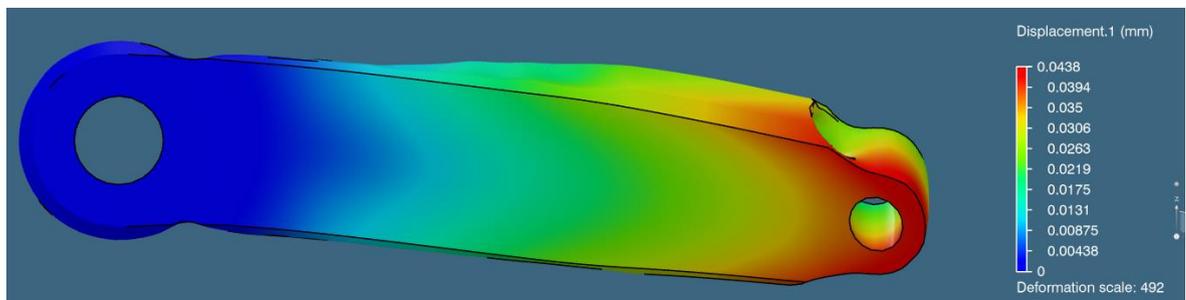


Ilustración 78. OT0: Deformaciones (Caso 1).

Finalmente se estudian las deformaciones. En la *Figura 78* se puede comprobar cómo se ha reducido el valor de deformación máxima respecto al análisis de deformaciones de la biela inicial. Esto se ha producido a cambio de aumentar las superficies de la biela que están sometidas a una deformación.

- **Caso 2:**

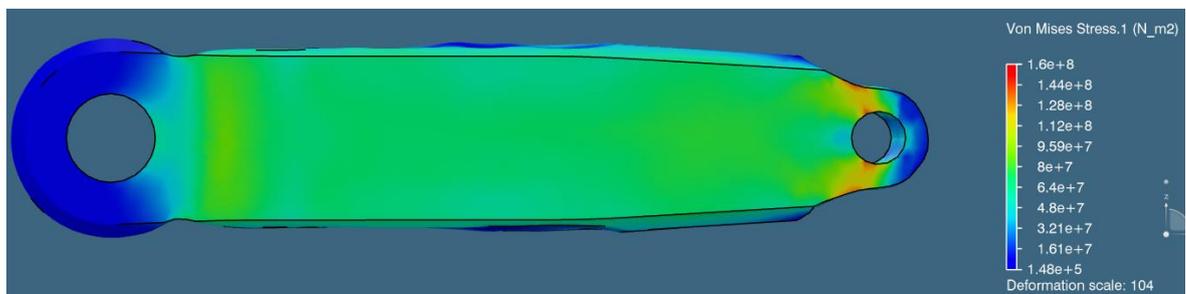


Ilustración 79. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 1 (Caso 2).

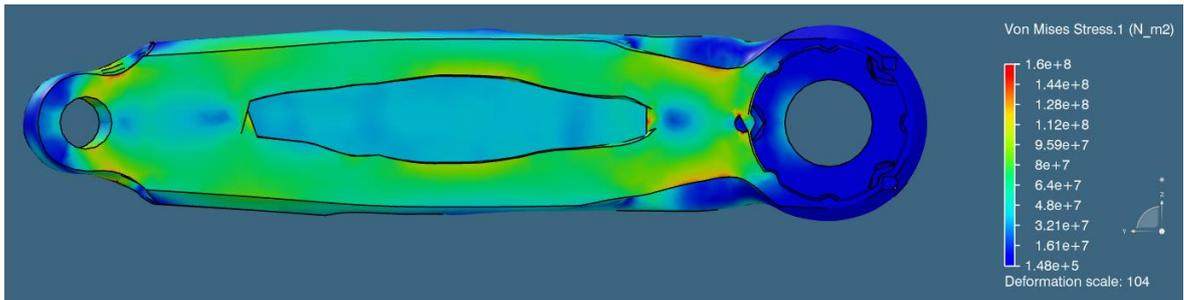


Ilustración 80. OT0: Tensiones de Von Mises, Vista 2 (Caso 2).

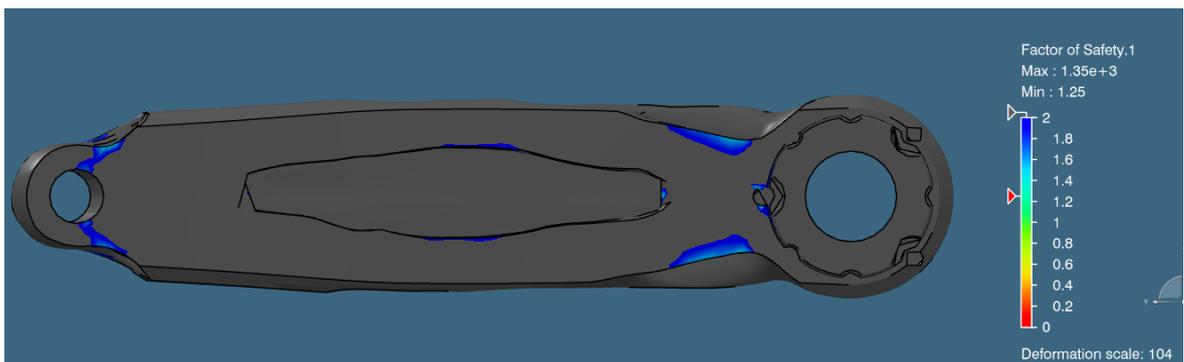


Ilustración 81. OT0: Factor de seguridad (Caso 2).

En el segundo caso, se observa en *Ilustración 79* como la huella de tensiones de Von Mises es diferente que en caso 1. Ahora las tensiones se distribuyen de forma casi uniforme sobre la superficie exterior de la biela, sin dejar regiones de menor tensión. También se observa como aparecen valores elevados en los alrededores del agujero para el eje del pedal.

Las tensiones máximas aparecen en los cambios de sección transversal, como se puede comprobar en la *Ilustración 80*. La tensión máxima registrada es de 160 MPa, valor que está dentro del límite elástico establecido por el material.

Como factor de seguridad mínimo, se ha obtenido un valor de 1.25. Teniendo en cuenta que todas las cargas aplicadas durante las simulaciones están sobredimensionadas, es un valor correcto. Esto significa que la carga máxima que puede soportar la biela es de 1700 N sobre el pedal.

