



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño y cálculo de un vehículo para personas con movilidad reducida basado en un acople sobre bicicleta convencional.

Autor/es

Víctor Layo Sagasti

Director/es

Jorge Grasa Orús

Titulación

Ingeniería en Tecnologías industriales

Año

2020-2021

Resumen

Este proyecto se centra en el diseño y posterior análisis mediante el método de los elementos finitos de un dispositivo acoplable a un cuadro de bicicleta convencional dándole acceso a discapacitados a este medio de transporte con la ayuda de un compañero. Más concretamente se centrará en la estructura que lo compone, dotándola de la resistencia mecánica suficiente para cumplir con su función.

La metodología utilizada se basará en definir una serie de condiciones que contemplan determinadas limitaciones geométricas, cargas y condiciones de contorno que permitan alcanzar un primer prototipo funcional. Para ello ha sido necesario adoptar una serie de simplificaciones en el modelado de la estructura. Una de ellas se basa en el uso exclusivo de barras como elemento estructural en vez de elementos 3D más similares a un caso real. Por otro lado, los cálculos realizados se basan únicamente en análisis estáticos permitiendo simplificar la estructura al considerarla como un elemento rígido. De esta forma no se tienen en cuenta posibles elementos móviles como la dirección. De esta forma, el diseño ha ido evolucionando desde un primer prototipo hasta un segundo diseño al que se le han aplicado una serie de mejoras aportando así dos posibles soluciones.

El proyecto contempla diversas disciplinas del ámbito de la ingeniería: soluciones existentes en el mercado, selección de materiales, pre-diseño, análisis estructural mediante simulaciones, dimensionamiento y optimización.

Motivación

Este proyecto surge a partir de una asociación sin ánimo de lucro llamada "[Tandem solidario](#)" cuyo fin es la ayuda desinteresada en distintos casos de desigualdad social o de género para personas o colectivos desfavorecidos. Para ello apoyan a las personas a través de la superación personal con el deporte bajo la premisa de que la unión hace la fuerza.

Originalmente, dos personas cuyas limitaciones particulares les impiden practicar ciclismo en solitario crean un "tandem" para superar dichas limitaciones juntos. Sin embargo, con el paso del tiempo han ido conociendo una gran variedad de personas que, dadas sus limitaciones, son incapaces de disfrutar la brisa al desplazarse en bicicleta. Por ello y tras conocer un caso de especial dureza sobre un niño con parálisis cerebral deciden continuar con un proyecto para que tanto él como otros discapacitados puedan disfrutar de la bici como ellos.

De esta forma y tras conseguir tanto patrocinios como donaciones particulares surge este proyecto para diseñar un dispositivo que se acople a su bici o tándem estándar permitiendo a este colectivo desfavorecido disfrutar de la bicicleta.

1. Objetivo y alcance del proyecto	10
2. Introducción	12
2.1. Dispositivos similares en el mercado	12
2.2. Componentes de una bicicleta	14
2.3. Dimensiones del cuadro de partida	18
2.4. Perfiles	21
2.5. Materiales	23
2.5.1. Influencia de la temperatura	24
2.5.2. Influencia de otros efectos	25
2.5.3. Coeficiente de seguridad	26
2.5.4. Criterios de selección	27
3. Simulación computacional del dispositivo	28
3.1. Introducción	28
3.2. Software Abaqus Unified FEA	29
3.3. Creación del cuadro con Abaqus	29
3.3.1. Partes de la estructura	30
3.3.2. Adición de materiales	32
3.4. Diseño del dispositivo delantero	33
3.5. Cargas y condiciones de contorno	38
3.5.1. Condiciones de contorno	38
3.5.2. Cargas	39
3.6. Mallado	40
4. Resultados y optimización	42
4.1. Primeros resultados	42
4.1.1. Carga sobre el asiento	42
4.1.2. Carga sobre los reposabrazos	44
4.1.3. Carca teniendo en cuenta el respaldo	46
4.1.4. Influencia del mallado	46
4.2. Optimización de la estructura	47

4.2.1. Modificaciones sobre la estructura	47
4.2.2. Modificaciones sobre espesores	48
5. Mejora del diseño	51
5.1. Problemas del diseño	51
5.2. Modificaciones sobre la estructura	53
5.3. Cálculos y optimización	58
6. Conclusiones	66
6.1. Selección del material	66
6.2. Evaluación general del proyecto	67
7. Líneas futuras	69
Bibliografía	70

Lista de tablas

Tabla 1. Medidas del modelo CONOR 6700 29" 2021	21
Tabla 2. Perfiles del cuadro de partida de la CONOR 6700 29" 2021	22
Tabla 3. Espesores de los diferentes tubos del cuadro de partida	23
Tabla 4. Propiedades mecánicas de los distintos materiales tomadas a 20°C ...	24
Tabla 5. Variación de las propiedades mecánicas con la temperatura	25
Tabla 6. Tensiones límite en el modelo tras aplicar el coef. de seguridad	26
Tabla 7. Peso, tensiones y desplazamientos máximos para cada material	44
Tabla 8. Tensiones y desplazamientos máximos para cada material aplicando la carga sobre el reposabrazos	45
Tabla 9. Grosor de las diferentes barras del dispositivo diseñado	49
Tabla 10. Peso, tensiones y desplazamientos máximos del primer prototipo tras optimizarlo	50
Tabla 11. Tensiones y desplazamientos máximos para para cada estado de carga con el nuevo dispositivo de aluminio 6061	59
Tabla 12. Grosor de las diferentes barras del dispositivo diseñado	61
Tabla 13. Peso, tensiones y desplazamientos máximos del segundo diseño tras optimizarlo	64

Lista de figuras

Figura 1. Cicloturismo adaptado de "Cien mil pedaladas"	12
Figura 2. Bici adaptada "Handy"	12
Figura 3. Modelo "OPair" de "TriciMad"	13
Figura 4. Kit "Adapta / Bli-Ve-Ciclo"	14
Figura 5. Cuadro de bici de montaña	15
Figura 6. Horquilla para bici de montaña	15
Figura 7. Dirección roscada (izquierda) y dirección "Threadless" (derecha)	16
Figura 8. Manillar típico para bici de montaña	16
Figura 9. Tija junto con el sillín	17
Figura 10. Ruedas de 29" para bici de montaña	17
Figura 11. Transmisión de una bici de montaña	17
Figura 12. Partes de un cuadro de bici que es necesario dimensionar	19
Figura 13. Cuadro de bici de montaña CONOR 6700 29" 2021	19
Figura 14. Cuadro de bici "CONOR 6700 29 2021" acotado	20
Figura 15. Dimensiones en mm de las secciones de cada tubo del cuadro	22
Figura 16. Vista frontal del cuadro de bici con elementos tipo barra y secciones asignadas	30
Figura 17. Creación de un perfil elíptico hueco	31
Figura 18. Creación de un perfil circular hueco	32
Figura 19. Montaje de la horquilla con el tubo de dirección y la potencia	34
Figura 20. Adición de la horquilla o eje principal del dispositivo al cuadro	35
Figura 21. Dimensiones típicas para sillas de ruedas convencionales	35
Figura 22. Adición del asiento al dispositivo delantero	36

Figura 23. Adición de los reposabrazos y el eje sobre el que se colocan las ruedas delanteras	37
Figura 24. Adición de barras que alivien tensiones en la unión entre el eje principal y asiento	38
Figura 25. Condiciones de contorno aplicadas	39
Figura 26. Cargas aplicadas sobre la estructura en un primer análisis	40
Figura 27. Mallado de la estructura con el elemento definido anteriormente ...	41
Figura 28. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061	43
Figura 29. Desplazamientos [m] utilizando aluminio 6061	43
Figura 30. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061	45
Figura 31. Desplazamientos [m] utilizando aluminio 6061	45
Figura 32. Error relativo en función del tamaño de elemento	47
Figura 33. Modificación de la estructura propuesta para reducir la concentración de tensiones	48
Figura 34. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061 con la distribución de cargas del apartado 4.1.1.	49
Figura 35. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061 con la distribución de cargas del apartado 4.1.2.	50
Figura 36. Sistema de dirección y estructura del triciclo de "etnnic"	52
Figura 37. Zoom al sistema de dirección del triciclo de "etnnic"	53
Figura 38. Estructura de partida de una bici de montaña convencional incluyendo la horquilla	54
Figura 39. Estructura con la unión y viga de carga incluidos	54
Figura 40. Nuevo diseño tras incorporar el resto de los elementos estructurales (Vista 1)	55
Figura 41. Nuevo diseño tras incorporar el resto de los elementos estructurales (Vista 2)	56
Figura 42. Cinturón de seguridad para el pasajero delantero	56

Figura 43. Sujeción de las piernas mediante arnés	57
Figura 44. Ejemplo de kit para incorporar tracción eléctrica a una bici de montaña	58
Figura 45. Barras del dispositivo con misma sección divididas por colores	60
Figura 46. Distribución de tensiones [Pa] para el caso con carga distribuida entre el asiento y el respaldo con aluminio 6061.....	61
Figura 47. Distribución de desplazamientos [m] para el caso con carga distribuida entre el asiento y el respaldo con aluminio 6061.....	62
Figura 48. Distribución de tensiones [Pa] para el caso con toda la carga sobre el asiento con aluminio 6061	62
Figura 48. Distribución de desplazamientos [m] para el caso con toda la carga sobre el asiento con aluminio 6061	63
Figura 50. Distribución de tensiones [Pa] para el caso con la carga sobre el reposabrazos con aluminio 6061	63
Figura 51. Distribución de desplazamientos [m] para el caso con la carga sobre el reposabrazos con aluminio 6061	64
Figura 52. Croquis con las dimensiones de cada barra [cm] del segundo diseño tras la optimización	65

1. Objetivo y alcance del proyecto

El proyecto se centra en diseñar y analizar un dispositivo que sea capaz de acoplarse a un cuadro de bicicleta convencional para poder transportar personas con movilidad reducida. Se pretende obtener un acople lo más ligero, duradero y resistente posible partiendo de una bicicleta de montaña destinada al usuario estándar. El presente proyecto abarca varias disciplinas de la ingeniería desde el pre-diseño y selección de materiales hasta un análisis estructural y simulación por elementos finitos de cada parte.

Para alcanzar dicho objetivo se plantean una serie de subobjetivos o pasos intermedios entre los que destacan:

- Estudio de mercado en el que se analizarán los distintos dispositivos ya existentes destinados a satisfacer las mismas necesidades. Con ello se pretende obtener una referencia para el diseño posterior además de una idea general de su funcionamiento.
- Análisis de materiales más comúnmente utilizados en la fabricación tanto de cuadros de bicicleta como de los dispositivos mencionados en el estudio de mercado. Se compararán tanto sus propiedades como características para poder seleccionar el que mejor se adecúe a la estructura diseñada.
- Diseño de un prototipo de la estructura simplificado mediante el uso exclusivo de barras que se utilizará para modificaciones y mejoras posteriores.
- Creación de un modelo mediante elementos finitos para realizar un análisis estático de la estructura sometido a diferentes estados de carga. Con él se pretende ubicar las zonas en las que se concentran tensiones además de otros parámetros relevantes para la estructura y funcionalidad del dispositivo.
- Optimización de la estructura modificando tanto elementos de esta como diámetros y grosores necesarios para cumplir las especificaciones del diseño. Con ello se pretende reducir al máximo el uso de material y costes de fabricación mejorando la funcionalidad del dispositivo.

- Identificación de posibles mejoras sobre la funcionalidad del prototipo para generar un segundo diseño de mayor calidad que se adapte perfectamente a las necesidades del usuario

Con los pasos a seguir identificados comentar que el proyecto se centrará en el análisis de distintas cargas sobre cada parte de la estructura representada de forma simplificada y no tanto en los aspectos concretos y detalles del diseño. Tampoco se hará hincapié en aspectos económicos o de fabricación.

2. Introducción

2.1. Dispositivos similares en el mercado.

En la actualidad existen en el mercado varios modelos que intentan hacer más accesible los paseos en bicicleta para las personas con movilidad reducida. La variedad de discapacidades es elevada por lo que los diseños cambian enormemente según a qué entorno estén orientados.

Dentro del mundo deportivo, llamado ciclismo adaptado, la variedad es grande y está enfocado a personas amantes del deporte que pueden continuar pedaleando con la ayuda de un compañero o con ayuda de sus brazos en un entorno más competitivo. Algunos de estos modelos son parecidos a un triciclo como se aprecia en las Figuras 1 y 2 [1-2].



Figura 1. Cicloturismo adaptado de "Cien mil pedaladas"[1].



Figura 2. Bici adaptada "Handy" [2].

Sin embargo, estos modelos no cumplen con el objetivo de este proyecto. Puede ayudar a conocer estructuras diferentes en el mercado junto con sistemas de dirección y modelos de asientos, pero es más interesante un módulo similar a una silla de ruedas en la parte delantera para que el pasajero pueda disfrutar del viaje sin pedalear. Hay varios ciclos adaptados que cumplen con esta descripción ofrecidos por distintos fabricantes. Todos ellos son bastante parecidos siendo los que más destacan los ofrecidos por "TriciMad" [3].

El más interesante es el modelo OPair de la Figura 3 [4]. La parte trasera no es un cuadro de bici convencional, pero puede servir como base para el diseño de la delantera que se unirá al tubo de dirección de la bici de montaña. Es un modelo que sirve tanto para niños como para adultos con una estructura resistente siendo un buen punto de referencia.



Figura 3. Modelo "OPair" de "TriciMad" [4].

Por otro lado, hay otros fabricantes que se han basado en cuadros de bici más convencionales que pueden darnos una idea más clara de cómo adaptar la unión entre ambas partes sin que se vea comprometida su resistencia y seguridad. Puede apreciarse en la Figura 4 como un cuadro de bici ha sido adaptado para poder unirse a una silla de ruedas típica [5].



Figura 4. Kit "Adapta / Bli-Ve-Ciclo" [5].

De este modo, utilizando los modelos anteriores como referencia, puede empezarse con el estudio de las partes que debe tener una bici y su cuadro para tenerlo en cuenta en el pre-diseño del dispositivo.

2.2. Componentes de la bicicleta.

Una bicicleta está compuesta por la unión de varios elementos que, unidos, permiten su correcto funcionamiento. Para diseñar el dispositivo objeto de este proyecto es necesario comprender las partes que forman una bicicleta, especialmente en la parte delantera donde se acoplará. Los más importantes son:

- **Cuadro:** Es una pieza rígida a la cual van unidas el resto de las partes cuya función es soportar grandes esfuerzos. Su geometría es muy importante ya que va a influir directamente en el comportamiento y prestaciones existiendo de varios tipos y tamaños. Está formado por diferentes tubos de determinadas longitudes y secciones de los que se hablará más adelante.



Figura 5. Cuadro de bici de montaña.

- **Horquilla:** Pieza formada por el tubo de dirección y unos brazos cuya función principal es sujetar la rueda delantera. Hay de varios tipos según el sistema de amortiguación y su recorrido, tamaño o material. Sin embargo, para el primer prototipo que se quiere diseñar, la horquilla se quita de la estructura para poder acoplar el cuadro de la bici convencional por lo que no es necesaria información mucho más detallada. Basta con tener en cuenta que es necesaria una amortiguación delantera, siendo más común para bicis de montaña un recorrido de 120-140mm [6] junto con un tubo de dirección.



Figura 6. Horquilla para bici de montaña.

- **Dirección:** Es el elemento que une la horquilla a través del tubo de dirección al manillar. La nomenclatura está estandarizada mediante el sistema estandarizado de identificación de direcciones (Standardized Headset Identification System).

Hay dos tipos en función de la forma en la que se unen a la pipa de dirección del cuadro [7]:

- **Dirección roscada:** El manillar se fija mediante un sistema de roscas, tuercas y contratuercas al tubo roscado de la horquilla. Se emplea en bicicletas de gama baja y urbanas al ser más económico y con peores prestaciones como una peor resistencia, aunque permite ajustar la altura del manillar sin desajustar la dirección.

- Dirección "Threadless": El sistema de sujeción al manillar consiste en un elemento llamado "potencia" que une ambas partes. Puede ser de varios tipos entre los que está el tradicional, semi-integrado e integrado según la forma de acoplarse al tubo de dirección.



Figura 7. Dirección roscada (izquierda) y dirección "Threadless" (derecha).

- **Manillar:** Junto con la dirección, es el elemento encargado de transmitir el movimiento a la horquilla permitiendo el giro de esta. También es un elemento estructural ya que suele soportar parte del peso del ciclista existiendo varios modelos según el tipo de conducción. Se une al conjunto mediante un elemento llamado potencia.



Figura 8. Manillar típico para bici de montaña.

- **Tija:** Es un tubo que se encarga de unir el sillín con el tubo del asiento del cuadro además de permitir la regulación de altura de este. Al partir de un cuadro convencional de un fabricante no se hará el análisis sobre el sillín y la tija y se estudiará directamente sobre el conjunto cuadro + dispositivo.



Figura 9. Tija junto con el sillín.

- **Ruedas:** Elemento fundamental al que se transmite la fuerza que ejerce el ciclista mediante la transmisión permitiendo así el avance del vehículo. La bicicleta de la que partimos tiene ruedas de 29" y en la parte delantera se utilizarán diámetros típicos para sillas de ruedas de 24". Es importante tener en cuenta que, dado que el objetivo es poder transportar un pasajero en la parte delantera, éste no aportará tracción siendo necesario la sustitución de la rueda trasera de la bicicleta convencional por una con tracción eléctrica. Esto se explicará en detalle más adelante.



Figura 10. Ruedas de 29" para bici de montaña.

- **Transmisión:** Se encarga de transmitir la fuerza del ciclista desde los pedales hasta las ruedas. Los pedales están enroscados a unas bielas montadas a unos platos dentados que, mediante una cadena de transmisión y un sistema de piñón libre, permiten el giro de las ruedas.

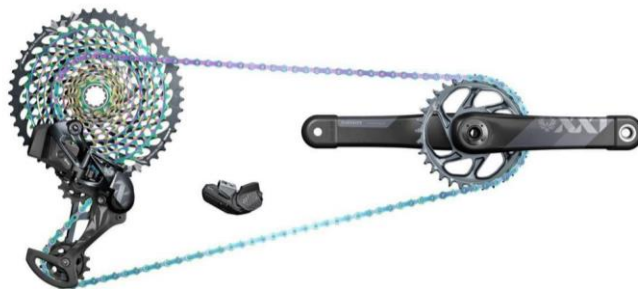


Figura 11. Transmisión de una bici de montaña.

En este proyecto, al partir de un cuadro de bici de montaña convencional, no será necesario centrarse en el análisis de componentes que ya vienen integrados por el fabricante como son la tija, ruedas y transmisión. Tomaremos un cuadro para analizar en conjunto y se incorporará el dispositivo que se diseñe a partir de dicho modelo.

2.3. Dimensiones del cuadro de partida.

Entendiendo como debería funcionar el conjunto para diseñar un dispositivo funcional necesitamos las dimensiones y perfiles de cada parte del cuadro de la bici de montaña de la que se partirá para incluirla en el análisis.

La mayoría de los modelos en el mercado para bicis de 29" son bastante similares en cuanto a forma con algunas variaciones entre ángulos. Sin embargo, esto no afecta a la capacidad del dispositivo a acoplarse en la parte delantera siempre y cuando el tubo de dirección donde se introduce la horquilla tenga el diámetro adecuado. La dimensión del tubo de dirección está bastante estandarizada en los modelos de hoy en día por lo que la mayoría de las bicicletas de 29" en el mercado pueden servir para acoplarse.

Las partes que será necesario dimensionar se encuentran en la Figura 12 a excepción de las tijeras que no será necesario analizar. Entre ellas están:

- Tubo superior: Une el telescopio con el tubo del sillín y su perfil varía con el modelo pudiendo ser tanto elíptico como circular hueco u otra forma algo más irregular.
- Tubo inferior: Une el tubo de dirección con la caja del pedalier con un perfil generalmente elíptico hueco al trabajar principalmente a flexión.
- Tubo de dirección: En él se monta la horquilla por lo que debe tener un perfil circular hueco y grueso al soportar tensiones elevadas. En algunos casos la zona está reforzada.
- Tubo del asiento: En él se coloca la tija con el sillín soportando el peso del ciclista. Trabaja principalmente a compresión por lo que suele tener un perfil circular hueco.

- Vainas superiores e inferiores: Unen la rueda trasera con el resto del chasis. Tienen perfiles algo más estrechos siendo las inferiores elípticas y las superiores circulares.



Figura 12. Partes de un cuadro de bici que es necesario dimensionar.

Con todas las partes a dimensionar en mente es necesario seleccionar un cuadro de bici del mercado en el que basarse. Como se ha comentado, el dispositivo debe ser capaz de acoplarse a multitud de cuadros diferentes por lo que seleccionaremos uno convencional para tomar sus medidas y hacer los cálculos. Por ello me he basado en el modelo de la Figura 13 [8].



Figura 13. Cuadro de bici de montaña CONOR 6700 29" 2021 [8].

Este modelo es bastante convencional en forma y materiales dentro de las bicis de montaña de 29". Más adelante se hablará de las propiedades de los materiales más comunes, pero la aleación de aluminio que utiliza tiene un límite elástico menor que el resto de materiales. De esta forma, si en los cálculos se obtienen buenos resultados significará que también será válido para otros modelos similares.

El fabricante da las dimensiones de cada parte en función de la talla que queramos comprar habiendo desde la "SM" hasta la "XL". Al ser un dispositivo destinado tanto a menores como a jóvenes y adultos es necesario que quepan delante sentados sin obstruir la visión del ciclista por lo que se utilizarán preferentemente las dimensiones de la talla "LA" o "XL". En la Tabla 1 se muestran las dimensiones [8] de cada parte según la talla referidas a la Figura 14.

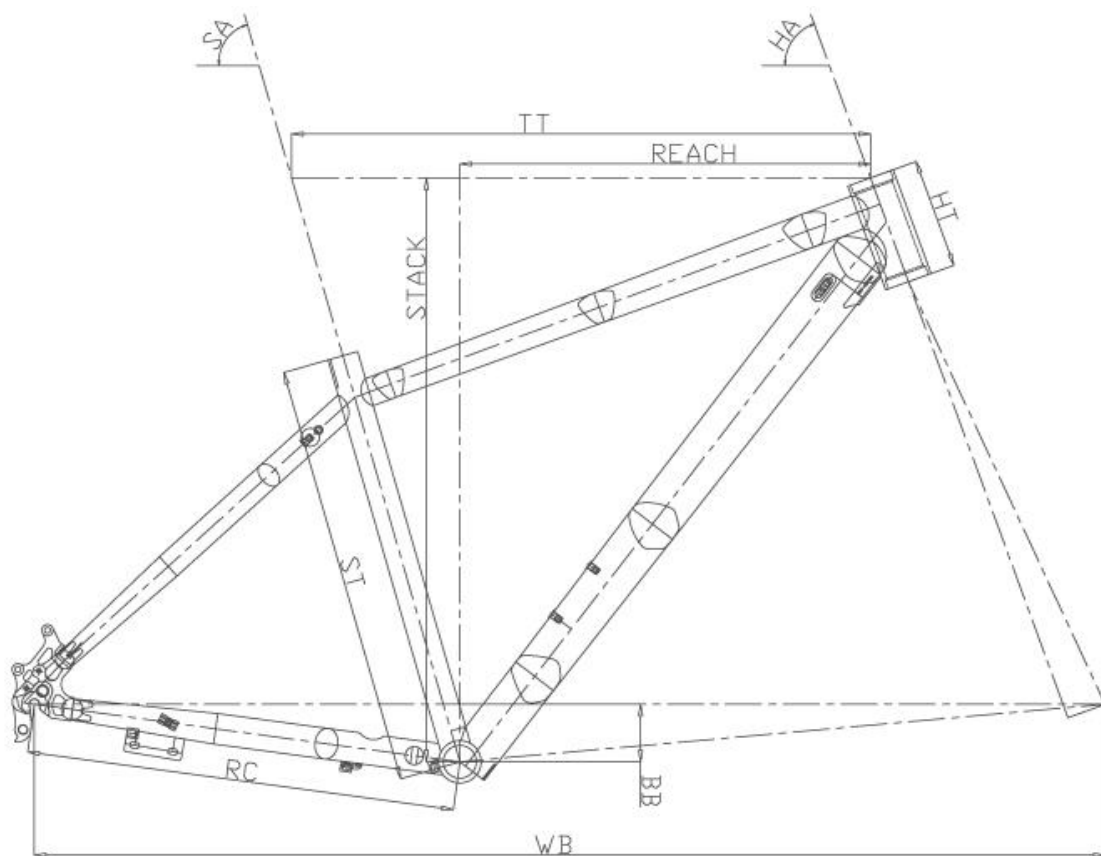


Figura 14. Cuadro de bici "CONOR 6700 29 2021" acotado [8].

	SM	MD	LA	XL
ST (mm)	400	440	480	520
TT (mm)	580	600	620	630
HT (mm)	115	115	125	125
RC (mm)	445	445	445	445
BB (mm)	60	60	60	60
WB (mm)	1100,5	1109,6	1130,3	1140,4
REACH (mm)	407	425,6	445,5	457
STACK (mm)	604	608	617,6	617,5
Ha (°)	69°	70°	70°	70°
Sa (°)	74°	74°	74°	74°

Tabla 1. Medidas del modelo CONOR 6700 29" 2021 dadas por el fabricante [8].

Comparando cada talla, la diferencia principal es la altura del tubo del sillín además de su distancia al tubo de dirección. Un aumento en estas dimensiones hace más favorable la visibilidad y manejo del conjunto. Además, por lo general será un adulto quien maneje el conjunto siendo más realista una talla mayor. Sin embargo, esto no significa que no pueda acoplarse en otras tallas ya que siempre y cuando el alcance o "reach" y la altura o "stack" no sean demasiado pequeños el dispositivo acoplado será manejable. Para los cálculos se utilizará la talla "XL".

2.4. Perfiles.

Con el cuadro de la bici definido es necesario conocer las secciones de todos los tubos mencionados anteriormente además de los que se generarán en el dispositivo delantero. En la página del fabricante [8] de la bicicleta de la Figura 13 y 14 aparece información de cada una de las barras del cuadro, pero puede apreciarse como la sección es variable en algunas de ellas.

Lo primero es identificar cuáles de los tubos tienen un perfil circular y cuales elíptico además de si éste es variable con la longitud o no. Esto puede apreciarse en la Tabla 2.

	Perfil	Tipo
Tubo del asiento	Circular	Constante
Tubo superior	Circular	Variable
Tubo inferior	Elíptico	Variable
Vainas superior e inferior	Elíptico	Constante
Tubo de dirección	Circular	Constante

Tabla 2. Perfiles del cuadro de partida de la CONOR 6700 29" 2021.

Con el tipo de perfil identificado es necesario dimensionarlos. Para los de sección circular se asignará un diámetro en el extremo en el que es mínimo y otro para el extremo en el que es máximo. En cuanto a los de sección elíptica se hace lo mismo, pero en vez de dimensionando el diámetro se hace con los ejes.

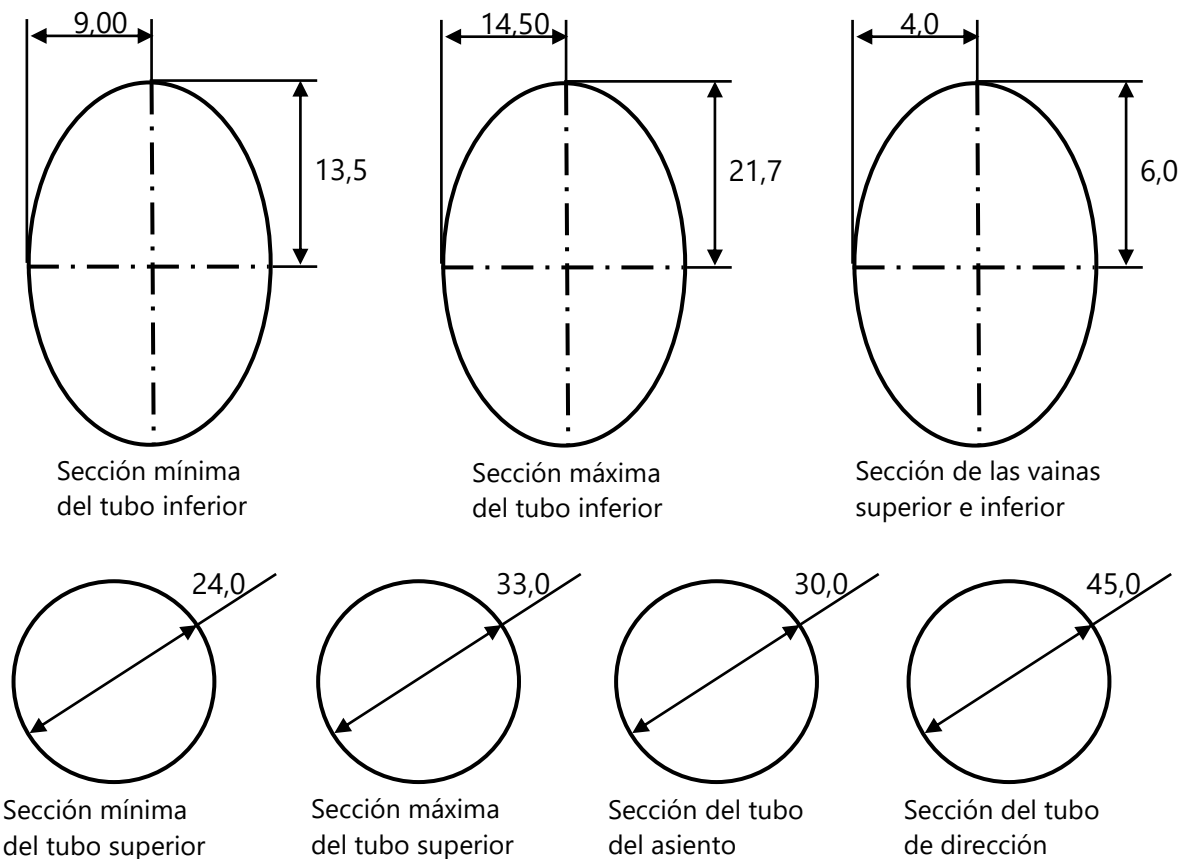


Figura 15. Dimensiones en mm de las secciones de cada tubo del cuadro.

Por último, solo queda identificar el espesor de cada tubo ya que no aparecen en la web del fabricante. Buscando dimensiones típicas para este parámetro en internet en bicicletas de montaña de aluminio estos rondan entre los 0,5 mm y los 6mm según el tubo al que se refiera [9]. En la Tabla 3 se aprecian los espesores seleccionados.

	Tubo del asiento	Tubo superior	Tubo inferior	Vainas superior e inferior	Tubo de dirección
Grosor (mm)	2,00	2,00	2,00	1,00	3,00

Tabla 3. Espesores de los diferentes tubos del cuadro de partida.

Con el cuadro de bici completamente dimensionado y listo para implementar en el software de simulación faltaría hablar de los tubos del dispositivo delantero. Sin embargo, de esto se hablará más adelante cuando se trate el tema del diseño y se optimicen todas las secciones según los resultados del análisis.

2.5. Materiales.

Antes de empezar con el diseño e implantación en el software de elementos finitos es necesario tener en cuenta todos los posibles materiales de los que puede hacerse el dispositivo para seleccionar el más adecuado. Entre ellos están [10]:

- **Acero 4130:** Aunque algo desfasado en la actualidad sigue utilizándose en algunas gamas bajas y medias. Es una aleación con cromo y molibdeno aumentando su resistencia además de hacerlo inoxidable y algo más ligero que el convencional. No es muy popular por su elevado peso, aunque presenta buenas propiedades físicas.
- **Aluminio 6061:** Es el material más utilizado para la fabricación de cuadros de bicicletas por su baja densidad, su maleabilidad y su bajo coste. Sin embargo, tiene aspectos negativos como su durabilidad ya que es más propenso a sufrir daños por fatiga.

- **Fibra de carbono 3K:** Cada vez más popular, es un material caro pero que se puede adaptar a cualquier geometría manteniendo una elevada rigidez y una densidad muy baja. Elimina el inconveniente de la corrosión presentes en el acero y aluminio, aunque tiene contras como ser un material fracturable por un impacto fuerte.
- **Titanio:** Es un material que combina los aspectos favorables de los tres anteriores. Tiene una buena resistencia a menor densidad que el acero, una buena resistencia a la corrosión y una mayor durabilidad. Sin embargo, dada su dificultad de fabricación es un material caro que no se utiliza mucho.

	Acero 4130	Aluminio 6061-T4	Fibra de carbono 3K	Titanio
Módulo de Young (GPa)	205	68,9	231	105
Coefficiente de poisson	0,29	0,33	0,25	0,34
Densidad (kg/m³)	7850	2700	1790	4510
Límite elástico (MPa)	460	145	4413	483

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los distintos materiales tomadas a 20°C.

Hay que tener en cuenta que estas propiedades [11-14] han sido tomadas a 20°C y el dispositivo no tiene porqué trabajar en dichas condiciones. Además, hay otros efectos que pueden modificar a las propiedades mecánicas como el envejecimiento.

2.5.1. Influencia de la temperatura.

En su uso diario el dispositivo puede verse sometido a una gran variedad de temperaturas según la época del año. Este valor influye directamente en el límite elástico por lo que habrá que tenerlo en cuenta en los cálculos.

Se considerará que el rango de temperaturas a las que se verá sometido el dispositivo puede variar desde -20°C hasta los 60°C de forma desfavorable en condiciones ambientales severas. Puede apreciarse en la Tabla 5 la variación del límite elástico de cada material obtenida a partir de la base de datos de MPDB [15]. No todas las propiedades a las distintas temperaturas están disponibles directamente en internet.

	Acero 4130	Aluminio 6061-T4	Fibra de carbono	Titanio
Límite elástico a -20°C (MPa)	467,52	149,34	-	-
Límite elástico a 60°C (MPa)	455,73	144,64	3905,29	453,90

Tabla 5. Variación del límite elástico con la temperatura.

Se aprecia que las propiedades mecánicas de algunos materiales como el acero o el aluminio no se ven muy afectadas por la temperatura mientras que otros, como la fibra de carbono o el titanio, sufren más este efecto. Para los cálculos posteriores se utilizarán los valores más desfavorables que se encuentran a 60°C ya que se alcanzará el límite elástico antes.

2.5.2. Influencia de otros efectos.

En el cálculo de estructuras existen otros efectos a tener en cuenta que pueden modificar las propiedades mecánicas de los materiales. Uno de ellos es el efecto "creep" o deformación por fluencia lenta (envejecimiento del material). Este efecto causa deformaciones permanentes en un sólido que se encuentra bajo la influencia de una carga por tiempo prolongado.

Por lo general, este efecto no es muy relevante en metales siendo más importante en estructuras basadas en plástico. Además, una bicicleta no se encuentra sometida a una carga continua, aunque si es necesario que su periodo de vida sea aceptable (al menos de 10000h de uso) para considerar un buen diseño.

Sin embargo, para calcular cómo afecta a las propiedades mecánicas se necesita información detallada proveniente de bases de datos acerca de la respuesta mecánica en función del tiempo de aplicación de la carga. Esta información no es fácil de encontrar y al no ser tan relevante en metales se simplificarán los cálculos incluyendo un coeficiente de seguridad general para evitar posibles problemas a largo plazo.

2.5.3. Coeficiente de seguridad.

Es típico en la ingeniería y en el cálculo de estructuras aplicar un coeficiente de seguridad para evitar situaciones peligrosas inesperadas en las que se pueda llegar al límite elástico o incluso al límite de rotura del material.

Inicialmente y tras tener en cuenta los posibles efectos que pueden modificar las propiedades mecánicas de los materiales pensaba utilizar un coeficiente de seguridad de 2. Sin embargo, hay efectos que no se han calculado directamente como el "creep" por la falta de información y poca importancia en este caso. Como consecuencia se utilizará un coeficiente de seguridad de 4 en toda la estructura para garantizar su durabilidad y seguridad. Tras aplicarlo la tensión máxima que no debe superarse en ninguna parte del diseño quedaría como en la Tabla 6.

	Acero 4130	Aluminio 6061-T4	Fibra de carbono	Titanio
Límite elástico (MPa)	113,93	36,16	976,32	113,48

Tabla 6. Tensiones límite en el modelo tras aplicar el coeficiente de seguridad.

2.5.4. Criterios de selección.

Para escoger el material que mejor se adecúe a las necesidades del diseño es necesario identificar unos criterios de selección adecuados.

El primer criterio y el más importante de todos es el de no superar la tensión límite especificada en la Tabla 6. Cualquier material que, tras

los cálculos, rebase dicho límite requerirá de una optimización para entrar dentro del rango aceptable o será descartado.

Por otro lado, el peso es un factor importante ya que la persona que pedalea tiene que aportar todo el esfuerzo para mover tanto el dispositivo como a al pasajero que está delante. Sin embargo, al implantar tracción eléctrica como se ha mencionado previamente, el uso de materiales algo más pesados se vuelve viable. Aun así, si los resultados permiten el uso de alguno de los materiales más ligeros éstos serán preferibles.

De forma menos relevante estarán las deformaciones del dispositivo tras sentarse el pasajero. Aunque nos encontremos dentro del rango lineal de deformaciones, no es funcional un dispositivo cuya forma varíe mucho con la carga aplicada. Por ello se buscará un material que ofrezca deformaciones bajas y se optimizará con esto en mente, sobre todo en la zona del respaldo y asiento.

Por último, será conveniente un material económicamente viable ya que hay una variedad muy grande en precios según de que material se fabrique la estructura.

Con los criterios de selección identificados se puede continuar con la generación del primer prototipo del que se obtendrán resultados tras el análisis estático de la estructura. Con dichos resultados para todos los materiales y tras un proceso de optimización podrá seleccionarse el más adecuado según los criterios mencionados en este apartado.

3. Simulación computacional del dispositivo

Con el cuadro de bici dimensionado y la información necesaria para modelarlo podemos entrar al software que se utilizará para la generación del modelo y los cálculos, Abaqus/CAE 2017.

Utilizando dicho software se partirá de la generación del cuadro para ir agregando posteriormente más partes a la estructura en la parte frontal hasta obtener el resultado deseado. Este modelo generado será un primer prototipo, el cual servirá de base para obtener un segundo diseño de mayor calidad y funcionalidad, un diseño optimizado y mejorado.

3.1. Introducción.

Con el paso de los años la necesidad de realizar cálculos cada vez más complejos dentro del mundo de la ingeniería como son las estructuras ha impulsado el desarrollo de nuevas teorías que permitan simplificar dichos cálculos. Entre estas teorías destaca la de la elasticidad que intenta crear un modelo matemático que permita un tratamiento analítico o numérico de estas estructuras.

Sin embargo, al aplicar teorías como esta a casos prácticos, incluso los aparentemente sencillos, pueden presentar dificultades a veces insuperables. De este modo dada la necesidad de encontrar métodos aproximados que permitan la aplicación de estas teorías a estructuras complejas de forma asequible aparecen los métodos basados en discretización de medios continuos.

Es aquí donde surge el método de los elementos finitos (MEF) en el que la estructura continua queda representada mediante su división en partes más pequeñas conectadas entre sí a través de lo que llamamos puntos nodales. De esta forma una estructura con infinitos grados de libertad pasa a tener un número finito de ellos haciendo posible abordar el estudio de su estructura por métodos matriciales conocidos.