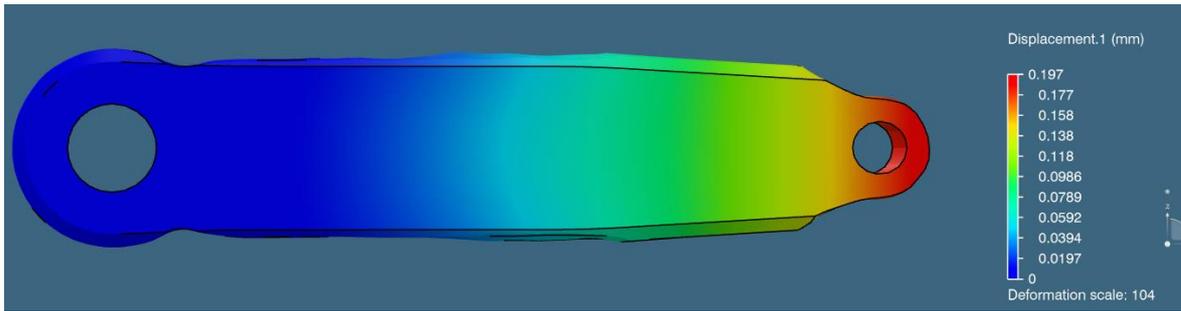


Ilustración 82. OT0: Deformaciones (Caso 2).

En cuanto a las deformaciones, el valor máximo obtenido es de 0,197 mm. La deformación máxima es reducida, por lo que la biela tiene suficiente rigidez.

Como conclusión del análisis, se puede asegurar que la biela cumple con los requisitos estipulados, por lo que es válida.

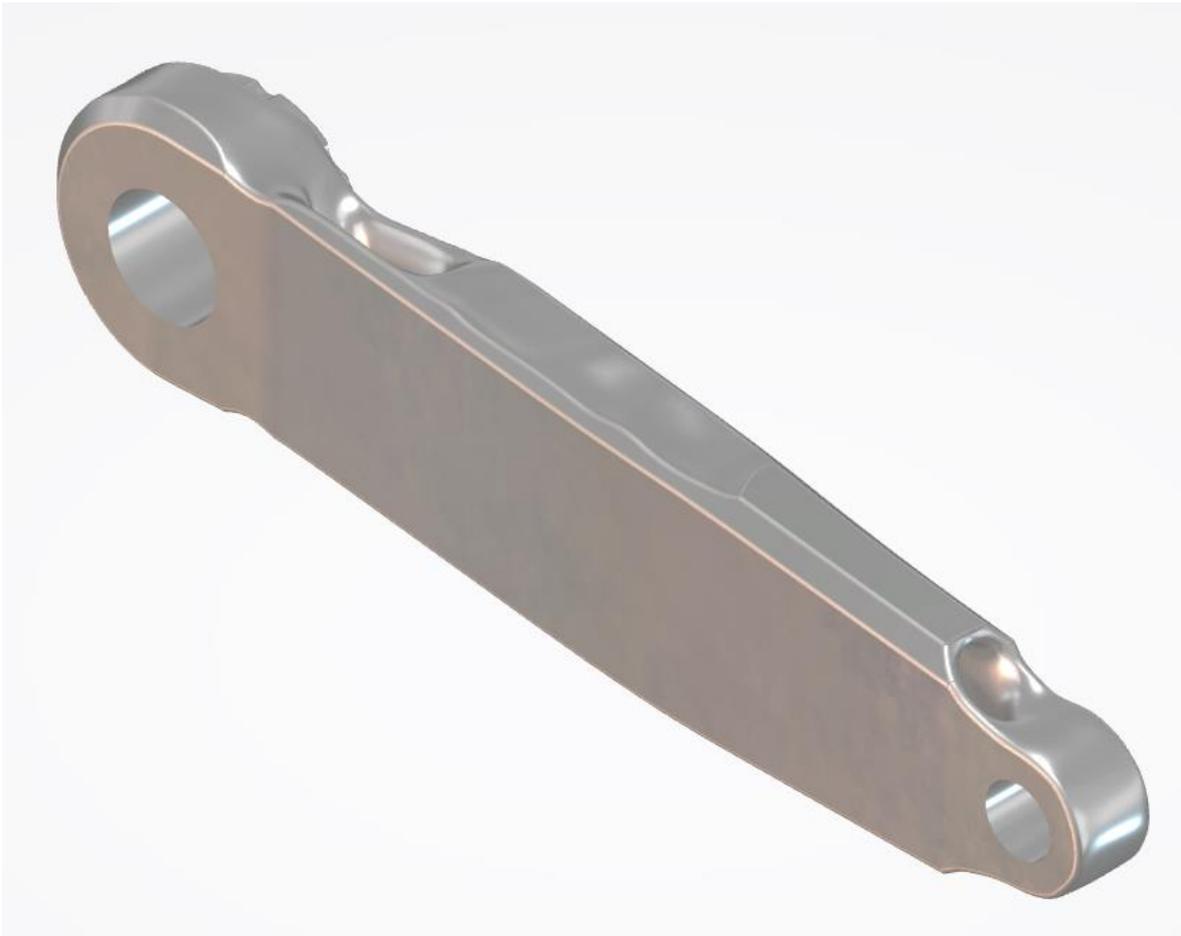


Ilustración 83. Biela Optimizada 1, vista 1.