Hay que tener en cuenta que el comportamiento de esta representación será similar al de la real cuando el tamaño de estas divisiones de la estructura tienda a cero. Por ello hay que valorar que tamaños son válidos para la

representación de la estructura fijando un grado de discretización en el que el error sea suficientemente bajo de lo que se hablará más adelante en el software utilizado durante el mallado.

3.2. Software Abaqus Unified FEA.

Para aplicar el método tanto al cuadro de bici como al diseño de la estructura se utilizará un software de simulación por elementos finitos llamado Abaqus Unified FEA.

Este software consta de cuatro productos destinados a funciones diferentes según el tipo de simulación que se quiera llevar a cabo [16]. Para crear, editar, monitorear, diagnosticar y visualizar los análisis basados en modelado paramétrico se utilizará Abaqus/CAE en su versión 2017. Sin embargo, para crear el modelo es necesario seleccionar cuál de los otros tres programas utilizaremos para generarlo.

El primero de ellos y que utilizaremos en este proyecto es Abaqus/Standard destinado a análisis estáticos y dinámicos de baja velocidad donde la concentración de esfuerzos de alta precisión es de especial importancia. El resto y que no se utilizarán son Abaqus/Explicit principalmente para elementos dinámicos de conducta no lineal y Abaqus Multiphysics con una gran variedad de funciones desde análisis de fluidos (CFD) y acústica hasta piezoeléctricos entre otros.

3.3. Creación del cuadro con Abaqus.

En este apartado se tratará cada fase del proceso de generación del modelo y análisis utilizando el software mencionado. Antes de tratar con el diseño del dispositivo delantero se generará la estructura del cuadro de bici que ya está dimensionado y a partir de ahí se le irán añadiendo el resto de las partes del dispositivo hasta alcanzar un modelo que responda bien a las cargas aplicadas.

A modo de resumen del procedimiento se partirá de la generación de las partes que componen la estructura a la cual se le asignará posteriormente un material que defina su comportamiento. A continuación, se definirán las interacciones y uniones entre cada parte para poder aplicarle tanto las

condiciones de contorno como las cargas a las que estará sometida y por último se generará un mallado adecuado a la geometría para iniciar el cálculo.

3.3.1. Partes de la estructura.

Antes de todo tal y como se ha explicado anteriormente se utilizará un modelo standard al tratarse de un análisis estático. El programa dispone de una gran variedad de tipología de partes que puede generar según el tipo de estructura a modelar. Entre los parámetros a definir están si será un análisis en 2D o 3D, si la parte será de tipo deformable o rígido y si se trata de un sólido, una placa, una barra o un punto.

En una primera aproximación y para simplificar la generación del modelo al tratarse de un cuadro de bicicleta se utilizará un análisis en 3D basado en elementos tipo barra. Podrían generarse sólidos tanto por revolución o extrusión e incluso geometrías más complejas, pero complicaría excesivamente la generación del modelo no siendo de especial interés en este proyecto. Además, el cuadro de bici no es necesario analizarlo en detalle ya que será uno disponible en el mercado.

Al seleccionar elementos tipo barra simplemente se crean líneas que se unen entre sí a las que posteriormente habrá que asignar una sección y una orientación. Utilizando los datos de las Tablas 1-3 se genera el cuadro de bici como se aprecia en la Figura 16.

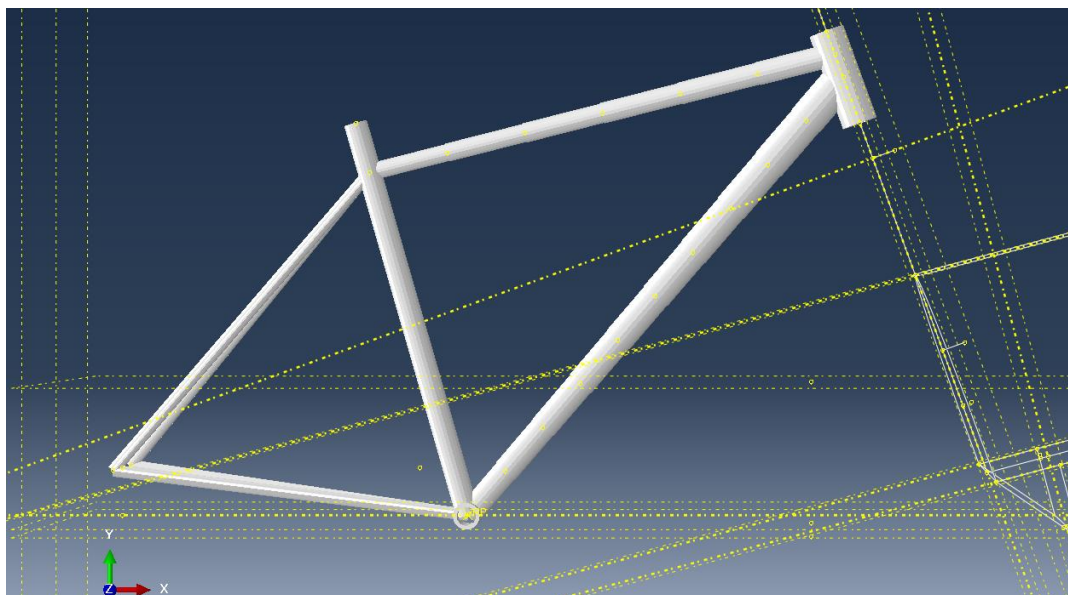


Figura 16. Vista frontal del cuadro de bici con elementos tipo barra y secciones asignadas.

Puede apreciarse que no se ha representado la horquilla que sujeta la rueda delantera. Esto se debe a que, en este primer diseño, se realizará una unión entre dispositivo y cuadro a partir de la sustitución de la horquilla por un nuevo tubo de dirección.

A continuación, para asignar la sección adecuada primero es necesario crearlas individualmente. Para ello se han creado perfiles tanto con geometría tipo circular hueca como arbitraria para las elipses. No existe una forma de crear un perfil elíptico directamente por lo que en una tabla se han generado los puntos correspondientes a una elipse (80 puntos en total). En las Figuras 17 y 18 puede apreciarse la generación tanto de perfiles circulares como elípticos.

Point	1-coordinate	2-coordinate	Segment	Thickness
1	0	0.0135	-	-
2	0.00045	0.0134831	1-2	0.0045
3	0.0009	0.0134323	2-3	0.0045
4	0.00135	0.0133473	3-4	0.0045
5	0.0018	0.0132272	4-5	0.0045
6	0.00225	0.0130713	5-6	0.0045
7	0.0027	0.0128782	6-7	0.0045
8	0.00315	0.0126461	7-8	0.0045
9	0.0036	0.012373	8-9	0.0045
10	0.00405	0.0120559	9-10	0.0045
11	0.0045	0.0116913	10-11	0.0045
12	0.00495	0.0112747	11-12	0.0045
13	0.0054	0.0108	12-13	0.0045
14	0.00585	0.0102591	13-14	0.0045
15	0.0063	0.00964093	14-15	0.0045
16	0.00675	0.00892941	15-16	0.0045
17	0.0072	0.0081	16-17	0.0045

Figura 17. Creación de un perfil elíptico hueco.

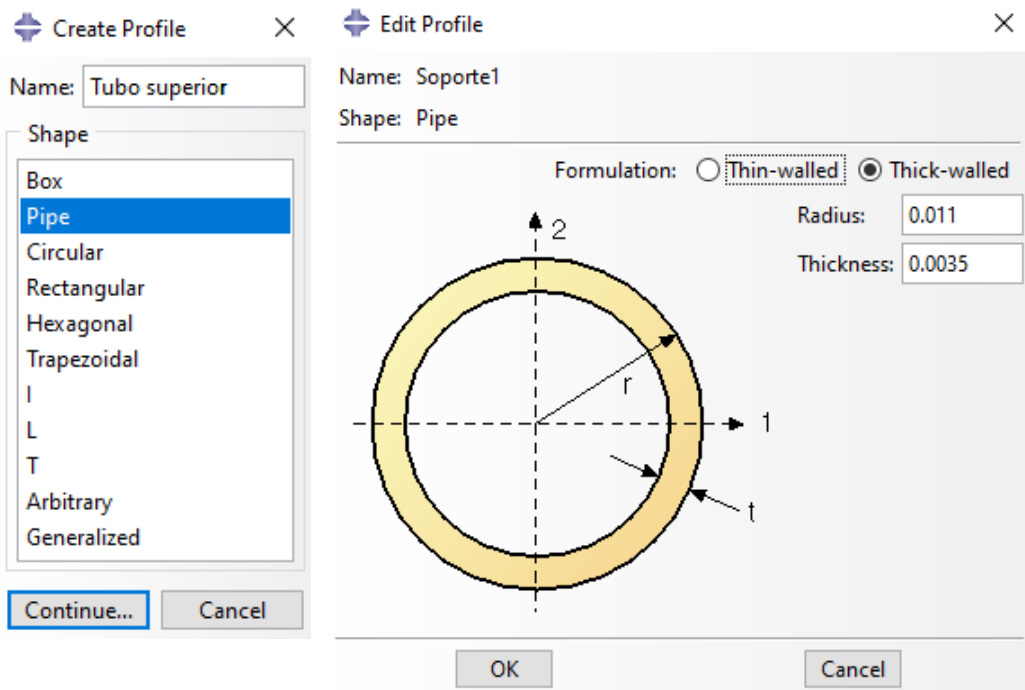


Figura 18. Creación de un perfil circular hueco.

Con los perfiles generados para todas las barras es necesario crear una sección que se asignará más adelante a cada barra de la geometría. Dentro de esta sección estará la información tanto del perfil creado con anterioridad como del material que formará dicha barra. Por supuesto, para poder asignar un material es necesario crearlo primero como se explicará en el apartado siguiente. Terminada la creación de las secciones se asignan a cada barra quedando el resultado de la Figura 16.

Puede apreciarse que el conjunto es una única parte unida y soldada por lo que no será necesario más adelante asignar interacciones entre distintas partes.

3.3.2. Materiales.

Como se ha explicado en el apartado anterior, es necesario antes de crear y asignar las secciones decirle al programa de que material estarán hechas. El cuadro será completamente de aluminio 6061 tal como especifica el fabricante del modelo que se ha seleccionado, pero también será necesario crear los materiales de acero, fibra de carbono y titanio para analizar posteriormente cual se ajusta mejor al dispositivo delantero.

Dentro del creador de materiales pueden seleccionarse una gran variedad de propiedades según el tipo de análisis que se hará más

adelante. En este caso se basará en las tensiones y deformaciones generadas por cargas de peso y no por cargas térmicas o eléctricas. Por ello será suficiente con los valores de la Tabla 4 para un primer análisis. El límite elástico tampoco será necesario ya que simplemente puede controlarse que las tensiones nunca superen dicho valor en ningún punto de la estructura.

En cuanto a las unidades, el software no utiliza ninguna en concreto. Puedes utilizar las que consideres apropiadas siempre y cuando seas consistente con las mismas en todos los apartados.

Antes de continuar con la creación del modelo que sería la asignación de condiciones de contorno y cargas es necesario diseñar y acoplar el dispositivo de la parte delantera ya que dichas cargas también se aplicarán sobre el mismo.

3.4. Diseño del dispositivo delantero.

El procedimiento para el diseño partirá de la definición de los requisitos y especificaciones que debe cumplir para, a continuación, generar un diseño preliminar sobre el que aplicar las cargas y condiciones de contorno y obtener los cálculos de cargas y desplazamientos. Una vez obtenidos los resultados para el diseño preliminar se irá mejorando y optimizando para que las tensiones no superen un límite prefijado en ninguno de sus puntos.

El primer elemento a dimensionar será la conexión entre ambas partes, cuadro y dispositivo. En este primer diseño la unión se realiza mediante el tubo de dirección que sustituirá a la horquilla de la bicicleta dado que dicha unión es la más segura y resistente. Este tubo, para mejorar la comodidad del conductor, debe sobresalir lo justo y necesario para colocar el manillar a una altura adecuada. Puede apreciarse en la Figura 19 el procedimiento de montaje de la horquilla junto con la potencia y el tubo de dirección. La horquilla se introduce por abajo sobresaliendo por la parte superior del tubo de dirección mientras que entre la pista superior y la tapa de rodamientos se coloca la potencia. Adicionalmente, se puede colocar un anillo separador antes de la potencia para elevar su posición.

Por consiguiente, la distancia que tiene que sobresalir por la parte superior será el sumatorio de las dimensiones del rodamiento y pista superiores

junto con la potencia y anillo separador a lo que se restará 2 mm necesarios para colocar la tapa encima.

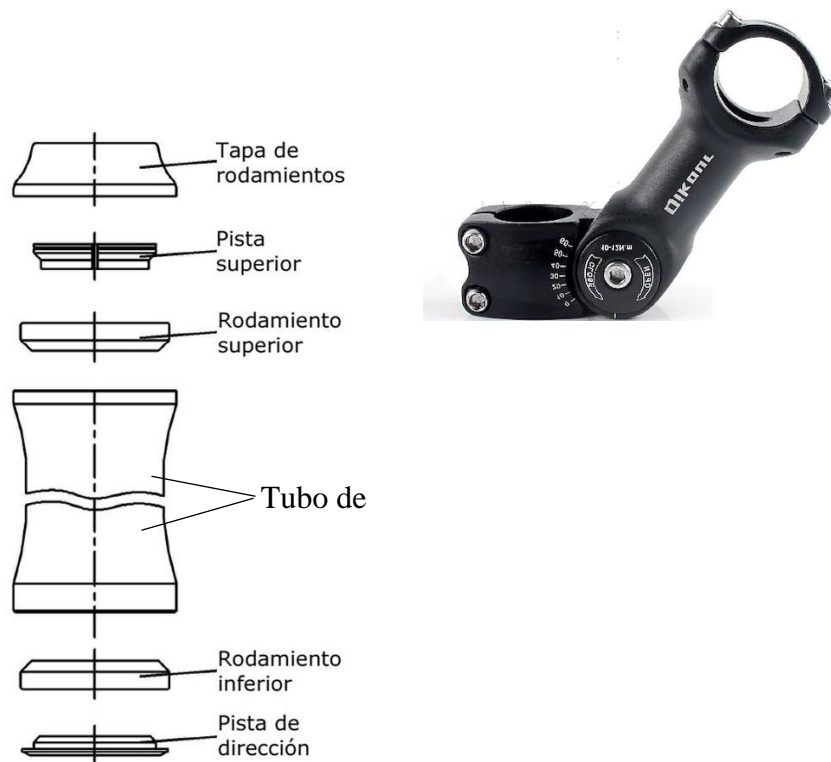


Figura 19. Montaje de la horquilla con el tubo de dirección y la potencia.

Los anillos separadores son de tamaños variados según la altura a la que quieras colocar el manillar. Los valores típicos llegan hasta los 20 mm siendo este el valor que se tomará para el cálculo. Sumando el resto de las partes se obtiene que el tubo debe sobresalir 60 mm aproximadamente según la potencia seleccionada. Como se ha dejado un margen para el anillo separador y este puede ser de varios tamaños será fácil ajustarlo al gusto del usuario quedando como se aprecia en la Figura 20. Para el diámetro se ha utilizado el del agujero del tubo de dirección.

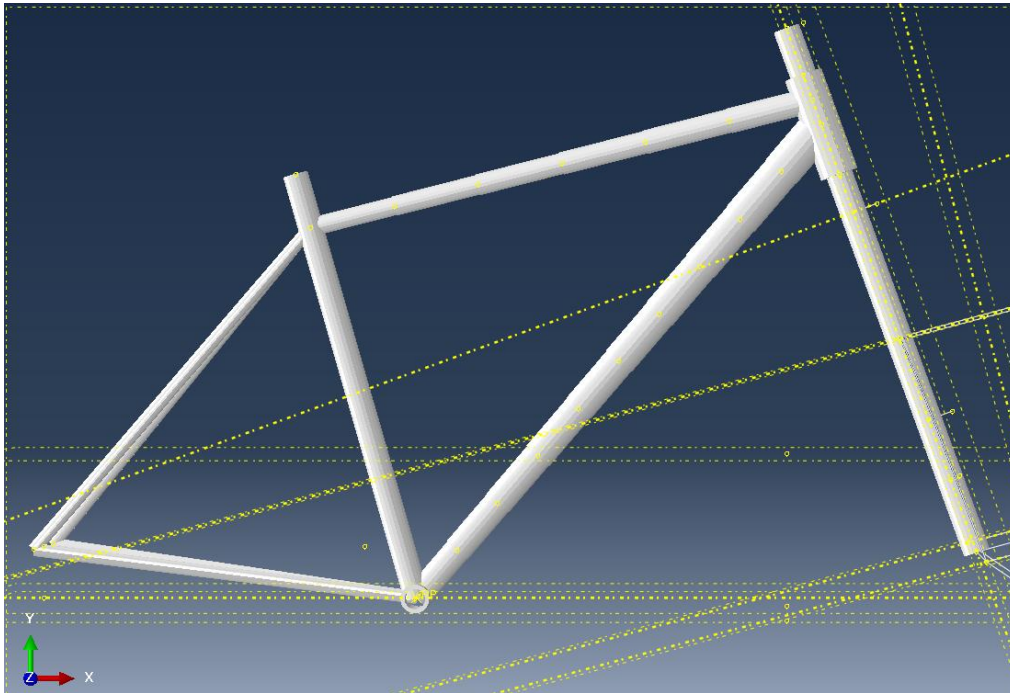


Figura 20. Adición de la horquilla o eje principal del dispositivo al cuadro.

Para calcular la posición de su límite inferior es necesario conocer la altura a la que se colocará el asiento para que alcance dicho punto. Para ello me he basado en modelos de sillas de ruedas convencionales en el mercado que toman valores cercanos a los de la Figura 21.

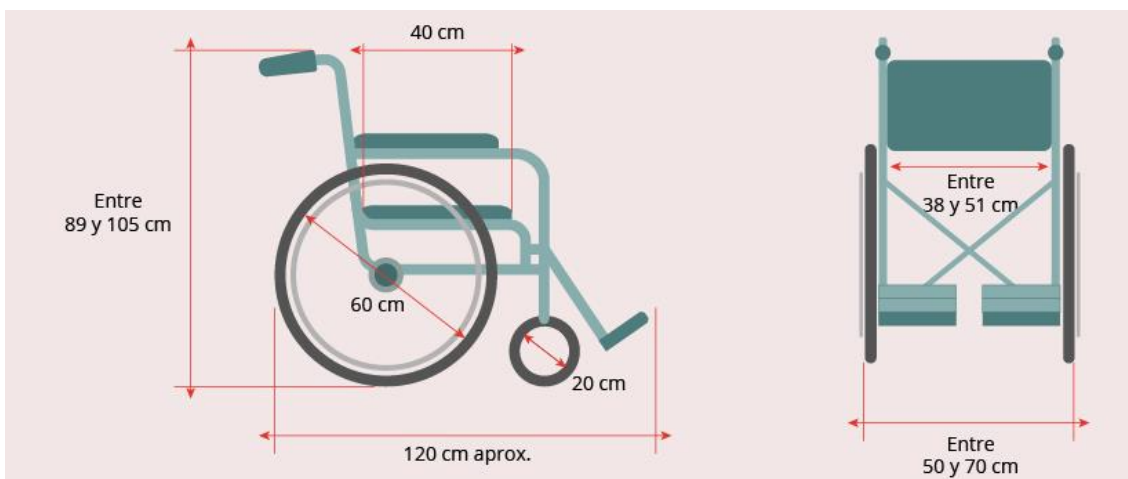


Figura 21. Dimensiones típicas para sillas de ruedas convencionales.

En modelos para adultos el asiento se coloca aproximadamente a 48 cm del suelo. Sin embargo, estos asientos se encuentran paralelos al plano del suelo mientras que, en este caso, el eje principal tiene cierta inclinación. Por lo tanto, esta altura se aplicará en la zona donde se encuentren las rodillas para que no hagan contacto con el suelo.

Por otro lado, la distancia de las rodillas a la parte trasera es de 40 cm como se aprecia en la Figura 21. Utilizando estos valores se obtiene el punto más bajo del eje principal del dispositivo presente en la Figura 20.

Con el eje principal dimensionado se puede diseñar el asiento. No debe ser perfectamente perpendicular con este eje ya que no sería del todo cómodo. Por lo tanto, se ha utilizado un ángulo entre asiento y respaldo de 95° además de una longitud de 40 cm como se ha mencionado previamente. En cuanto a la anchura ésta es típicamente de 50 cm en adultos quedando un asiento como el de la Figura 22.

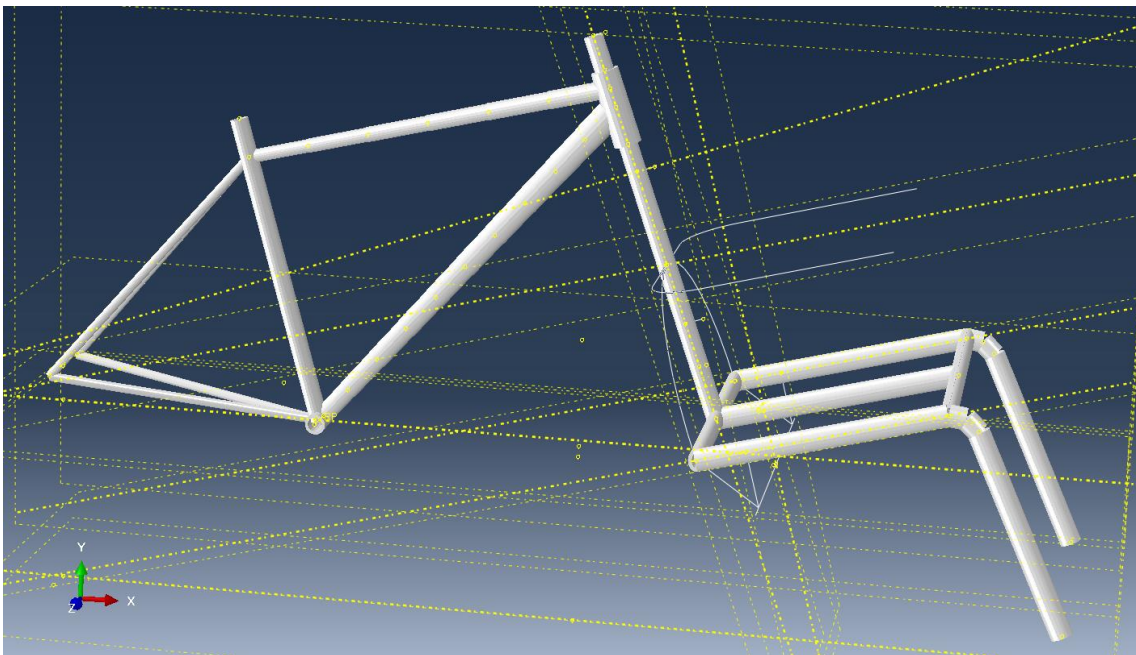


Figura 22. Adición del asiento al dispositivo delantero

Puede apreciarse como se han utilizado barras de sección elíptica ya que son partes que van a trabajar principalmente a flexión. Su orientación es tal que al no haber cargas en el eje Z se maximice la inercia de dicho eje. Además, el diseño inicial dispone de 3 barras paralelas para sujetar el asiento y el peso del pasajero, aunque puede optimizarse y cambiarse tras los cálculos.

A continuación, habría que incluir un reposabrazos y el eje sobre el que se colocarán las ruedas. Típicamente la altura de los reposabrazos respecto del asiento es de unos 25 cm con una distancia entre brazos de 50 cm. Por otro lado, las ruedas tienen un radio de unos 31 cm por lo que la altura del eje que las sostenga estará a esa distancia del suelo. Teniendo en cuenta estos parámetros el dispositivo quedaría como en la Figura 23.

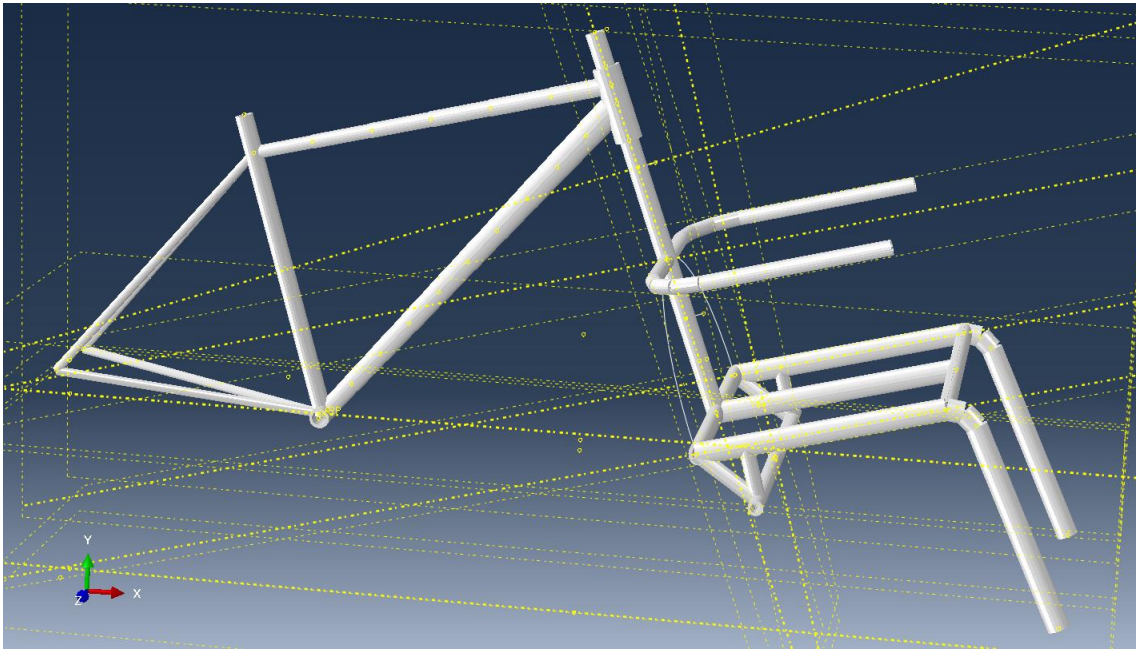


Figura 23. Adición de los reposabrazos y el eje sobre el que se colocan las ruedas delanteras.

Para las secciones de estas barras se han utilizado circulares en todas ellas. Los reposabrazos típicamente en las sillas de ruedas son barras circulares huecas de sección no muy elevada al no soportar cargas excesivamente grandes. En cuanto a las barras donde irán colocadas las ruedas, trabajan principalmente a compresión soportando el peso del pasajero por lo que es más eficiente una sección circular.

Por último, antes de continuar con el análisis, se aprecia como el eje de dirección será una barra en la que se concentren tensiones. Será necesario reforzarla o liberarle tensiones agregando más barras que soporten el peso. Para ello se ha utilizado la disposición de la Figura 24 en la que se han añadido dos barras de sección circular.

En cuanto a los espesores seleccionados para cada barra en este primer análisis no es muy importante que sean los adecuados ya que se optimizarán en función de los resultados obtenidos. Si las tensiones son demasiado grandes o pequeñas se mejorará la estructura modificando grosores y diámetros entre otras cosas. De esta forma y tras un proceso de optimización explicado más adelante se especificarán las secciones de cada una de las barras. Con este primer diseño puede continuarse con el análisis aplicando las cargas y condiciones de contorno.

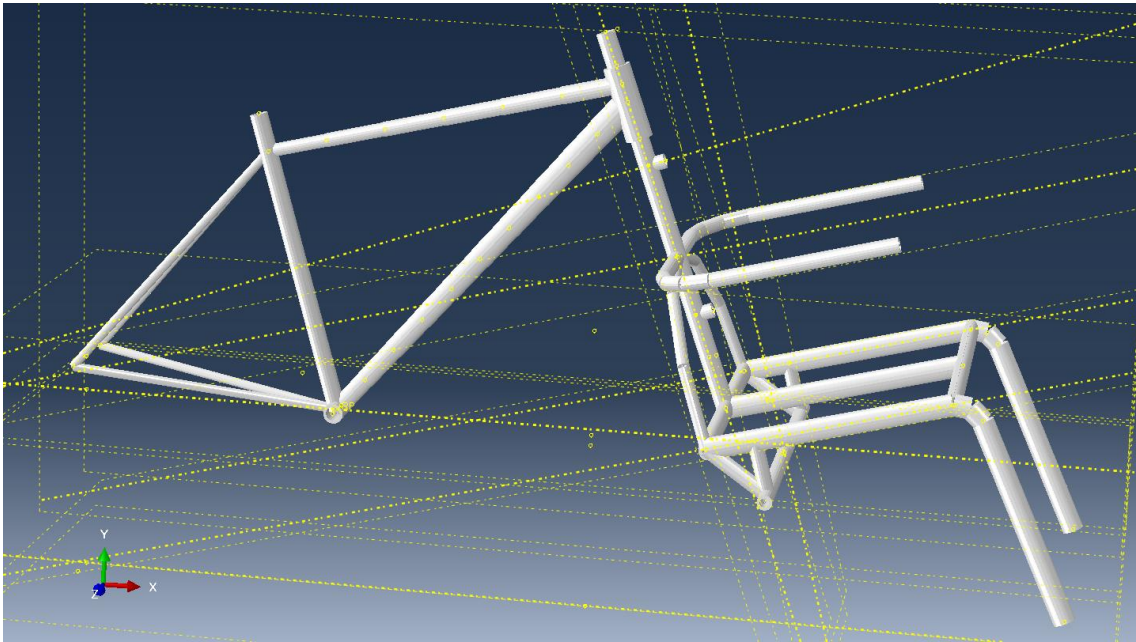


Figura 24. Adición de barras que alivien tensiones en la unión entre el eje principal y asiento.

3.5. Cargas y condiciones de contorno.

Uno de los aspectos más importantes en el análisis por elementos finitos es la correcta definición de las cargas y condiciones de contorno a las que será sometido el modelo.

3.5.1. Condiciones de contorno.

Al ser solo la estructura de una bicicleta se considerarán cuáles son los apoyos con el suelo para determinar las condiciones de contorno. Al disponer de tres ruedas éstos se distribuyen en dichas zonas como se aprecia en la Figura 25.

La rueda trasera se une al cuadro a través de dos puntos en el contacto entre las vainas superiores e inferiores, mientras que las ruedas delanteras se introducen en el eje delantero siendo éste el que soporta el peso. En una bicicleta real estos puntos están amortiguados, pero para un análisis estático va a considerarse que no pueden moverse tanto en el eje Y como en el eje Z. Además, es necesario que una de las dos zonas ya sea la delantera o la trasera no pueda desplazarse en el eje X para que permanezca de forma estática.

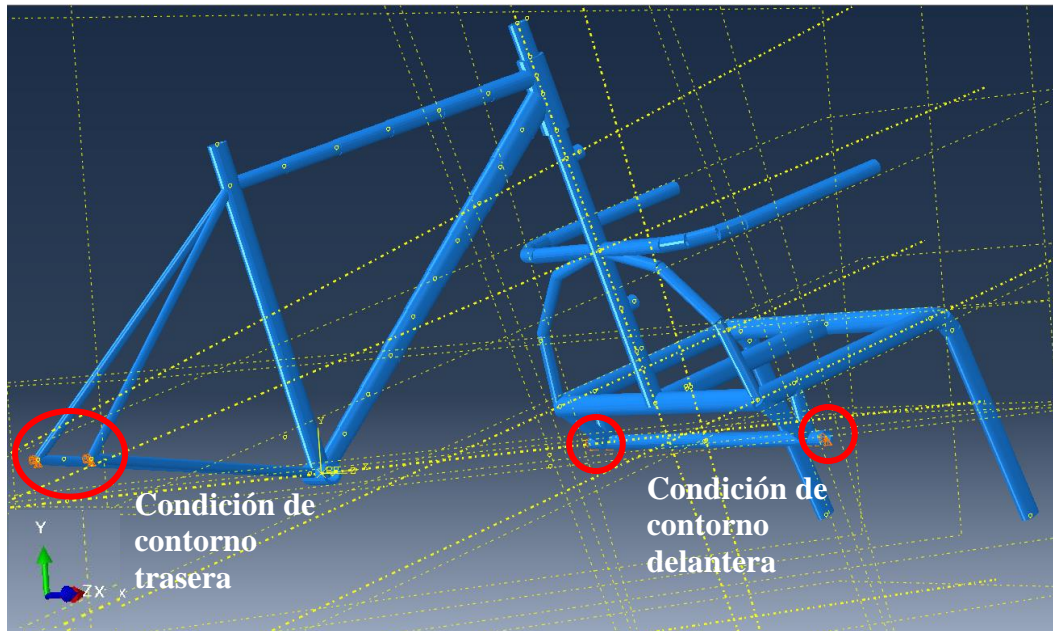


Figura 25. Condiciones de contorno aplicadas.

3.5.2. Cargas.

En cuanto a las cargas se tendrá en cuenta tanto el peso del conductor como el peso del pasajero y el peso de la estructura. Es importante establecer las especificaciones de diseño en las que se selecciona un peso máximo. En los modelos similares en el mercado además de para las bicicletas convencionales se suele utilizar 120kg de máximo.

Para el peso de la estructura es sencillo ya que se ha definido una densidad de material por lo que solo hay que generar una carga que simule la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$ en el eje Y negativo.

Por otro lado, el peso del ciclista es sencillo ya que se apoya completamente sobre el sillín y este sobre el tubo del mismo. Todo el peso se dispondrá según el eje Y negativo al ser consecuencia de la gravedad, colocando una carga puntual de valor $120 \times 9,81 = 1177,2 \text{ N}$.

Por último, queda el peso del pasajero delantero. Hay que tener en cuenta que se encuentra inclinado apoyando parte de su peso sobre el respaldo y parte del peso sobre el asiento. Para los cálculos estructurales hay que tener en cuenta siempre la situación más desfavorable por lo que inicialmente se harán cálculos apoyando su peso totalmente sobre el asiento y más adelante se incluirán tanto los reposabrazos como el respaldo. El asiento como tal no se va a generar en el modelo estando

este apoyado sobre las 3 barras de la Figura 22. Por lo tanto, la carga será una que se distribuya linealmente por estas tres barras con un valor total de 1177,2 N al estar diseñado también para 120 kg. Las cargas quedarían distribuidas como se aprecia en la Figura 26.

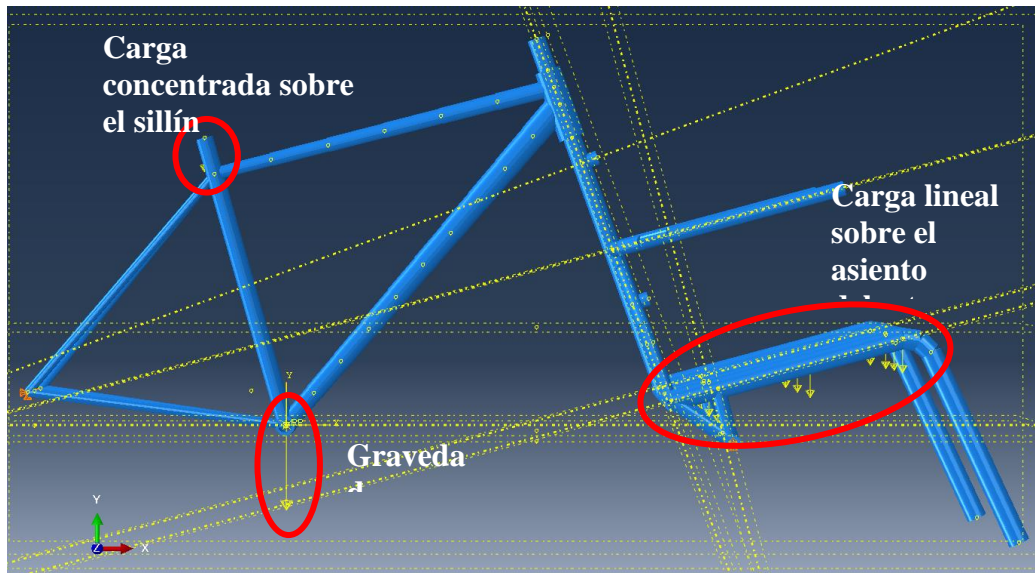


Figura 26. Cargas aplicadas sobre la estructura en un primer análisis.

3.6. Mallado.

Una vez generado el modelo completamente el último paso previo al cálculo es el mallado en el módulo "mesh". En él se seleccionará tanto la forma como el tipo del elemento.

El tamaño del elemento indica cuán fina es la malla que se creará disminuyendo el error de cálculo cuanto más fina sea. Sin embargo, cuanto menor es el tamaño de elemento más nodos se crean incrementando el coste computacional. Se partirá inicialmente de un mallado no muy fino de un tamaño de elemento de 15 mm que podrá optimizarse más adelante si se comprueba que los resultados son muy dispares si se reduce el tamaño de elemento.

Por otro lado, en este primer análisis se utilizarán elementos con interpolación lineal dentro de la familia de elementos barra dado el modelo que se ha generado. Posteriormente, tras presentar los resultados obtenidos con estos parámetros, se mejorará el mallado para obtener resultados más fiables.

Con los elementos definidos se aprecia el mallado en la Figura 27.

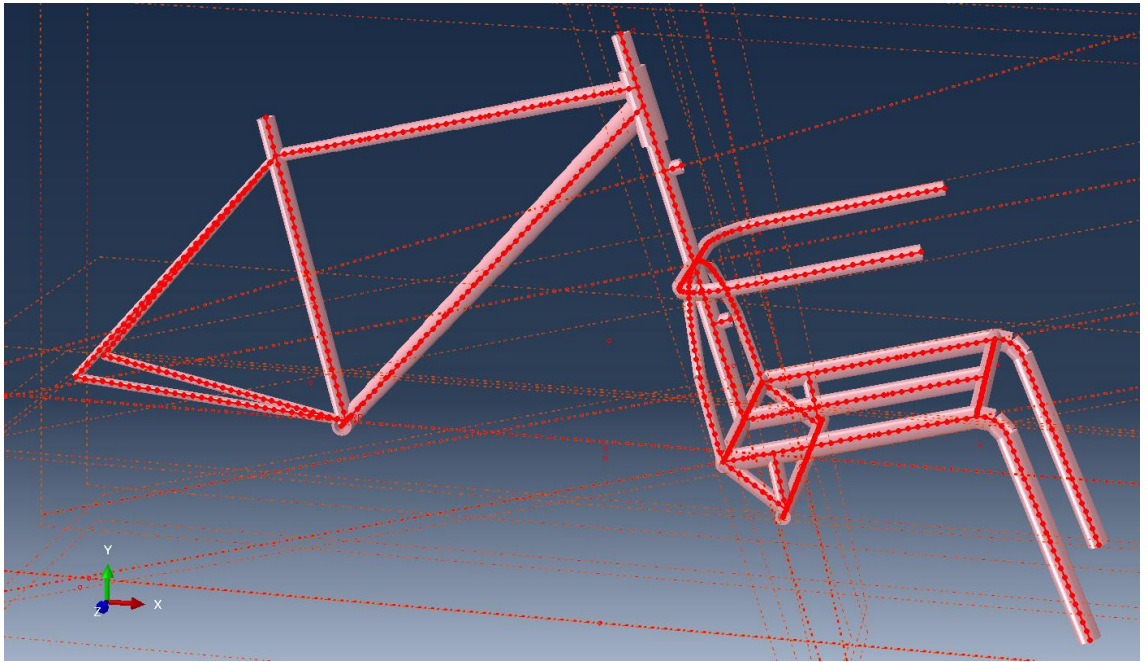


Figura 27. Mallado de la estructura con el elemento definido anteriormente.