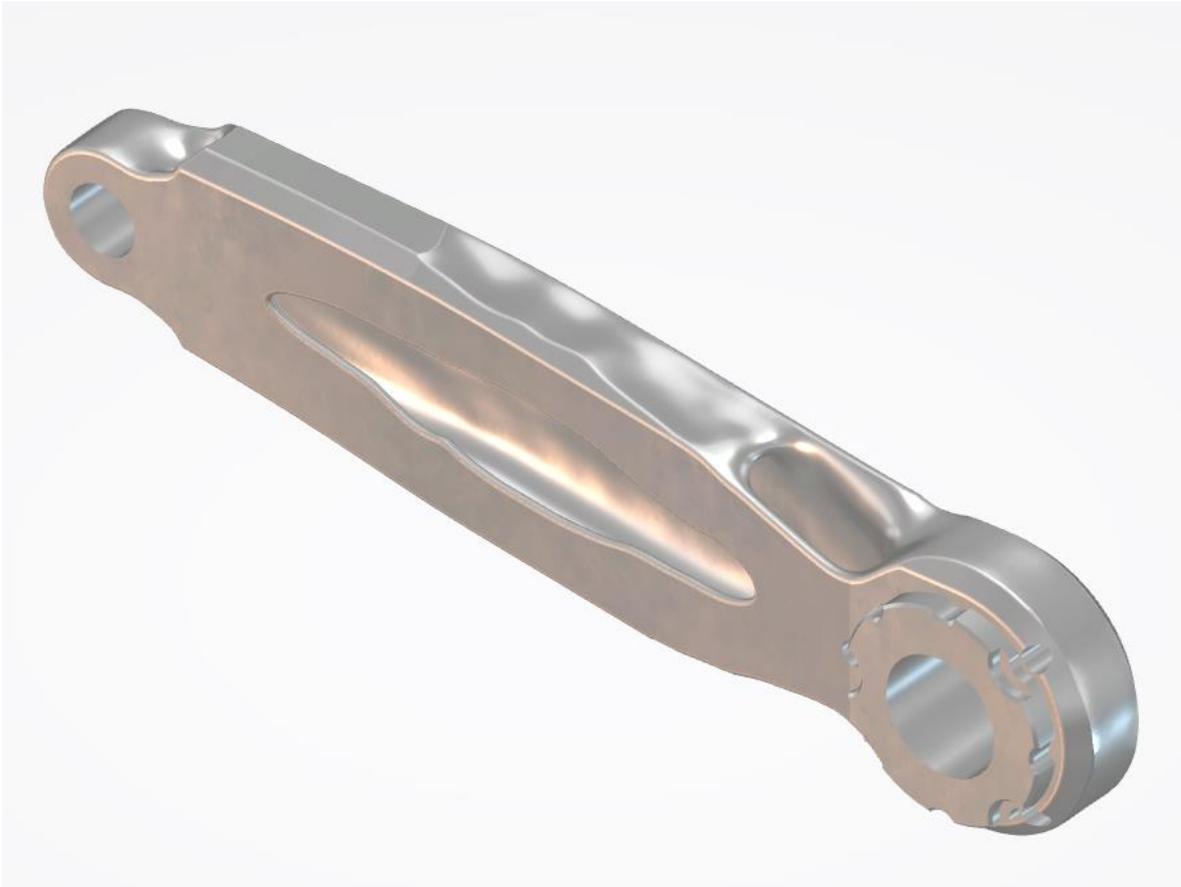


Ilustración 84. Optimización Topológica 1, vista 2.

Actualmente ya estaría disponible el modelo CAD de la biela optimizada, listo para introducirlo en un programa de preparación para la impresión en 3D. Posteriormente será necesario mecanizar la pieza, ya que las tolerancias que ofrece la máquina seleccionada para la fabricación no son suficientes. También se debe mecanizar el patrón hembra del eje del pedalier y las roscas donde se ancla el plato.

4.2.1. Optimización alternativa:

Observando los resultados obtenidos en la optimización, se ha desarrollado una alternativa, en la que se busca aprovechar de una forma más óptima las propiedades mecánicas del material.

Para mejorar la optimización obtenida del programa se observa la distribución de tensiones de los análisis de esfuerzos de la biela optimizada, para ambos casos de cargas. En la *Ilustración 75* se puede observar como en la parte central de la cara frontal, las tensiones son mucho menores que en el exterior, por lo que es interesante vaciar parte de esa cara. En este caso, como se quiere eliminar material pero mantener la rigidez lo máximo posible, se va a realizar un corte dejando la forma de una “cruz de San Andrés”.

Si se observa la *Ilustración 79*, se puede ver como para este caso, las tensiones de la cara frontal tienen un valor similar, por lo que se está utilizando prácticamente todo el material de la cara. Aun así, se puede afirmar que las tensiones más elevadas se sitúan en el centro de la cara, dejando unos valores inferiores para los extremos. Por lo tanto, si se realiza el vaciado propuesto previamente con forma de “cruz de San Andrés”, se puede lograr aprovechar el límite elástico del material de una forma más óptima.

Para obtener la optimización alternativa se ha realizado la siguiente operación sobre el modelo CAD de la biela inicial: A través del *Part Design* se ha realizado un *Pocket*.

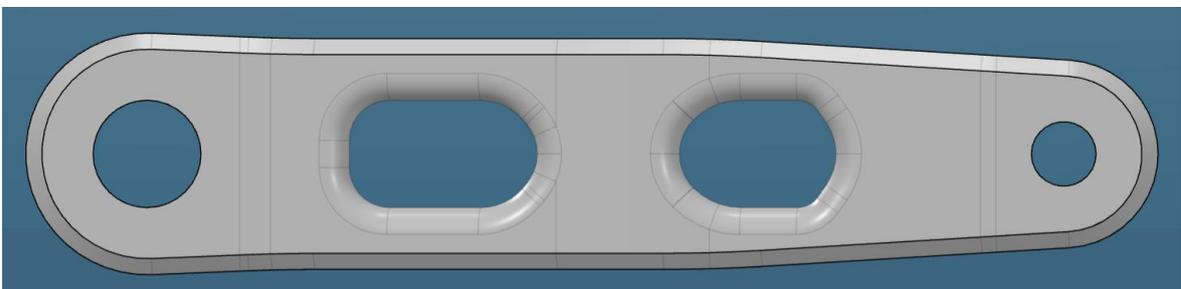


Ilustración 85. OT1: Cruz de San Andrés

Una vez realizado el vaciado, se realiza el proceso de optimización topológica previamente explicado, con las mismas particiones, cargas y restricciones. Los resultados obtenidos son los siguientes:

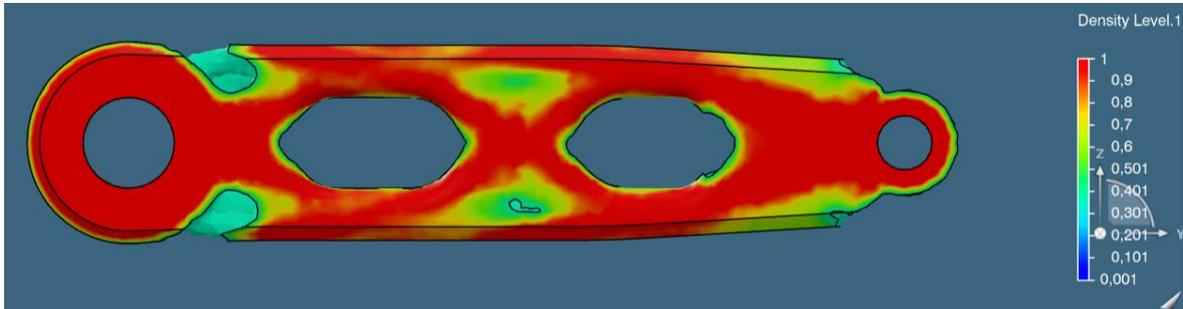


Ilustración 86. OP1: Resultado optimización, vista 1.