4. Resultados y optimización

En este apartado se obtendrán los primeros resultados para la geometría definida anteriormente y se optimizará tanto la estructura como el mallado.

4.1. Primeros resultados.

Para obtener los resultados de tensiones y desplazamientos se le asignarán los distintos materiales definidos previamente al dispositivo delantero para así compararlos.

Para obtener resultados realistas se someterá el dispositivo a distintos estados de carga variando la distribución de la carga para identificar cual es la más desfavorable en cada elemento y que así toda la estructura pueda ser optimizada correctamente.

4.1.1. Carga sobre el asiento.

Como se ha especificado en el apartado 3.5.2. el primer caso que se va a estudiar es la distribución de la totalidad del peso del pasajero delantero sobre el asiento sin tener en cuenta reposabrazos o respaldo.

Dado que al cambiar el material la geometría y cargas se mantienen, los resultados para las tensiones serán muy parecidos para todos los materiales. Por ello solo se representarán las tensiones correspondientes al aluminio 6061 y sus desplazamientos estando estos en las Figuras 28 y 29. Más adelante en la Tabla 7 se encuentran resumidos los valores máximos obtenidos para cada material.

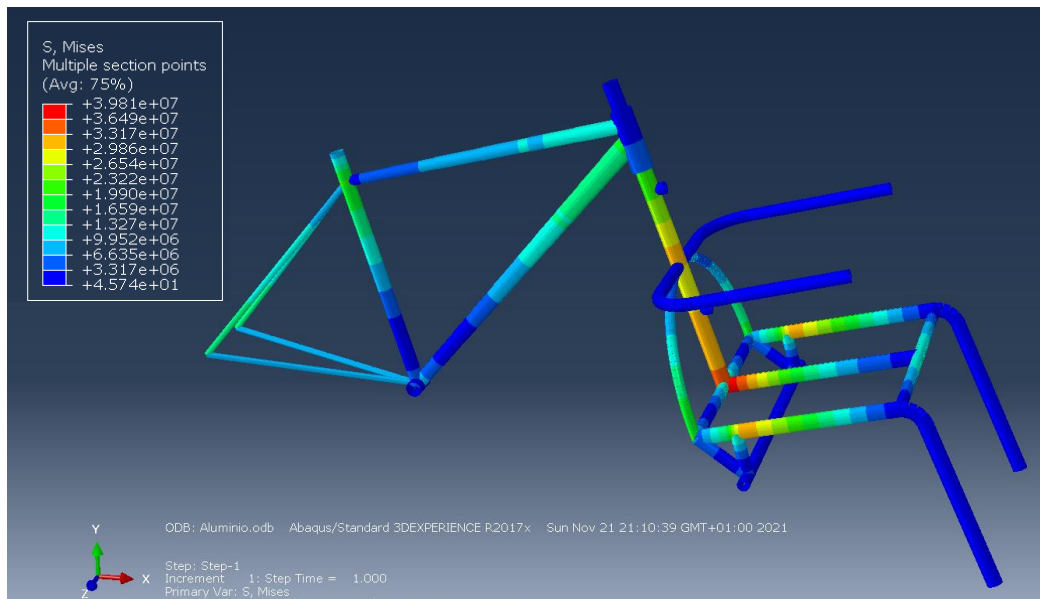


Figura 28. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061.

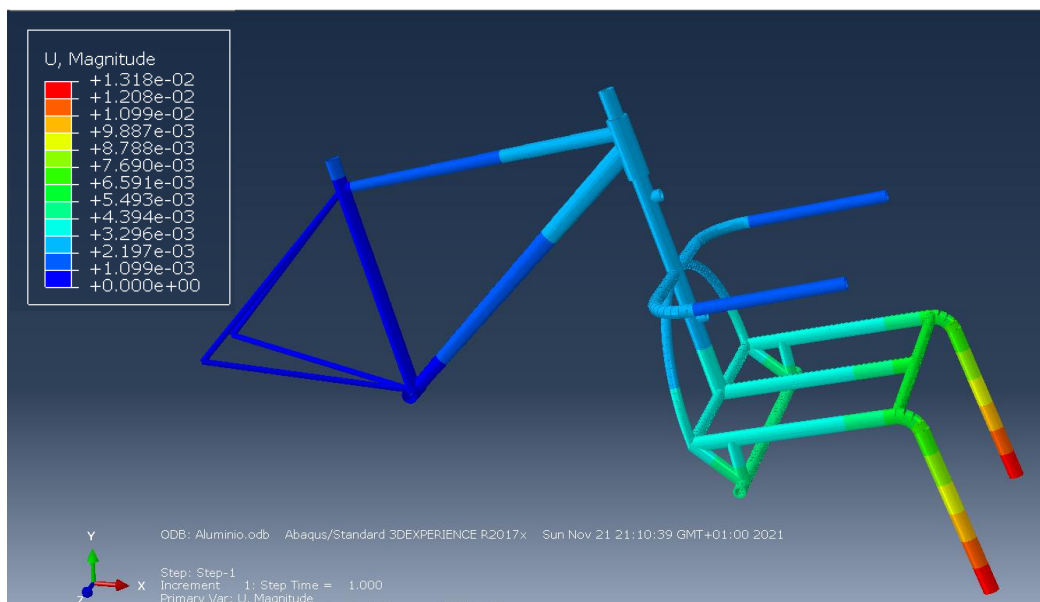


Figura 29. Desplazamientos [m] utilizando aluminio 6061.

A modo resumen de los resultados se muestra en la Tabla 7 las tensiones máximas obtenidas comparadas con el límite elástico del material además de los desplazamientos. Puede apreciarse como solo se alcanza dicho límite cuando se utiliza aluminio en la situación más desfavorable al tener un límite elástico considerablemente menor que el resto de materiales. Entre el resto hay margen suficiente como para reducir espesores con el fin de disminuir el uso de material y por consiguiente costes de producción y peso.

	Aluminio 6061	Acero 4130	Fibra de carbono 3K	Titanio
Tensión máxima (MPa)	39,81	41,30	39,4	40,38
Límite de tensión (MPa)	36,16	113,93	976,32	113,48
Desplazamiento máximo (mm)	13,18	5,95	5,30	9,24
Peso (kg)	1,85	5,39	1,23	3,10

Tabla 7. Peso, tensiones y desplazamientos máximos para cada material.

4.1.2. Carga sobre reposabrazos.

Mucha gente al sentarse por comodidad y seguridad acostumbra a apoyar la mayor parte del peso sobre los reposabrazos. Al encontrarse estos en voladizo es posible que no sean capaces de soportar el peso del individuo.

Para este análisis se considera que los reposabrazos se utilizan como un apoyo y en ningún caso se dejará caer sobre ellos la totalidad del peso del pasajero ya que esa no es su función dentro de la estructura. Al sentarse y considerando una situación desfavorable se aplicará el 60% del peso sobre los reposabrazos mientras que no habrá ninguna carga sobre el asiento o respaldo ya que aún no se ha sentado.

En las Figuras 30 y 31 se aprecian los resultados cuando se utiliza el aluminio. Los resultados para el resto de los materiales no son muy diferentes gráficamente por lo que se plasmarán los resultados en la tabla 8.

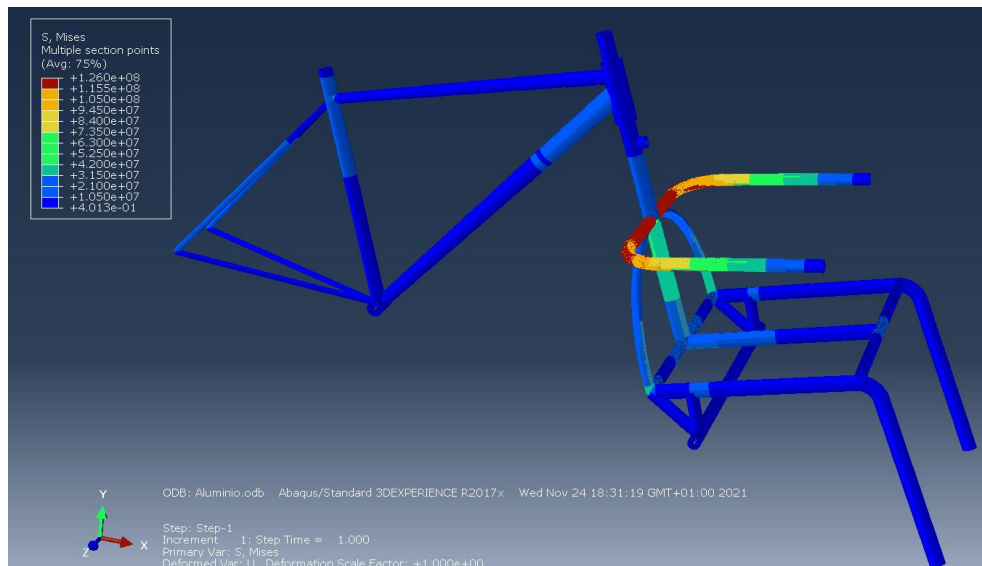


Figura 30. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061.

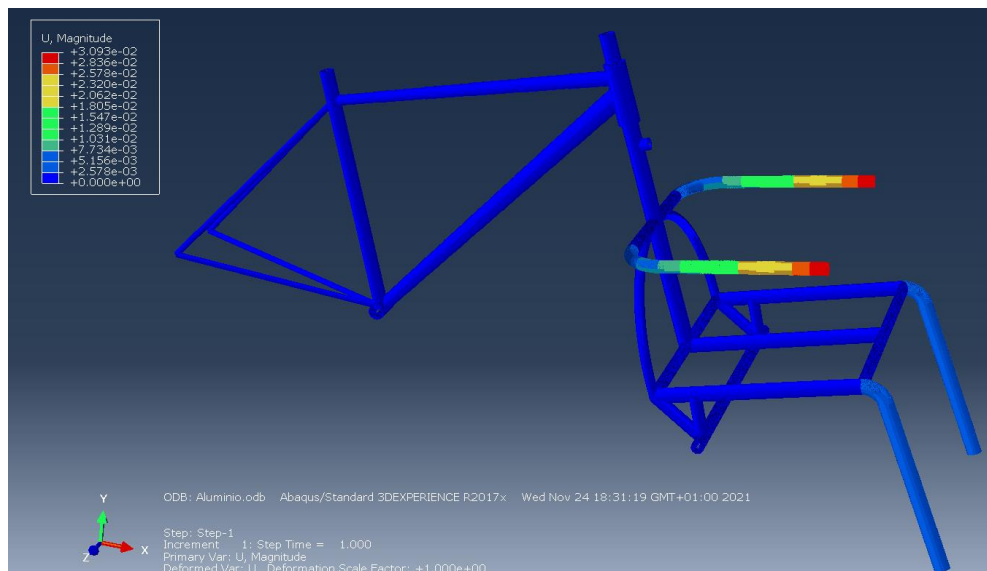


Figura 31. Desplazamientos [m] utilizando aluminio 6061.

	Aluminio 6061	Acero 4130	Fibra de carbono 3K	Titanio
Tensión máxima (MPa)	126,1	122,1	120,9	121,4
Límite de tensión (MPa)	36,16	113,93	976,32	113,48
Desplazamiento máximo (mm)	30,93	10,47	9,41	20,29

Tabla 8. Tensiones y desplazamientos máximos para cada material aplicando la carga sobre el reposabrazos.

Para esta distribución de cargas sobre la estructura se obtienen tensiones mucho mayores al ser una sección mucho menor que trabaja principalmente a torsión y flexión. Será necesario optimizar también esta zona ya sea modificando las propias secciones o agregando a la estructura alguna parte que refuerce dicha unión.

4.1.3. Carga teniendo en cuenta el respaldo.

En este caso se supondrá una situación normal en la que el pasajero se encuentra apoyado sobre el respaldo repartiendo la carga que inicialmente se encontraba en su totalidad sobre el asiento.

Sin embargo, esta situación es menos desfavorable que el caso en el que no se tiene en cuenta el respaldo ya que se están aliviando las tensiones en la unión del asiento al eje principal. Al ser esa zona de unión donde se concentran las tensiones se obtendrán tensiones menores por lo que bastaría con optimizar el diseño para el caso más desfavorable.

4.1.4. Influencia del mallado.

Inicialmente se ha utilizado un mallado no muy fino para aligerar los cálculos sobre la estructura. Sin embargo, hay que comprobar que es lo suficientemente fino como para considerar los resultados válidos. Para ello se reducirá tamaño de elemento hasta obtener variaciones en los resultados menores al 0,1%.

En un primer cálculo se partió de un tamaño de elemento de 15 mm y se irá reduciendo el tamaño hasta los 0,1 mm (106000 elementos generados). Representando gráficamente el error respecto del resultado más fino y preciso en función del tamaño de elemento se obtiene la Figura 32.

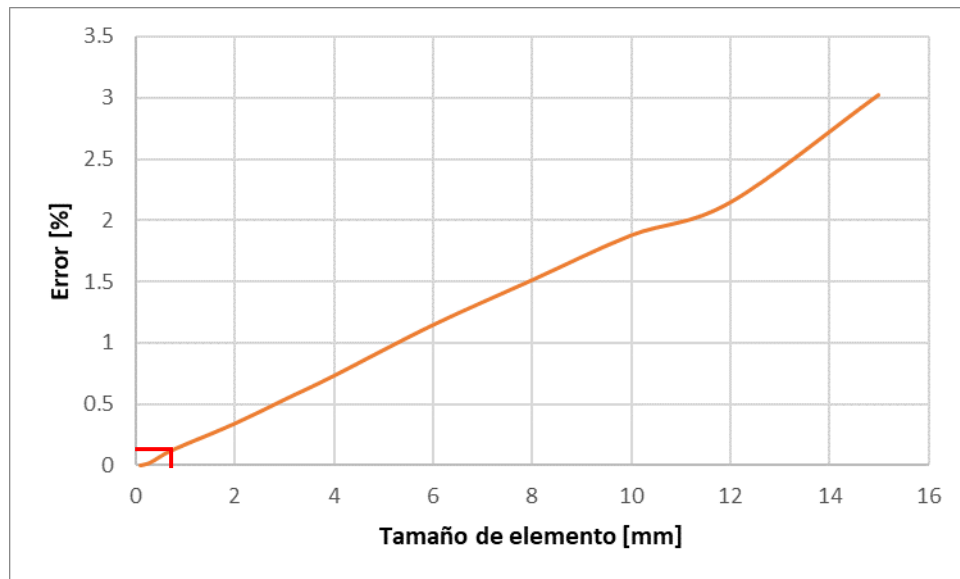


Figura 32. Error relativo en función del tamaño de elemento.

El 0,1% de error relativo respecto del caso más fino y preciso calculado se obtiene para un mallado de 0,71 mm. De ahora en adelante para optimizar las secciones y recalculer las nuevas tensiones y desplazamientos se utilizará un mallado de 0,7 mm.

4.2. Optimización de la estructura.

En los apartados anteriores se ha concluido la necesidad de mejorar la estructura cuando se utiliza aluminio mientras que se puede hacer lo contrario si se utiliza acero, fibra de carbono o titanio para ahorrar material.

4.2.1. Modificaciones sobre la estructura.

En los resultados anteriores se ha identificado una concentración de tensiones tanto sobre la unión de los reposabrazos al eje como en la unión con el asiento. Para mejorar el comportamiento de la estructura en ambas partes se plantea la adición de dos barras, una a cada lado, que unan los reposabrazos con el asiento como sucedería en una silla de ruedas convencional. El cambio propuesto puede apreciarse en la Figura 33.

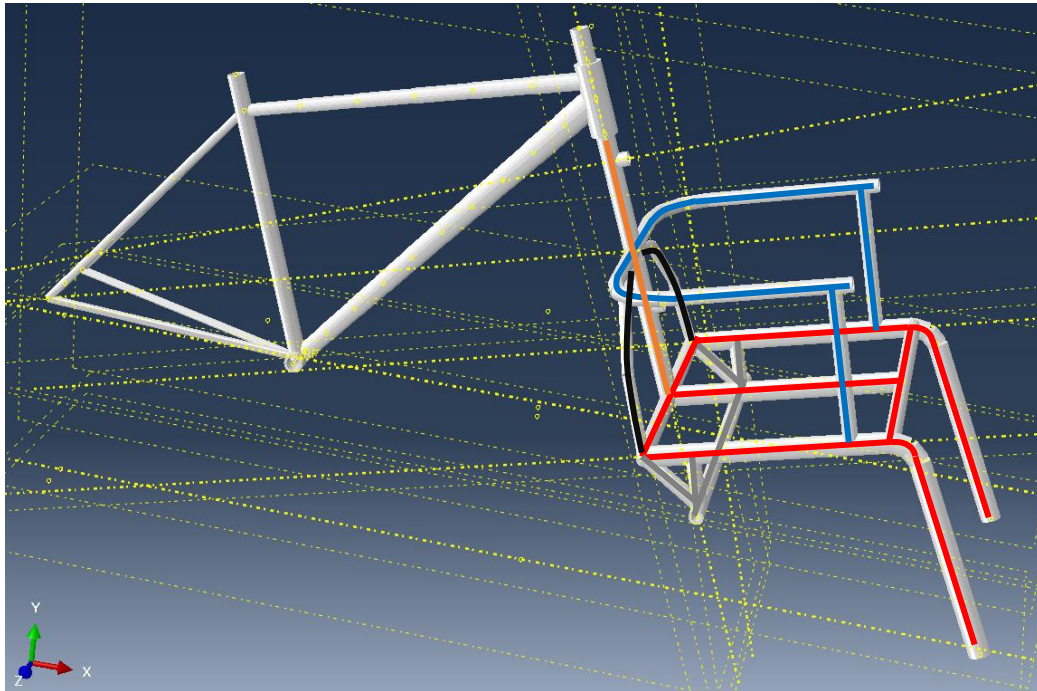


Figura 33. Modificación de la estructura propuesta para reducir la concentración de tensiones.

Utilizando esta modificación y recalculando para todos los materiales manteniendo el resto de los parámetros sin modificar se obtienen resultados por debajo del límite elástico en todos los puntos por lo que el resto de la estructura puede optimizarse para reducir los espesores y por consiguiente el peso.

Es una mejora significativa por lo que también se utilizará para los futuros cálculos con acero, fibra de carbono y titanio.

4.2.2. Modificaciones sobre espesores.

La nueva estructura permite la reducción de espesores y diámetros en la mayoría de las barras que componen el dispositivo ya que tampoco interesa que las tensiones se alejen mucho del límite elástico a costa de aumentar el precio de fabricación.

Para el aluminio que tiene un límite elástico menor los espesores necesarios serán mayores. Para el acero y titanio que tienen un límite elástico parecido se utilizarán los mismos espesores para el cálculo. Por último, para la fibra de carbono, aunque es cierto que su límite elástico es mucho mayor, si se tiene en cuenta su baja resistencia frente a impactos es recomendable no reducir los espesores significativamente utilizándose los mismos que para acero y titanio.

En la Tabla 9 se aprecian los espesores utilizados en cada barra de la estructura del dispositivo delantero. A modo de referencia se utilizarán los colores de la Figura 36.

	Aluminio 6061	Acero 4130, fibra de carbono 3K y titanio
Eje principal (naranja)	6 mm	2 mm
Refuerzos (negro)	2 mm	1 mm
Asiento (rojo)	4 mm	1,5 mm
Reposabrazos (azul)	3 mm	1 mm
Eje de ruedas (gris)	2 mm	1 mm

Tabla 9. Grosor de las diferentes barras del dispositivo diseñado.

El nuevo estado tensional para las cargas planteadas en el apartado 4.1.1. y 4.1.2. se encuentran en las Figuras 34 y 35 respectivamente estando solo representado gráficamente para el caso con aluminio 6061. Se aprecia como, tras las modificaciones, la situación más desfavorable es la de la Figura 37 (carga sobre el asiento) siendo el caso utilizado en la Tabla 10 donde se han plasmado los resultados para todos los materiales incluyendo el peso.

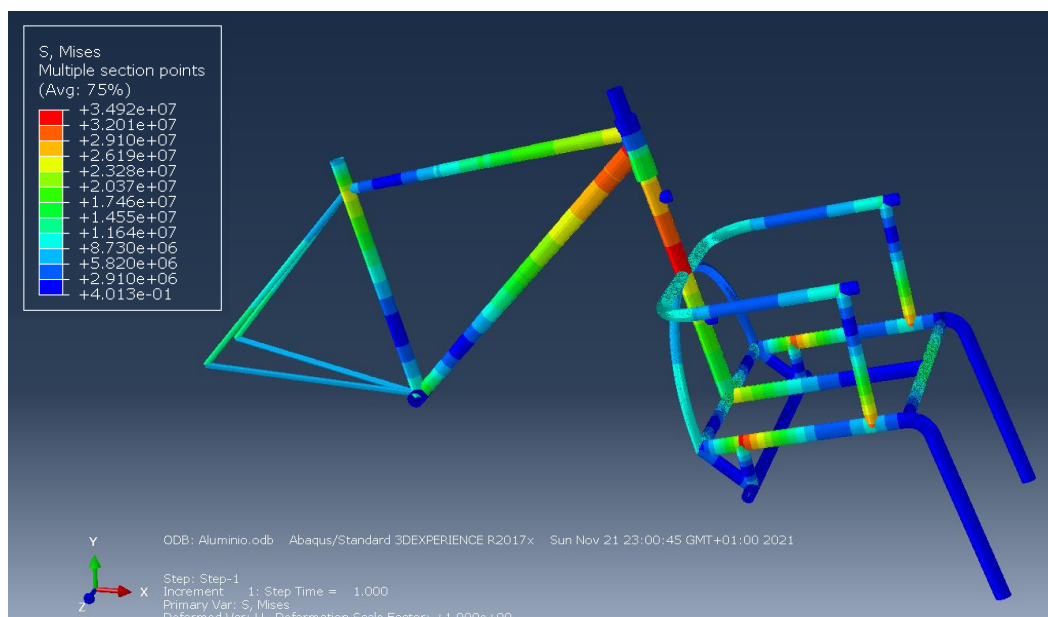


Figura 34. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061 con la distribución de cargas del apartado 4.1.1.

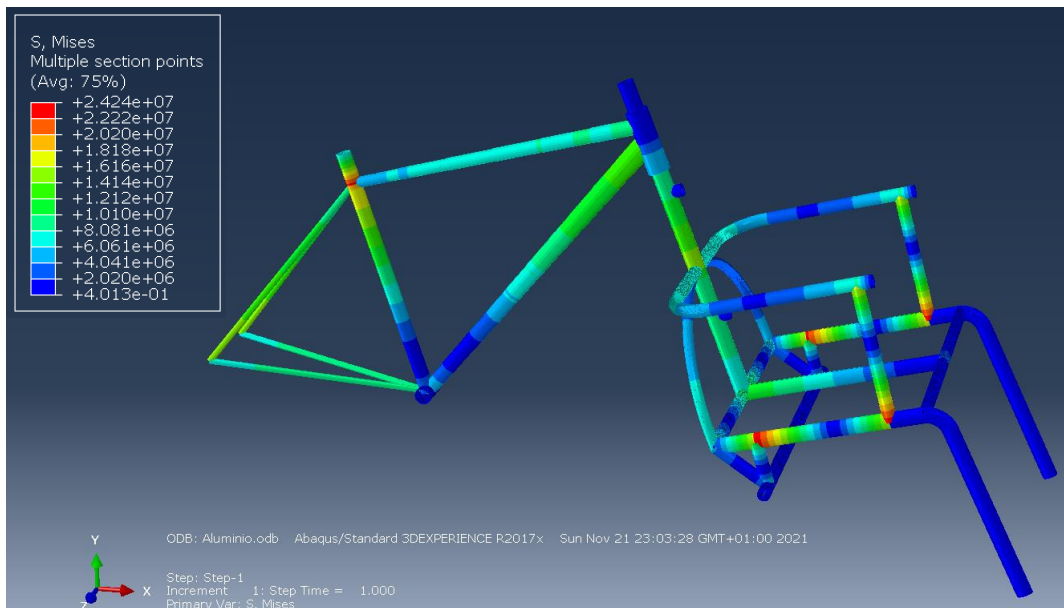


Figura 35. Tensiones [Pa] utilizando aluminio 6061 con la distribución de cargas del apartado 4.1.2.

	Aluminio 6061	Acero 4130	Fibra de carbono 3K	Titanio
Tensión máxima (MPa)	34,92	91,05	88,93	90,00
Límite de tensión (MPa)	36,16	113,93	976,32	113,48
Desplazamiento máximo (mm)	13,8	11,24	10,54	17,28
Peso (kg)	4,76	5,96	1,36	3,43

Tabla 10. Peso, tensiones y desplazamientos máximos del primer prototipo tras optimizarlo.

Tras las modificaciones mencionadas se consigue una estructura que entre dentro de los límites de diseño especificados para todos los materiales.

Sin embargo, como se ha mencionado previamente, este es un primer prototipo que va a servir como base para la generación de un diseño final de mayor calidad y funcionalidad. Utilizando las dimensiones obtenidas en estos cálculos para cada material se generará este segundo diseño en el cual, tras una optimización, se seleccionará el material más adecuado.

5. Mejora del diseño

El diseño presentado en el apartado anterior, aunque es válido y funcional, al intentar llevarlo a la práctica tiene ciertos inconvenientes. Por ello, en este apartado se van a identificar los problemas que puede ocasionar a los usuarios y proponer cambios para que su uso sea más cómodo.

5.1. Problemas del diseño.

Aunque la estructura sea resistente y estable, al acoplarse y ponerse en marcha surgen ciertos problemas que no se habían pensado con anterioridad.

En primer lugar, el ciclista que se encarga de manejar la dirección, al girar, tendrá que aportar fuerza suficiente no solo para mover la dirección sino todo el dispositivo junto con la persona sentada. Esto se debe a que la unión entre el tubo de dirección y la estructura del asiento es rígida, de forma que al actuar sobre el manillar gira todo el conjunto. Esta situación también incomoda al pasajero delantero ya que su cuerpo estaría en continuo movimiento. Por ello, se planteará posteriormente una forma para que la dirección conecte únicamente con las ruedas evitando la rotación de todo el dispositivo.

De la mano con este problema está el hecho de que el acople mediante la sustitución de la horquilla por un nuevo tubo de dirección no es nada rápido y cómodo requiriendo de herramientas para la sustitución. Uno de los objetivos del diseño es que sea un acople rápido y sencillo por lo que se planteará un modelo en el que no sea necesario eliminar la horquilla para realizar el acople. El dispositivo será capaz de anclarse directamente a la horquilla agilizando así el proceso.

Otro inconveniente es que no se había tenido en cuenta su adaptación para pasajeros de distintas edades y por consiguiente, tamaños. Dado que dentro de la asociación "Tandem solidario" hay una gran variedad de jóvenes de varias edades, el asiento tiene que poder adaptarse al usuario. Para ello se realizarán modificaciones en la estructura donde se apoyará el asiento para que pueda acoplarse y desacoplarse una serie de asientos prefabricados de distintas tallas.

También comentar que al estar destinado a pasajeros con algún tipo de discapacidad será necesario incorporar ciertos elementos de seguridad para protegerle. Entre ellos está el cinturón de seguridad para evitar caídas y sujeciones para piernas y cabeza.

Por último, como hay un pasajero que no aporta potencia pedaleando, será necesario incorporar un sistema de tracción eléctrica al vehículo. Este cambio es relativamente sencillo ya que hay fabricantes que venden ruedas con tracción eléctrica ya incluida y solo sería necesario incorporar el controlador al manillar.

Para realizar algunas de estas modificaciones me basaré en un modelo ya existente de triciclo de la marca "etnnic" [17]. Este triciclo dispone de un sistema de dirección independiente de la estructura permitiendo girar únicamente las ruedas. Puede apreciarse su funcionamiento y estructura en las Figuras 36 y 37



Figura 36. Sistema de dirección y estructura del triciclo de "etnnic" [17].



Figura 37. Zoom al sistema de dirección del triciclo de "etnnic" [17].

Como puede apreciarse, el tubo de dirección está unido a tubos que se encargan del giro de la rueda mientras que sobre las ruedas hay un eje horizontal que se encarga de soportar el peso. El diseño que se planteará se basará en un sistema parecido en el que la horquilla se acoplará a un sistema de dirección similar mientras que la estructura se apoya sobre el eje horizontal que une ambas ruedas.

5.2. Modificaciones sobre la estructura.

En primer lugar, se parte de una estructura convencional con la horquilla incorporada. La estructura que se genere será sencilla ya que el objetivo de este análisis es saber si la esta resistirá a las cargas aplicadas y no tanto el funcionamiento específico de cada parte. Por ello, partiendo de la Figura 38 y teniendo en cuenta a la altura a la que debe estar el eje de las ruedas dado su diámetro, se llega a la Figura 39 incluyendo el eje y la unión.

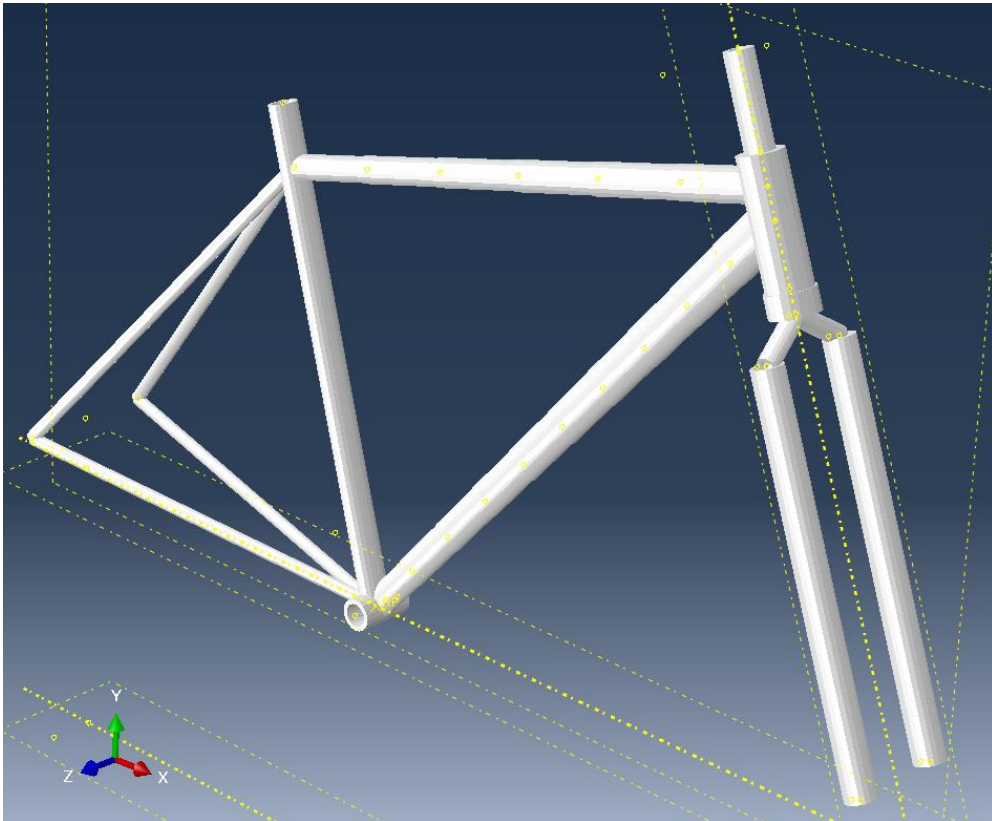


Figura 38. Estructura de partida de una bici de montaña convencional incluyendo la horquilla.

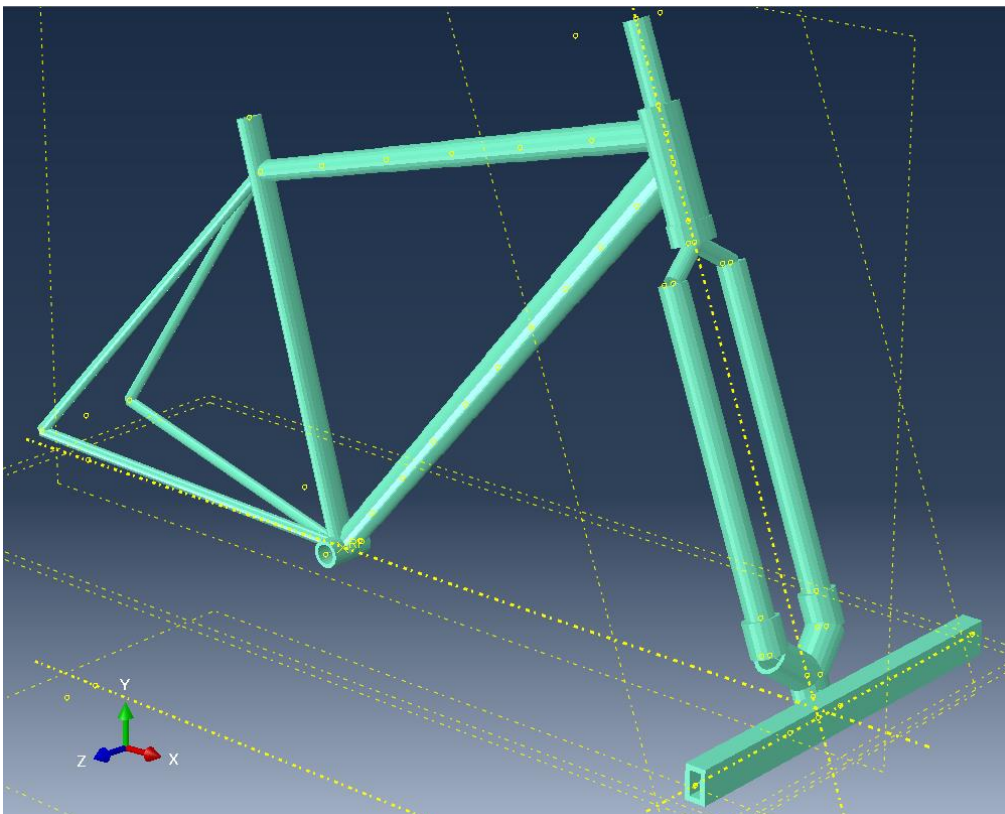


Figura 39. Estructura con la unión y viga de carga incluidos.

Sobre la viga de la Figura 39 se incorporará un diseño similar al anterior con ciertas modificaciones para adaptarse a los cambios.

- Al no ser necesario un tubo vertical que pase por el medio, el cual se utilizaba antes como tubo de dirección, se elimina quedando uno a cada lado.
- Para que la horquilla no se encargue de soportar cargas al pertenecer a un modelo convencional se incorporarán barras donde se colocarán dos ruedas delanteras extra.
- Se han incorporado Barras a la altura de la cabeza para incluir un reposacabezas regulable.
- Como se ha comentado previamente, la idea es utilizar asientos prefabricados de distintas tallas los cuales tienen cierta redondez. Dicha barra horizontal en el medio impediría el acoplamiento de uno de estos asientos por lo que se ha eliminado del diseño.

El resto de los elementos cumple con las dimensiones relativas a sillas de ruedas convencionales como se ha explicado en el diseño anterior. El resultado se aprecia en las Figuras 40 y 41 con un mayor parecido a una silla de ruedas.

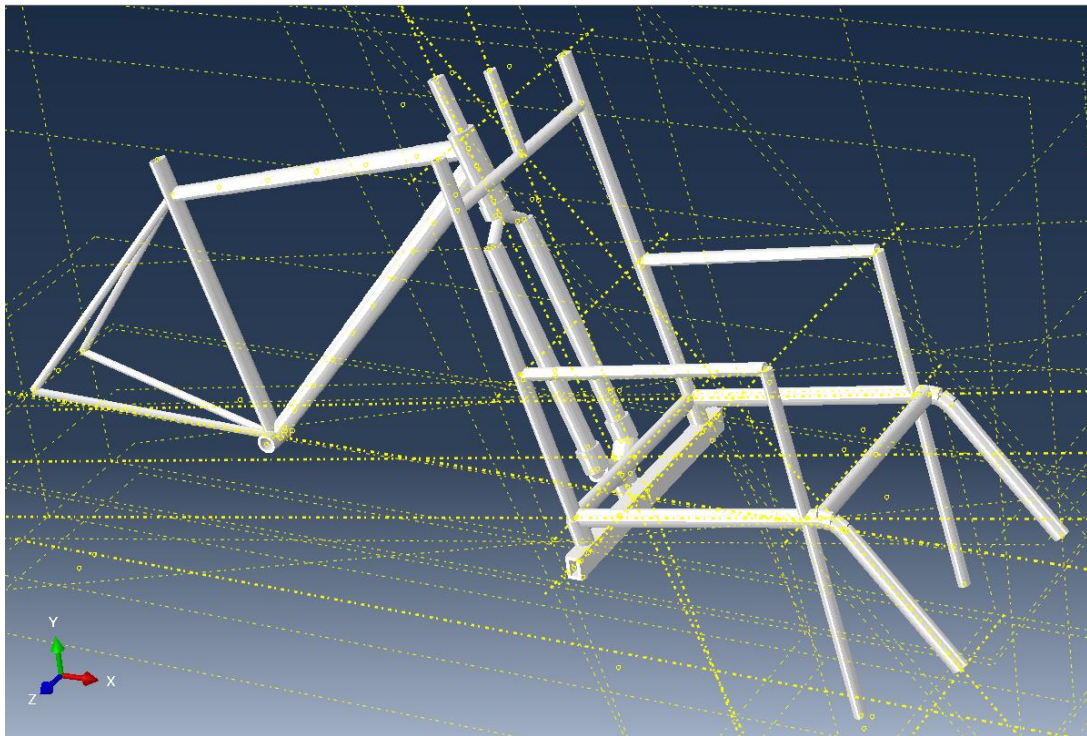


Figura 40. Nuevo diseño tras incorporar el resto de los elementos estructurales (Vista 1).