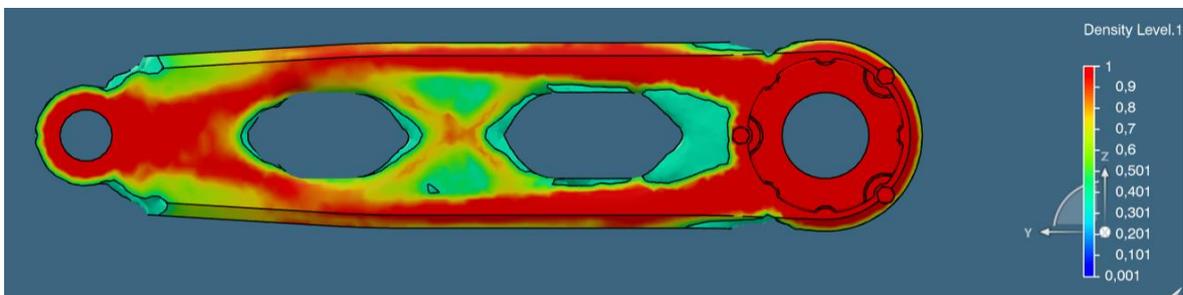


Ilustración 87. OT1: Resultado optimización, vista 2.

Y el sólido que genera el programa es el siguiente:

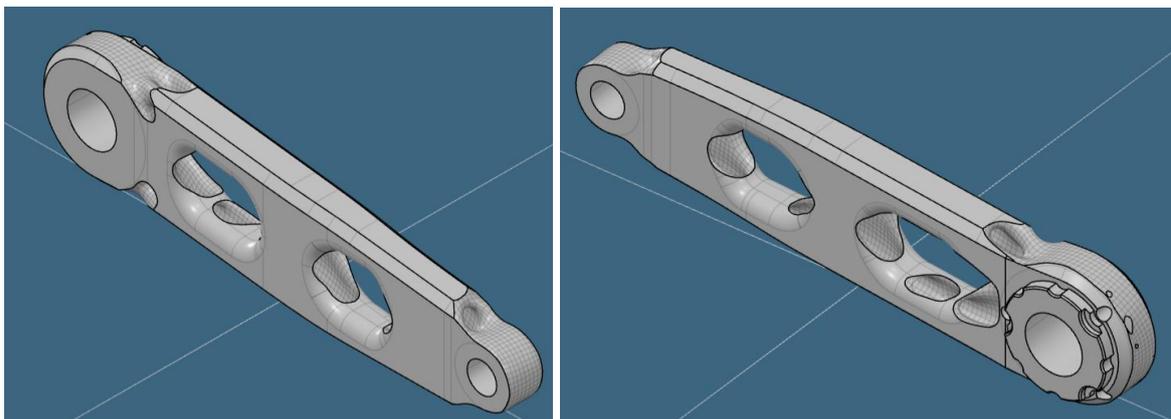


Ilustración 88. OT2: Sólido generado.

Analizando la huella de densidades de la *Ilustración 86* e *Ilustración 87* se puede comprobar cómo, entre los dos agujeros que se realizaron previamente, aparece una cruz. Con esta información se va a realizar un nuevo *Pocket* que siga dicha geometría, de tal forma que se

respetará las zonas con mayores densidades, pero se eliminará las de menor valor. El resultado de la operación es el siguiente:

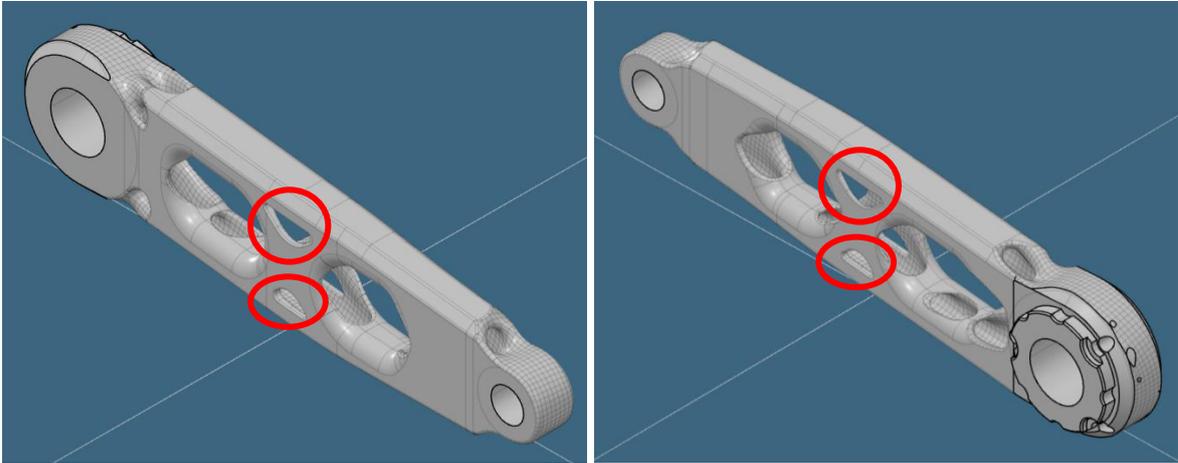


Ilustración 89. OT1: Optimización de sólido generado.

Por último, se verificará la geometría de la biela a través del análisis de tensiones y deformaciones para cada uno de los casos de cargas especificados durante el estudio. Los resultados de las verificaciones son los siguientes:

- **Caso 1:**

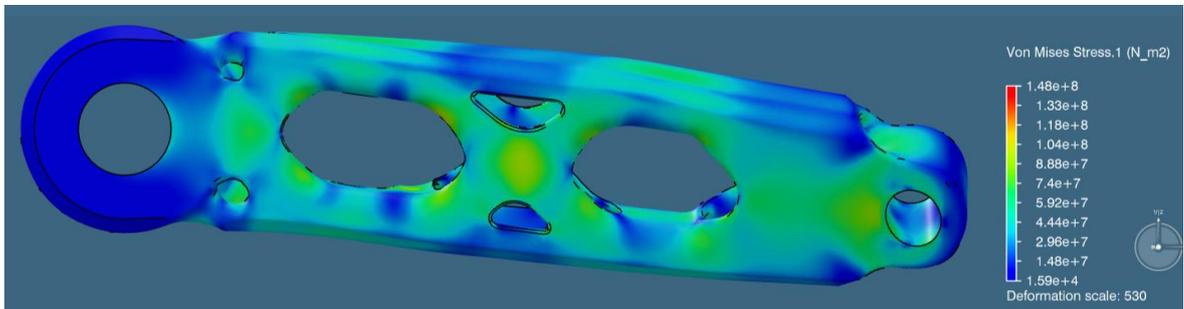


Ilustración 90. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 1 (Caso 1).