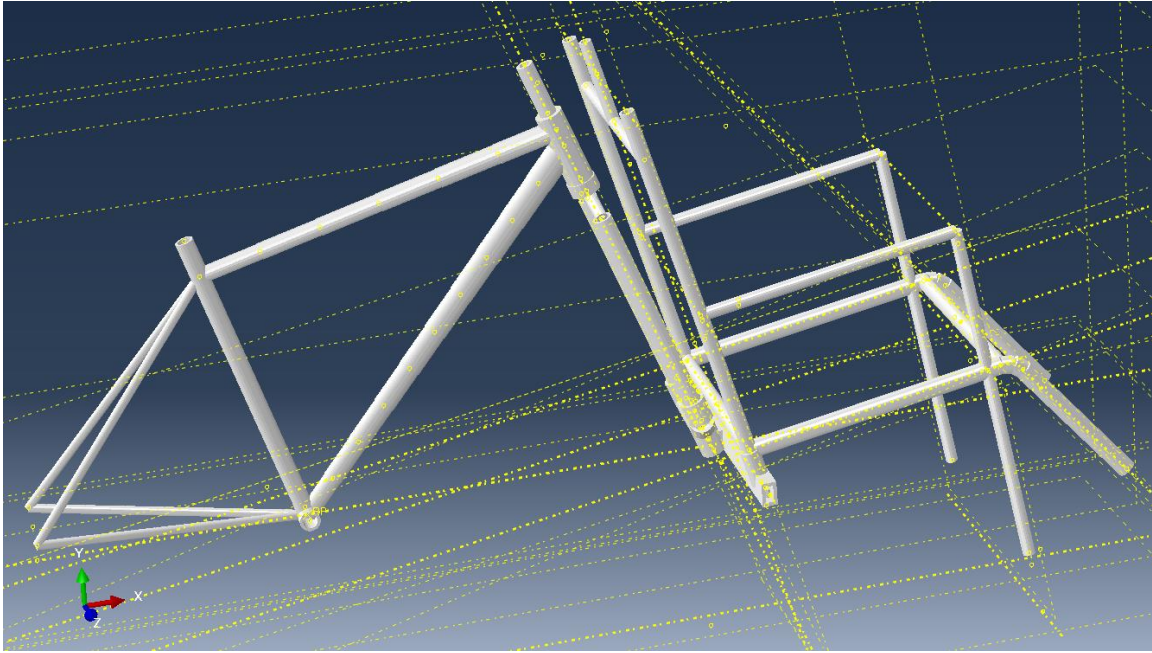


Figura 41. Nuevo diseño tras incorporar el resto de los elementos estructurales (Vista 2).

Con esto se solucionan la mayoría de los problemas mencionados al inicio del apartado 5.1. quedando los elementos de seguridad y la tracción eléctrica. De esta forma será necesario incorporar un cinturón de seguridad de cuerpo completo además de sujeciones para la cabeza y piernas por si fuese necesario.

El cinturón de seguridad será un elemento que no esté fijo en la estructura del estilo que se muestra en la Figura 42 [18] vendido por fabricantes de varios modelos pudiendo utilizarse o no en función de las necesidades del pasajero por lo que no será necesario realizar cambios en la estructura para su incorporación.



Figura 42. Cinturón de seguridad para el pasajero delantero [18].

En cuanto a las sujeciones de la cabeza, como se ha incorporado una zona para el reposacabezas, este incorporará un pequeño cinturón estilo arnés de cabeza no viéndose modificada la estructura.

Para las piernas se utilizará una sujeción similar como se aprecia en la Figura 43 [19]. Éstas van montadas directamente sobre la barra sin necesidad de incorporar o modificar elementos estructurales.



Figura 43. Sujeción de las piernas mediante arnés [19].

Por último, comentar que existen empresas que se encargan de fabricar kits que se acoplan a ruedas de bici que incorporan un motor eléctrico además de los dispositivos encargados del control. Estos vienen con una rueda incorporada en el kit, pero si son de las mismas dimensiones puede que no sea necesario cambiarla dependiendo del modelo que se parta. Solo será necesario montar el dispositivo en la rueda (o cambiar la rueda) e incorporar en el manillar el dispositivo regulador que ya viene pensado de fábrica para su unión.

éste apoyado únicamente en uno de sus extremos. De nuevo, como parámetro de diseño el peso del pasajero delantero se considera de un máximo de 120 kg.

Puede apreciarse en la Tabla 11 las tensiones y desplazamientos máximos obtenidos para los distintos estados de carga mencionados y materiales utilizados. Las dimensiones de las secciones para el acero, fibra y titanio son las mismas por lo que las tensiones serán muy parecidas.

	Carga sobre el asiento	Carga sobre el reposabrazos	Carga sobre respaldo y asiento
Tensión máxima aluminio 6061 (MPa)	19,65	21,70	23,76
Desplazamiento máximo aluminio 6061 (mm)	3,17	2,38	4,42
Tensión máxima acero 4130 (MPa)	61,32	54,70	51,33
Desplazamiento máximo acero 4130 (mm)	3,21	2,49	4,40
Tensión máxima fibra 3K (MPa)	59,96	54,17	52,61
Desplazamiento máximo fibra 3K (mm)	3,00	2,35	4,15
Tensión máxima titanio (MPa)	62,62	53,93	46,62
Desplazamiento máximo titanio (mm)	5,08	3,41	6,7

Tabla 11. Tensiones y desplazamientos máximos para para cada estado de carga con el nuevo dispositivo de aluminio 6061.

Al haber utilizado como referencia los espesores optimizados del prototipo anterior y haber incluido dos apoyos extra (las dos ruedas delanteras) las tensiones en ningún caso se acercan a la tensión límite especificada en la Tabla 6. Por ello, es posible una reducción de espesores y/o diámetros en la mayoría de las secciones para ahorrar material sin perder seguridad estructural.

En la Tabla 12 se muestran los grosores utilizados en la estructura tras realizar sucesivos cálculos hasta obtener una distribución de tensiones adecuada para cada material. Como se ha explicado en el diseño del primer prototipo, las dimensiones utilizadas para el acero, fibra de carbono y titanio son las mismas. Cada barra se identifica claramente en la Figura 45. Las distribuciones de tensiones y desplazamientos obtenidas para los tres estados de carga se encuentran en las figuras 46-51 exclusivamente para el aluminio.

En las dimensiones que solo aparece un número en la Tabla 12 es porque son circulares refiriéndose al diámetro, en las que hay un producto es porque son rectangulares (alto x largo) y en las que hay una barra separando dos valores es porque son elípticas (diámetro mayor / diámetro menor).

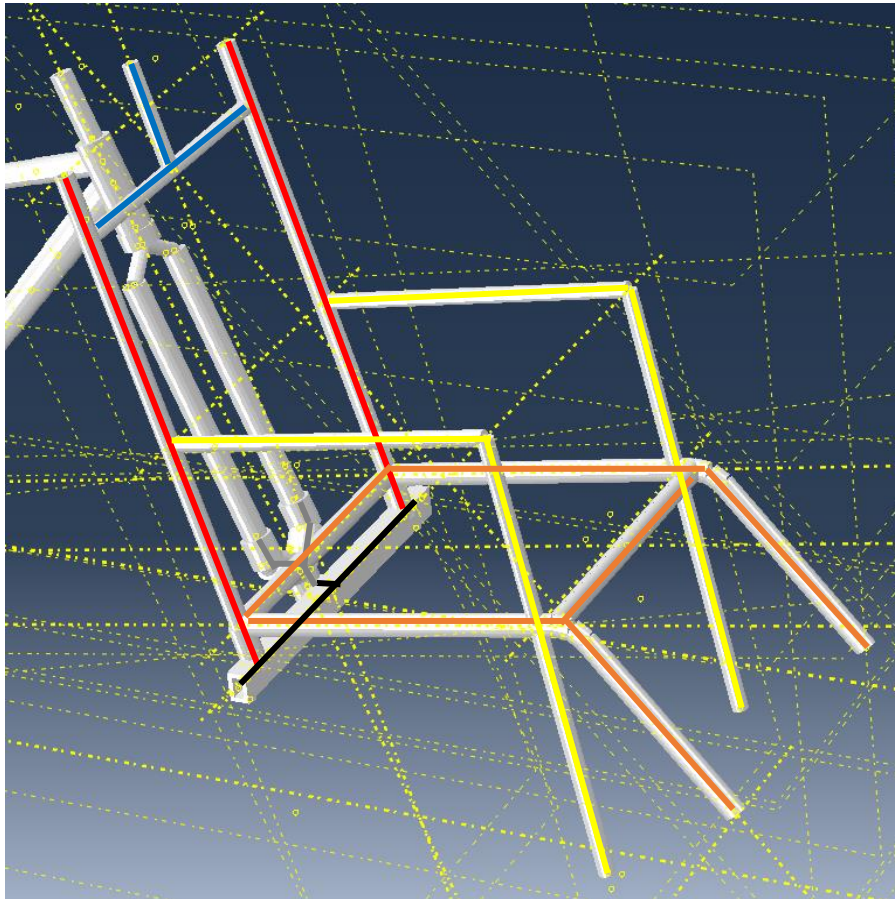


Figura 45. Barras del dispositivo con misma sección divididas por colores.

	Aluminio 6061		Acero, fibra y titanio	
	Dimensiones (mm)	Grosor (mm)	Dimensiones (mm)	Grosor (mm)
Respaldo (rojo)	12	2	11	0,8
Reposacabezas (azul)	10	1,5	8,5	1
Asiento (naranja)	13,5 / 9	2	10 / 6,7	0,9
Reposabrazos (amarillo)	10	1,5	8,5	1
Viga soporte (negro)	36 x 23	2	21 x 3	0,9
Unión horquilla (gris)	18	2	16,7	0,7

Tabla 12. Grosor de las diferentes barras del dispositivo diseñado.

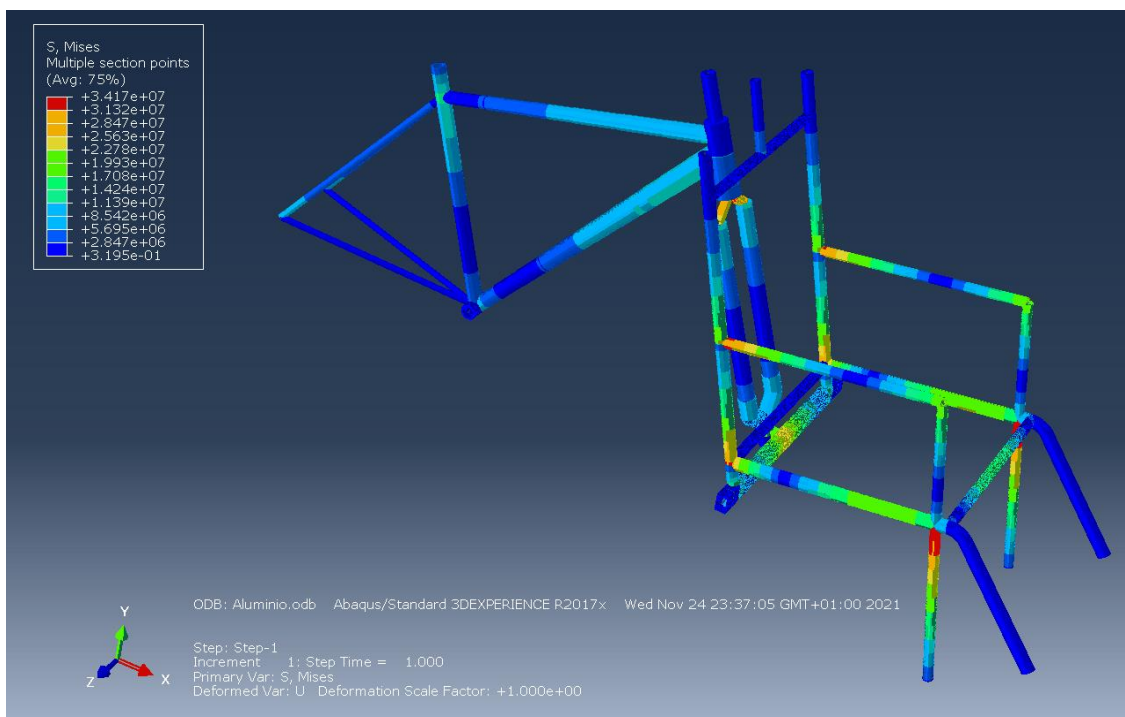


Figura 46. Distribución de tensiones [Pa] para el caso con carga distribuida entre el asiento y el respaldo con aluminio 6061.

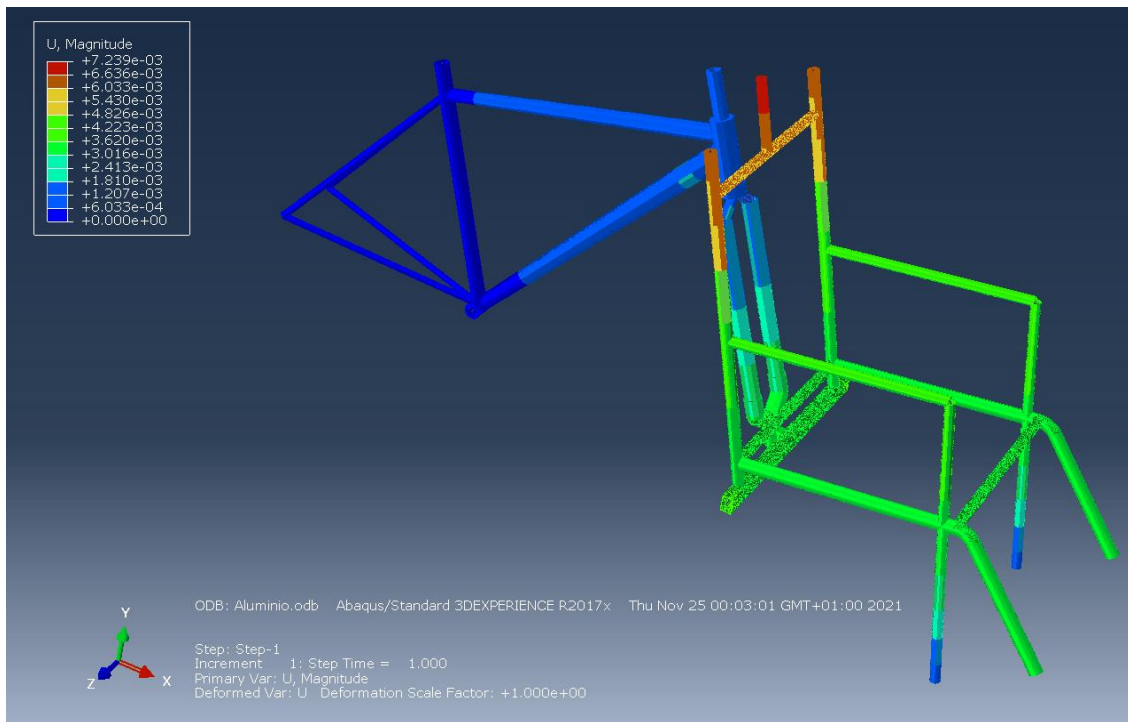


Figura 47. Distribución desplazamientos [m] para el caso con carga distribuida entre el asiento y el respaldo con aluminio 6061.

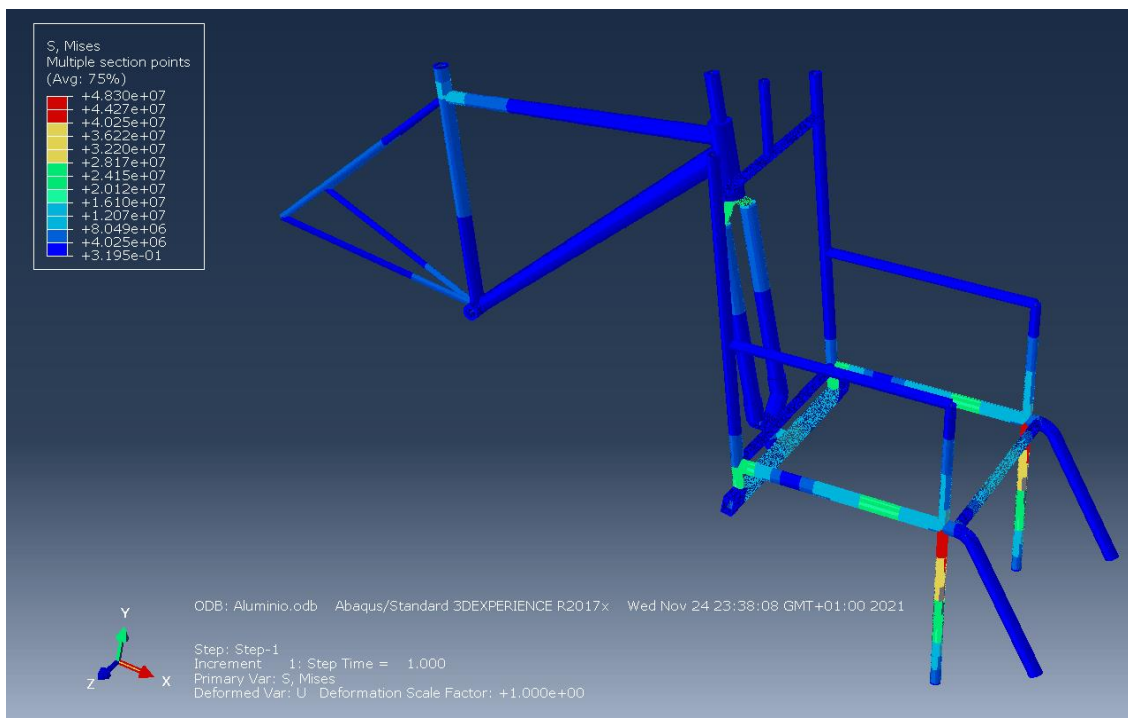


Figura 48. Distribución de tensiones [Pa] para el caso con toda la carga sobre el asiento con aluminio 6061.

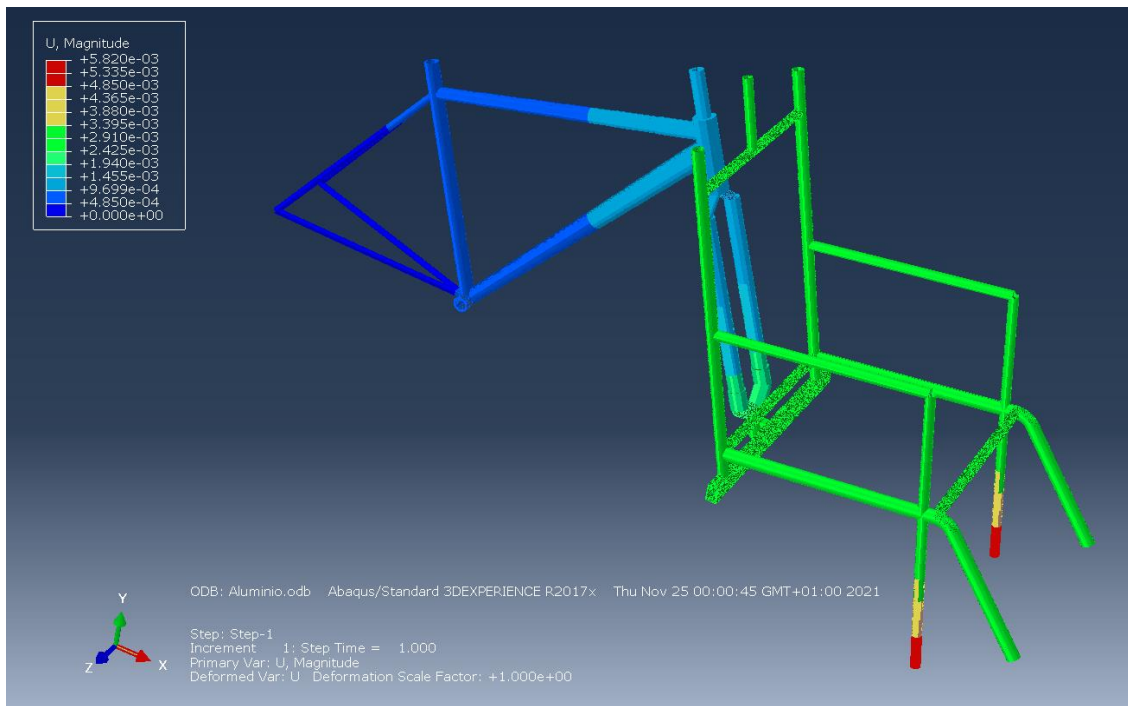


Figura 49. Distribución de desplazamientos [m] para el caso con toda la carga sobre el asiento con aluminio 6061.