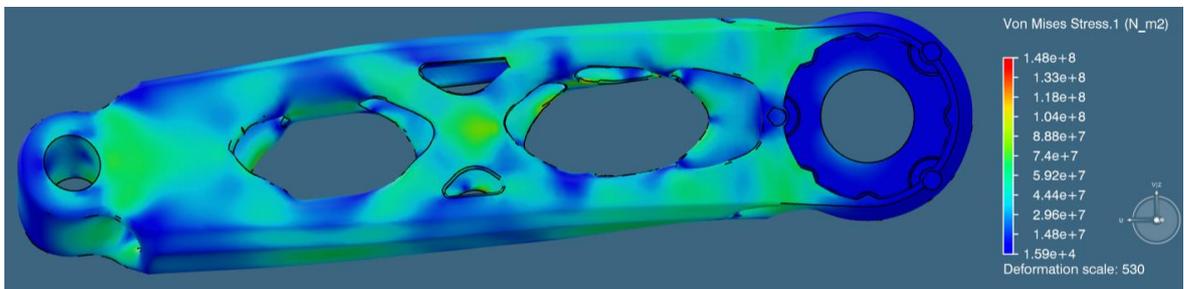


Ilustración 91. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 2 (Caso 1).

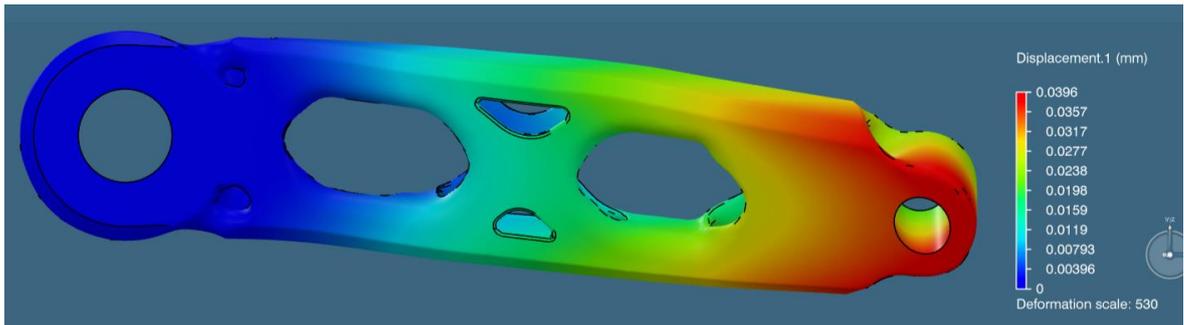


Ilustración 92. OT1: Deformaciones (Caso 1).

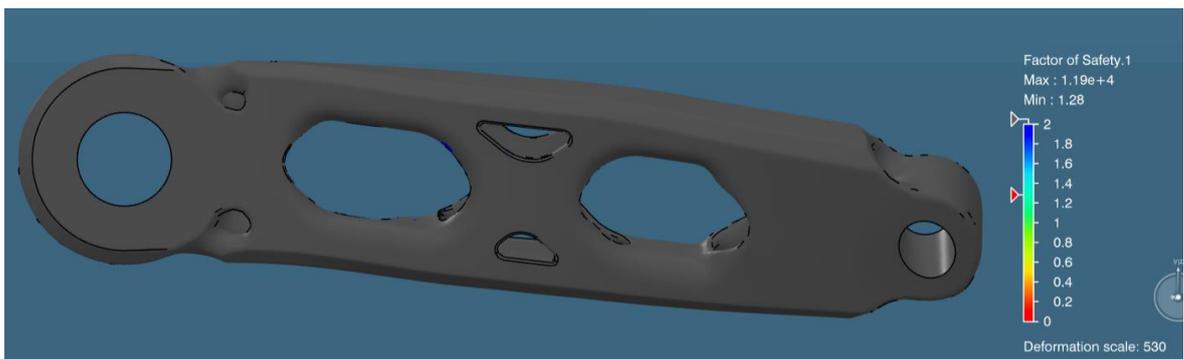


Ilustración 93. OT1: Factor de seguridad (Caso 1).

Para el primer caso, en comparación con la primera optimización realizada, se puede comprobar como las tensiones se distribuyen de una forma más uniforme por el material, aprovechándolo más. También es cierto que las tensiones máximas registradas son ligeramente superiores (150 MPa frente a 140 MPa), siendo un incremento poco significativo.

En cuanto a las deformaciones, para la nueva optimización se ha conseguido reducir ligeramente el valor máximo (0,0396 mm frente a 0,0438 mm), por lo que se ha aumentado la rigidez de la biela ligeramente.

Respecto al factor de seguridad, al haber aumentado el valor máximo de tensión soportada, este ha disminuido (1,28 frente a 1,42).

- **Caso 2:**

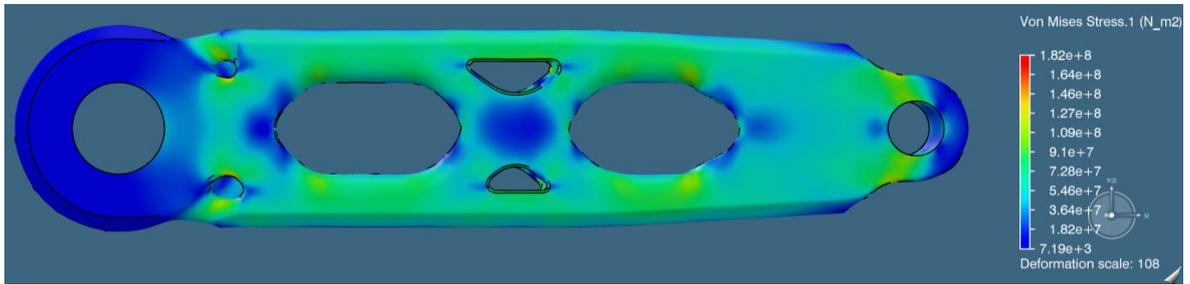


Ilustración 94. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 1 (Caso 2).

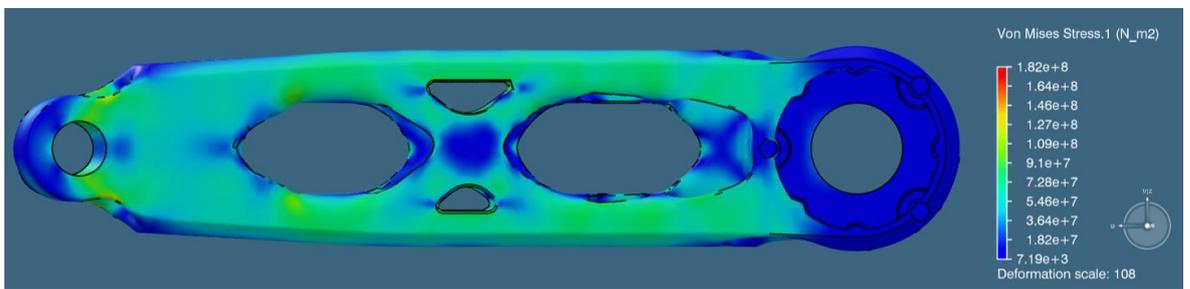


Ilustración 95. OT1: Tensiones de Von Mises, vista 2 (Caso 2).

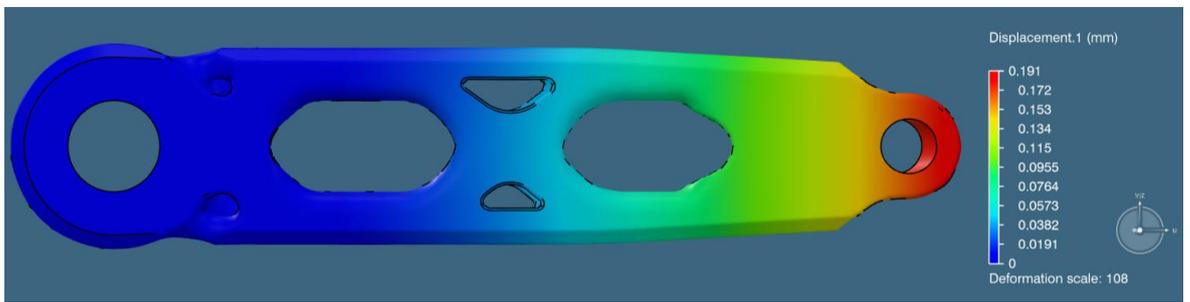


Ilustración 96. OT1: Deformaciones (Caso 2).

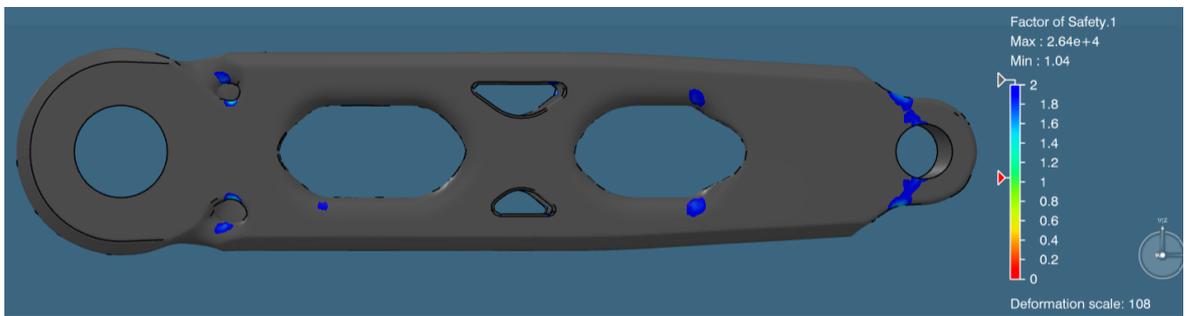


Ilustración 97. OT1: Factor de seguridad (Caso 2).

En el segundo caso de cargas se lleva el material a su límite. Se puede comprobar como en *Ilustración 94* e *Ilustración 95* las mayores tensiones están localizadas en

los cambios de sección transversal. Además, las zonas con menores tensiones corresponden a las zonas que para el caso 1 de cargas tienen valores elevados, lo que significa que se está optimizando correctamente. En el nuevo modelo optimizado se obtiene un valor de tensión máxima de 182 MPa, frente a los 160 MPa de la primera optimización y estando muy próximo al límite elástico del material (190MPa).

Respecto a las deformaciones, se ha mejorado la rigidez ligeramente. En el modelo de optimización nuevo se obtiene un valor máximo de deformación de 0,191 mm frente a los 0,197 iniciales.

Finalmente, respecto al factor de seguridad, el valor mínimo obtenido es de 1.04, el cual es muy bajo. También se debe considerar que el análisis de esfuerzos para el caso 2 es colocando una fuerza puntual sobre el pedal de 150 Kg, que es un valor sobredimensionado.

El resultado de la segunda optimización es el siguiente:

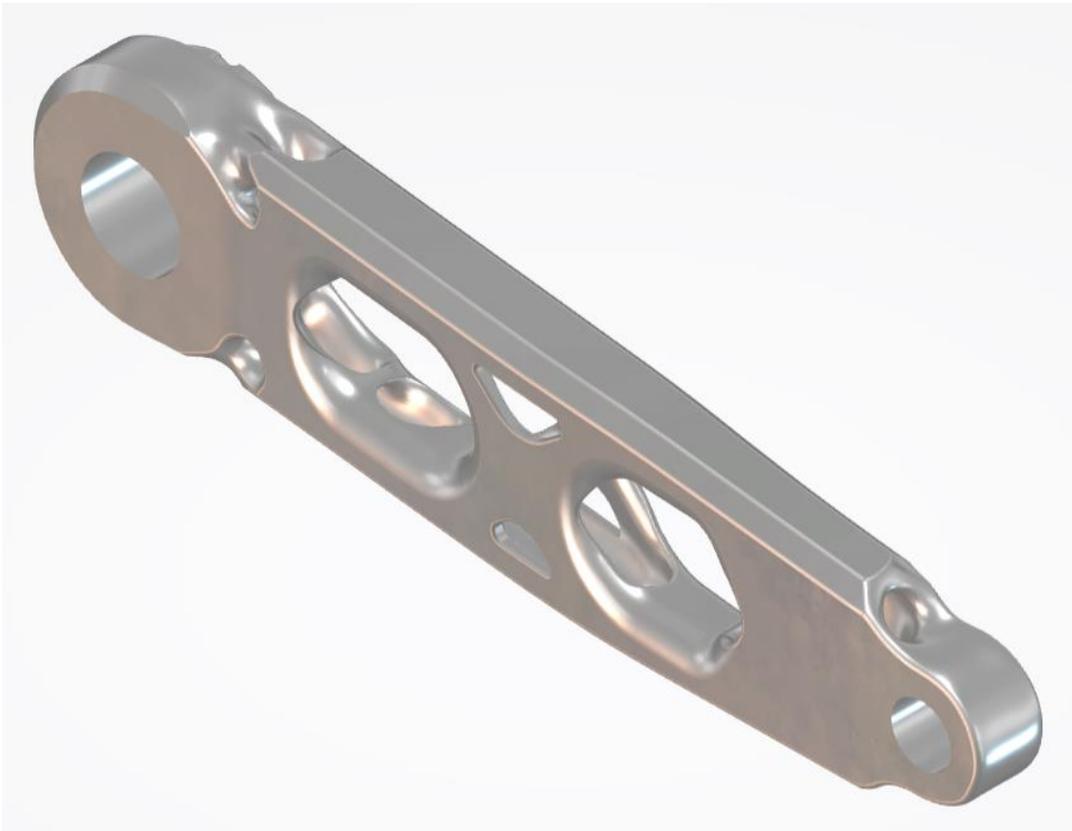


Ilustración 98. OT1: Isométrica 1

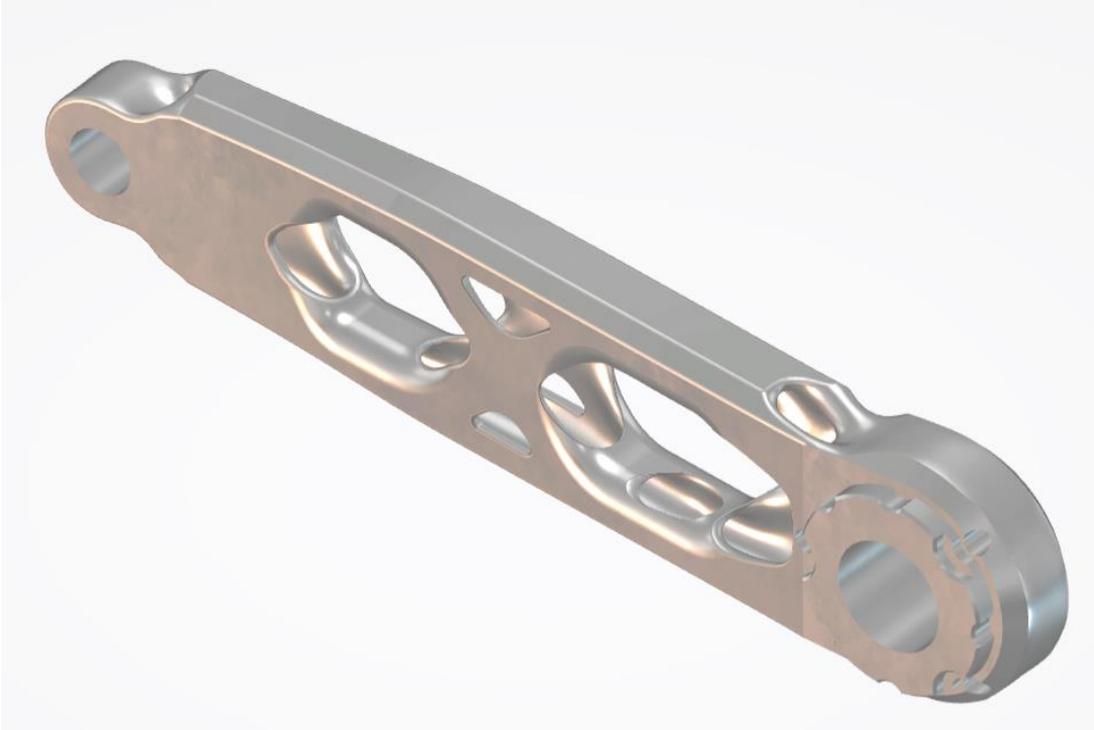


Ilustración 99. OT1: Isométrica 2

5. Resultados:

Para poder culminar con el estudio, se van a comparar los resultados obtenidos. Existen tres modelos a observar: la biela diseñada inicialmente, la primera optimización topológica y la optimización topológica alternativa. De estos tres modelos se ha obtenido la siguiente información:

	Resultados		
	Biela Inicial	Optimización Topológica 1	Optimización Topológica 2
			
Tensión máxima, Caso 1 [MPa]	58	141	148
Tensión máxima, Caso 2 [MPa]	158	160	182
Factor de seguridad, Caso 1	3,3	1,42	1,28
Factor de seguridad, Caso 2	1,2	1,25	1,04
Deformaciones máximas, Caso 1 [mm]	0,0181	0,0438	0,0396
Deformaciones máximas, Caso 2 [mm]	0,158	0,197	0,191
Peso [g]	313	139	110

Tabla 2. Resultados.

6. Conclusiones:

En el estudio se ha realizado un diseño de una biela para una bicicleta, analizando previamente la actualidad de los componentes comerciales que influyen en el desarrollo de dicha biela. Posteriormente, a través de 3DExperience y su aplicación *Structural Generative Design* se ha efectuado una optimización topológica, en la que se han planteado dos casos de cargas y una serie de condiciones de contorno. El resultado obtenido se ha refinado y se le ha sometido a un estudio de esfuerzos y deformaciones para poder verificarlo. Finalmente se ha realizado una segunda optimización, buscando mejorar las propiedades de la biela, y siguiendo el mismo proceso de verificación.

La optimización topológica obtenida inicialmente ha reducido notablemente el peso de la biela original, a más de la mitad. A cambio han aumentado las deformaciones, y por tanto ha disminuido la rigidez, aunque el incremento obtenido no es importante, por lo que se considera una mejora. También se ha empeorado el estado de tensiones sobre el volumen de la biela, prácticamente triplicando el valor de tensión máxima, pero observando el factor de seguridad se puede comprobar cómo sigue siendo un valor aceptable.

Con la segunda optimización se ha buscado reconducir las tensiones de la biela, modificando su morfología, para generar un resultado mejor optimizado por el programa. Con esto se ha obtenido como resultado un modelo que, respecto a la primera optimización, tenga prácticamente 30 gramos menos. Además, se está aprovechando de mejor forma el material en cuanto a las tensiones que soporta e incluso aumenta ligeramente la rigidez de la biela. El inconveniente que presenta el segundo modelo es su proximidad al límite elástico del material, obteniendo un coeficiente de seguridad cercano a la unidad.

Por lo tanto, se puede concluir que gracias a la optimización topológica se ha reducido la masa total del componente en gran cantidad y con una pérdida mínima de rigidez. Si a esto le sumamos la fabricación aditiva, se obtiene como resultado una combinación muy fuerte

que permite desarrollar elementos de compleja morfología como es el caso de la biela optimizada.

Referencias biográficas:

- [1] “Karl Freiherr von Drais - EcuRed.”
https://www.ecured.cu/Karl_Freiherr_von_Drais (accessed Oct. 17, 2022).
- [2] “Kirkpatrick Macmillan - Biografía de Kirkpatrick Macmillan.”
<https://www.biografias.es/famosos/kirkpatrick-macmillan.html> (accessed Oct. 17, 2022).
- [3] “La Historia de la Bicicleta - WeRbikes.” <https://www.werbikes.mx/blogs/werbikes-blog/la-historia-de-la-bicicleta/> (accessed Oct. 17, 2022).
- [4] “Partes de una bicicleta - WeRbikes.” <https://www.werbikes.mx/blogs/werbikes-blog/partes-de-una-bicicleta/> (accessed Oct. 31, 2022).
- [5] “La bicicleta - Componentes de la bicicleta - Bizkaia.Eus.”
https://www.bizkaia.eus/home2/Temas/DetalleTema.asp?Tem_Codigo=10156&Idioma=CA&dpto_biz=8&codpath_biz=8|9778|196|612|10156 (accessed Oct. 31, 2022).
- [6] v. RIVERO PALOMO, v. FERRER-ROCA, A. OGUETA-ALDAY, J.A. RODRÍGUEZ-MARROYO, and J.GARCÍA-LÓPEZ, “Influencia de la longitud de la biela en la eficiencia y biomecánica del pedaleo submáximo”, Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/15655/46-57.pdf>
- [7] “4130 Steel (Chromoly): Properties and Applications - Matmatch.”
<https://matmatch.com/learn/material/4130-steel> (accessed Dec. 03, 2022).
- [8] “The Velo ORANGE Blog: Alloys of Cycling.” <https://velo-orange.blogspot.com/2016/06/alloys-of-cycling.html> (accessed Dec. 03, 2022).
- [9] “La Fibra de Carbono y sus ventajas para tu Bicicleta.”
<https://www.biciscope.com/las-ventajas-la-fibra-carbono-bicicleta/> (accessed Dec. 03, 2022).
- [10] R. R. Chang, W. J. Dai, F. Y. Wu, S. Y. Jia, and H. M. Tan, “Design and manufacturing of a laminated composite bicycle crank,” *Procedia Eng*, vol. 67, pp. 497–505, 2013, doi: 10.1016/J.PROENG.2013.12.050.

- [11] “Factory Tour: Inside 3T Cycling, how Torno carbon cranks are handmade in Italy & more... - Bikerumor.” <https://bikerumor.com/factory-tour-inside-3t-cycling-how-torno-carbon-crank-are-handmade-in-italy-more/> (accessed Dec. 05, 2022).
- [12] R. Bini, P. Hume, J. L. Croft, and A. Kilding, “Pedal force effectiveness in cycling: A review of constraints and training effects,” 2013. [Online]. Available: <https://ro.ecu.edu.au/ecuworks2013/891>
- [13] “How durable are Topology Optimized parts? | Generative Design / Topology Optimization | GrabCAD Groups.” <https://grabcad.com/groups/generative-design-topology-optimization/discussions/how-durable-are-topology-optimized-parts> (accessed Dec. 10, 2022).
- [14] I. P. Rosinha, K. v. Gernaey, J. M. Woodley, and U. Krühne, “Topology optimization for biocatalytic microreactor configurations,” *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 37, pp. 1463–1468, 2015, doi: 10.1016/B978-0-444-63577-8.50089-9.
- [15] V. Kandemir, O. Dogan, and U. Yaman, “Topology optimization of 2.5D parts using the SIMP method with a variable thickness approach,” *Procedia Manuf*, vol. 17, pp. 29–36, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROMFG.2018.10.009.
- [16] “SIMP Method for Topology Optimization - 2022 - SOLIDWORKS Help.” https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm?id=f4fb3e68251a41ac9eac19f6d5dbc00f#Pg0 (accessed Dec. 10, 2022).
- [17] X. Huang and Y. M. Xie, “A further review of ESO type methods for topology optimization,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, no. 5. pp. 671–683, May 2010. doi: 10.1007/s00158-010-0487-9.
- [18] “Historia de la impresión3D - Impresión3D.” <https://sites.google.com/site/impresion3dmadrid9/historia-de-la-impresion3d> (accessed Dec. 18, 2022).
- [19] “¿Qué es la fabricación aditiva? Aplicaciones, tecnologías y ventajas - Bitfab.” <https://bitfab.io/es/blog/fabricacion-aditiva/> (accessed Dec. 18, 2022).
- [20] *ISO/ASTM 52900:2021*.
- [21] “DMP Factory 500 Scalable metal additive manufacturing for seamless large parts.”

[22] “Datasheets 3D Printing Materials.”

Anexos:

Cálculos de fuerzas aplicadas sobre la biela:

- **Caso 1:**

El primer caso de cargas sobre la biela simula la situación de máxima potencia aplicada por el ciclista durante el pedaleo. Esto se da en un sprint, en el que los ciclistas alcanzan hasta 1500 W de potencia a unas 180 rpm. Para añadirle una seguridad extra al dimensionamiento de la biela se va a suponer que se desarrolla una potencia de 1900 W con una cadencia de pedaleo de 180 rpm, que traducido en unidades de fuerza se obtiene lo siguiente:

$$Fuerza (N) = \frac{Par (N \times m)}{Longitud \ de \ biela (m)} \quad (1)$$

El primer paso es determinar el par máximo ejercido:

$$Par (N \times m) = \frac{Potencia (W)}{Cadencia \left(\frac{radianes}{segundo} \right)} = \frac{1900}{6\pi} = 100,80 N \times m \quad (2)$$

$$Cadencia \left(\frac{radianes}{segundo} \right) = 180 \times \frac{2\pi}{60} = 6\pi \frac{rad}{s} \quad (3)$$

Conociendo el par y la longitud de la biela utilizada, que son 170 mm obtenemos la fuerza, sustituyendo el resultado de (2) en (1):

$$Fuerza \ máxima (N) = \frac{100,80 (N \times m)}{0,170(m)} = 593 N \quad (4)$$

Que redondeando se obtiene un valor de fuerza de 600 N en el centro del pedal.

Por lo tanto, también se debe tener en cuenta que se va a generar una flexión al estar la fuerza descentrada respecto al empotramiento que produce el eje del

pedal con la biela. Esta flexión se determina multiplicando la carga por la distancia que hay desde el empotramiento al centro del pedal, que los pedales comerciales es de aproximadamente 50 mm, obteniendo un momento de valor 30 N x m.

- **Caso 2:**

El segundo caso hace referencia a la situación en la que el ciclista se sube a la bicicleta, apoyando la mayor parte de su cuerpo sobre uno de los pedales. Para dimensionar esta carga se ha supuesto un ciclista con un peso de 150 Kg, o lo que es lo mismo, 1500 N. Esta carga estaría situada en el centro del pedal, generando un momento flector de 75 N x m.