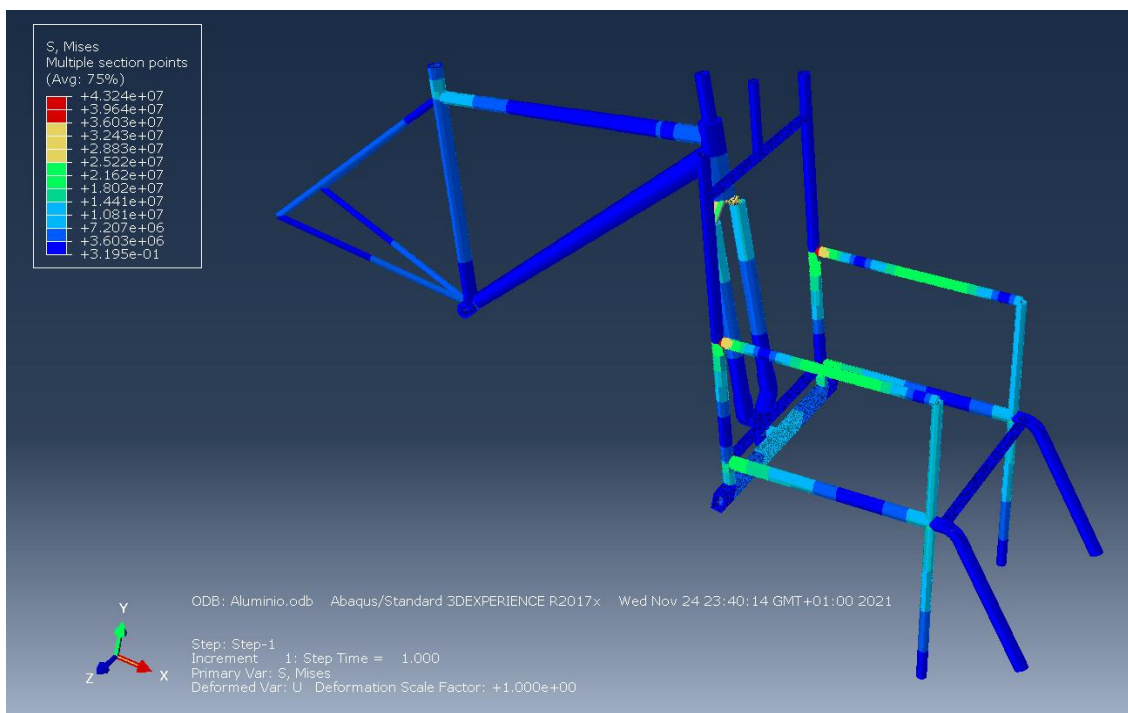


Figura 50. Distribución de tensiones [Pa] para el caso con la carga sobre el reposabrazos con aluminio 6061.

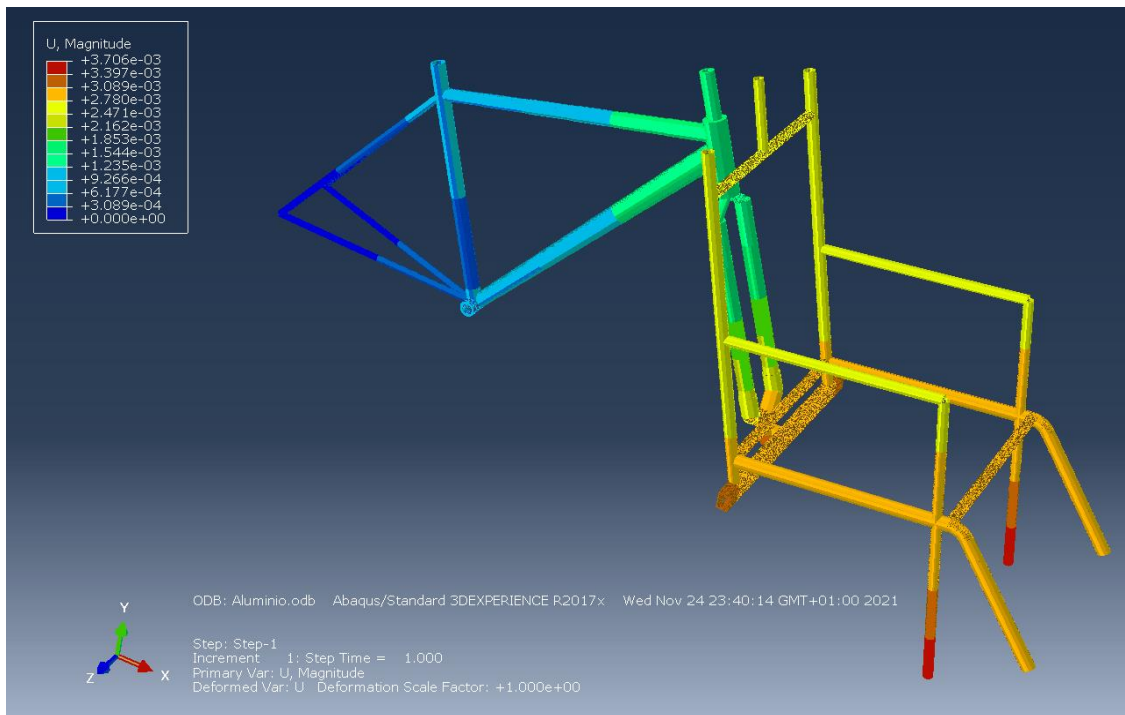


Figura 51. Distribución de desplazamientos [m] para el caso con la carga sobre el reposabrazos con aluminio 6061.

Para el resto de los materiales, al ser las distribuciones visualmente similares, se muestran únicamente los valores máximos para la situación de carga más desfavorable en la Tabla 13 junto con su límite marcado.

	Aluminio 6061	Acero 4130	Fibra de carbono 3K	Titanio
Tensión máxima (MPa)	34,17	113,50	111,10	112,30
Límite de tensión (MPa)	36,16	113,93	976,32	113,48
Desplazamiento máximo (mm)	7,24	6,90	6,49	10,35
Peso (kg)	4,54	4,93	1,12	2,83

Tabla 13. Peso, tensiones y desplazamientos máximos del segundo diseño tras optimizarlo.

Con este segundo diseño ya optimizado se presenta un croquis en el que se incluyen las dimensiones de cada barra del dispositivo. Como las secciones ya han sido definidas, el croquis quedará representado únicamente mediante barras 1D con todos los valores en cm.

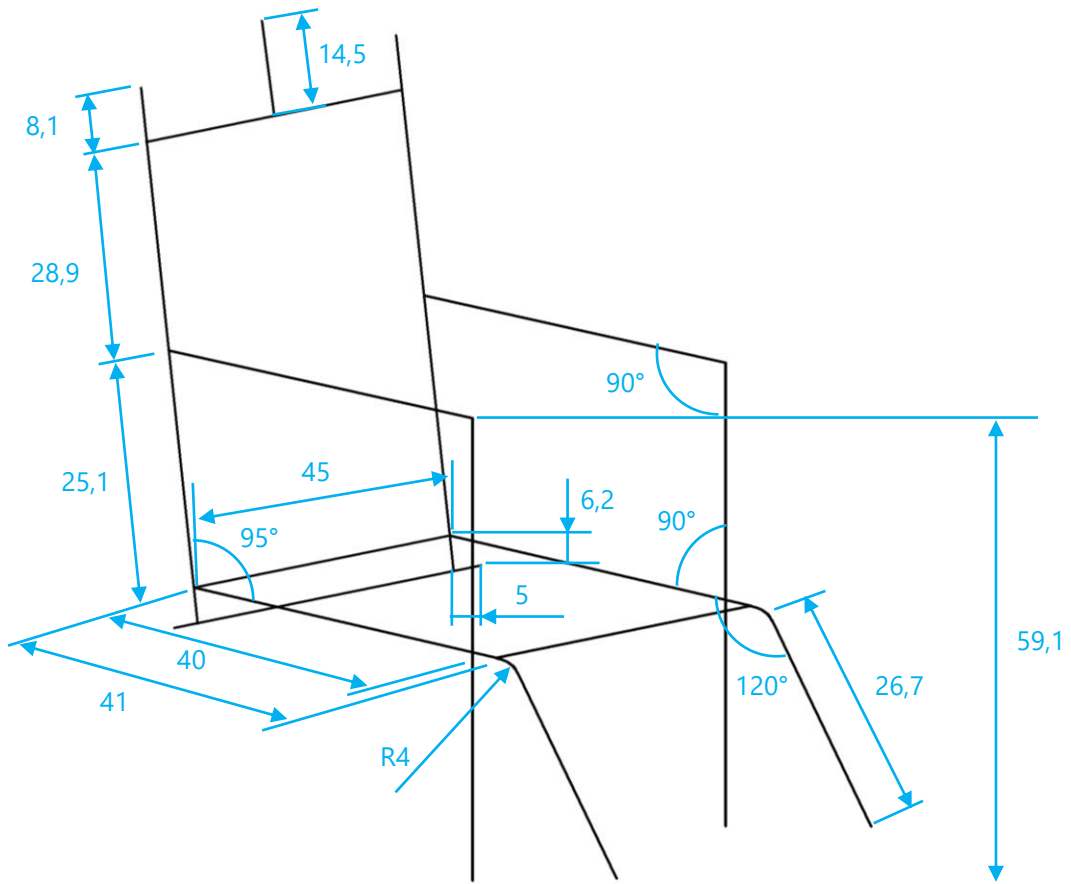


Figura 52. Croquis con las dimensiones de cada barra [cm] del segundo diseño tras la optimización.

6. Conclusiones

En apartados anteriores se han realizado los cálculos sobre dos diseños diferentes siendo el último una mejora del primero. Sin embargo, aún queda evaluar en conjunto todos los resultados para obtener unas conclusiones generales.

6.1. Selección de material.

De los resultados obtenidos en tensiones y desplazamientos y aplicando los criterios de selección del apartado 2.5.4 puede identificarse cuál es la mejor opción para su fabricación. Es interesante tener nociones sobre los costes de materiales y fabricación de la estructura. Para aproximar este coste se tendrá en cuenta tanto el precio del material como el de manufactura del dispositivo, viéndose afectado por la complejidad de fabricación. En la Tabla 11 se muestra información relevante para una selección idónea del material.

Tanto desde el punto de vista mecánico como de ligereza el ganador sin duda es la fibra de carbono. Sin embargo, la finalidad de este dispositivo no es entrar al mercado como un producto de gama alta estando destinado al uso para la asociación "Tandem solidario" siendo suficiente un material más económico.

El titanio, al tener un módulo elástico menor, sufre deformaciones mayores y no ofrece mejoras significativas en peso. Dado que es un material también caro no merece la pena utilizarlo.

Por último, entre el acero y el aluminio destaca que, aunque este último es menos denso, la necesidad de secciones y diámetros mayores aumenta el peso hasta tener valores similares. Los precios de materia prima y fabricación no se diferencian en gran medida.

	Aluminio 6061	Acero 4130	Fibra de carbono 3K	Titanio
Coefficiente de seguridad real	4,23	4,02	35,15	4,04
Peso total (kg)	4,54	4,93	1,12	2,83
Desplazamientos (mm)	7,24	6,9	6,49	10,35
Coste de materia prima (€/kg)	~6	~5	~100	~200
Costes de fabricación	Muy bajos	Bajos	Altos	Medios
Inconvenientes	Debilidad	Se oxida	Fracturable	Difícil de soldar
Ventajas	Ligereza	Durabilidad	Resistencia y calidad	Elevada durabilidad

Tabla 11. Factores relevantes a la hora de seleccionar un material adecuado.

Se puede concluir tras analizar todos los parámetros relevantes que, en caso de disponer de fondos suficientes y de buscar un producto de calidad y fiable, el material a utilizar para su fabricación será una fibra de carbono de 3000 filamentos. Por otro lado, si se quiere ahorrar en la estructura para poder destinar más fondos al resto de elementos no pertenecientes a la estructura se seleccionaría el aluminio. Sería necesario un futuro análisis en el que se incluyan el resto de los elementos del dispositivo hasta su fabricación final para valorar en que invertir más dinero.

6.2. Evaluación general del proyecto.

Como conclusión del proyecto cabe comentar que el objetivo principal del diseño se ha cumplido satisfactoriamente. Para ello ha sido necesaria la creación de más de un prototipo de los que ha habido que identificar fallos a corregir, pero siempre eso es parte del diseño estructural.

De esta forma, resaltar que alcanzar un diseño perfecto con solo dos prototipos en un tiempo algo limitado es complicado, por lo que siempre va a

haber hueco para la mejora. Un mismo objetivo es alcanzable a través de diferentes caminos y decisiones y es un factor que siempre hay que tener en cuenta en el diseño dentro del mundo de la ingeniería. Sin embargo, siguiendo un procedimiento y unos criterios firmes, con el objetivo siempre en mente para alcanzar la máxima funcionalidad y comodidad posible, se ha alcanzado el dispositivo mostrado al final del proyecto.

El reto principal en este diseño ha sido como realizar la unión entre ambas partes para que el manejo sea cómodo y funcional. Una horquilla de bicicleta convencional no está preparada para soportar el peso de un pasajero delantero por lo que ha sido necesario pensar formas de evitar colocar cargas sobre la horquilla permitiendo un buen manejo de la dirección. Además, aunque el objetivo ha estado muy enfocado en el disfrute del pasajero delantero, no podemos olvidarnos del ciclista que se encarga de aportar potencia. Combinar todos estos requisitos ha supuesto un reto mayor de lo esperado.

Por otro lado, comentar que, aunque este proyecto se basa en el diseño y cálculo estructural, ha sido necesario tener en mente en todo momento el funcionamiento en conjunto con elementos no estructurales para que en un futuro pueda fabricarse el dispositivo de forma satisfactoria. Aunque son aspectos no muy visibles dentro de los resultados, se ha valorado en todo momento tanto las dimensiones como la geometría enfocándola siempre de forma que el resto de los elementos se puedan incorporar de forma sencilla en un futuro.

Durante la carrera ya había utilizado tanto este software como otros destinados al análisis de elementos finitos, pero de forma mucho más simple. El hecho de aprender a manejar este tipo de software y metodología también ha supuesto un reto interesante y de importancia para el futuro.

Por todo lo anterior, este proyecto no solo ha cumplido con el objetivo marcado inicialmente, sino que también ha servido para mejorar personalmente y de forma didáctica. Cosas como esta no se enseñan durante la carrera y es una experiencia muy buena el haber podido trabajar en este proyecto tan bonito tanto con "Tandem solidario" siendo algo que recordaré en un futuro.

7. Líneas futuras

Este proyecto se ha desarrollado bajo el objetivo de diseñar y analizar la estructura de un dispositivo acoplable a una bicicleta convencional. Sin embargo, para "Tandem solidario" este es un objetivo intermedio y necesario del que partir para proceder a su fabricación hasta obtener el dispositivo de forma funcional. Para poder continuar y aprovechar este proyecto hasta dicho punto será necesario marcar una serie de líneas futuras que habrá que tener en cuenta.

- En primer lugar, comentar que el análisis se ha realizado para una situación estática por lo que no se han tenido en cuenta los elementos móviles que incluye. Habría que utilizar las cargas a las que se ven sometidos los ejes móviles como el que permite el giro de la dirección o las ruedas para seleccionar elementos como rodamientos o uniones entre dichos ejes móviles para que soporten dichas cargas.
- Por otro lado, habría que seleccionar tanto de un catálogo de fabricantes como un pedido a medida de los diferentes elementos que van sobre la estructura como el propio asiento, respaldo y reposabrazos. La estructura está diseñada con dimensiones estándar por lo que no será difícil incorporar dichas partes. Sin embargo, habría que estudiar cómo unir dichos elementos a la estructura para realizar ligeras modificaciones sobre las barras como agujeros para permitir dicha unión.
- También sería necesario fabricar el sistema de dirección y suspensión del dispositivo. Se ha mencionado en el apartado 5 cómo debería ser dicho sistema de giro basado en el triciclo de "etnnic" pero habría que diseñarlo e incorporarlo para las dimensiones de la estructura.

De esta forma, una vez realizados estudios de cómo incorporar el resto de los elementos a la estructura podría darse paso a la fabricación y ensamblaje de las partes.

Bibliografía

1. De La Rosa, B. (29 de Octubre de 2016). *Cicloturismo adaptado: Cómo viajar en bicicleta adaptada*. Obtenido de Cien mil pedaladas sitio web: <https://cienmilpedaladas.com/2016/10/29/cicloturismo-adaptado-como-viajar-en-bicicleta-adaptada/>
2. Fundación Mría José Jove. (2017). *Préstamo de bicicletas adaptadas*. Obtenido de Fundación María José Jove sitio web: <https://www.fundacionmariajosejove.org/prestamo-de-bicicletas-adaptadas-invierno-2017-2018/>
3. TriciMad. *Distribuidor de Bicicletas y triciclos*. Obtenido de Tricimad sitio web: <https://www.tricimad.com/>
4. TriciMad. *Modelo Opair*. Obtenido de TriciMad sitio web: <https://www.tricimad.com/transporte/opair/>
5. StrgaL. *Bli-Ve Ciclo*. Obtenido de StrgaL sitio web: <https://strgal.es/blog/blive-ciclo>
6. MundoBici. (23 de Mayo de 2019). *¿Qué es el recorrido de la suspensión y cómo elegir la medida correcta para tu MTB?* Obtenido de MundoBici sitio web: <https://www.mundobici.co/blog/recorrido-de-suspension-mtb/>
7. EMEB- Escuela Mecánica de Bicicletas. (13 de Diciembre de 2015). *Tipos y medidas de direcciones de bicicleta*. Obtenido de EMEB sitio web: <https://www.emeb.es/direcciones-tipos-y-medidas/>
8. Conorbikes. *CONOR 6700 29"*. Obtenido de Conorbikes sitio web: <https://conorbikes.com/es/conor-aluminio/1417-4136-conor-6700-29-8424065740701.html#/33-color-rojo/48-talla-la>
9. Alibaba. *Tube de 23 mm en aluminio 6061, marco de bicicleta*. Obtenido de Alibaba sitio web: https://spanish.alibaba.com/product-detail/23-mm-diamtre-tube-en-aluminium-aluminum-6061-bike-frame-1600221885235.html?spm=a2700.7724857.topad_classic.d_image.7e19388801oXQF

10. Labrador, I. (2017). *Guía definitiva de cuadros de bicicleta; ¿Qué material es mejor?* Obtenido de Tuvalum sitio web: <https://tuvalum.com/blog/guia-materiales-cuadros-bicicleta/>
11. MatWeb. *AISI 4130 Steel*. Obtenido de MatWeb sitio web: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=666dfca4fbc74e669b771f35d70a0796>
12. MatWeb. *Aluminium 6061-T4*. Obtenido de MatWeb sitio web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d5ea75577b1b49e8ad03caf007db5ba8>
13. MatWeb. *Hexcel HexTow AS4 3K Standard Modulus Carbon Fiber (3000 Filaments)*. Obtenido de MatWeb sitio web: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fbe3f396c3354c9da5661a8e110ff8f5>
14. CDM Titanium Industri Co. *Titanio comercialmente puro*. Obtenido de CDM sitio web: <https://www.ticdm.es/titanio-y-sus-aleaciones/titanio-puro/>
15. JAHM Software. *MPDB Software*. Obtenido de JAHM sitio web: https://www.jahm.com/about_mpdb.html
16. Dassault Systèmes. *Abaqus Unified FEA*. Obtenido de Dassault Systèmes sitio web: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>
17. Etnnic. *Triciclos para adultos*. Obtenido de Etnnic sitio web: <https://etnnic.com/>
18. Obbocare. *Cinturón sujeción tronco y pelvis*. Obtenido de Obbocare sitio web: https://www.obbocare.com/producto/cinturon-sujecion-de-tronco-y-pelvis/?attribute_tallas=1&gclid=CjwKCAiA4veMBhAMEiwAU4XRr3MVzfsyznUKDcKthYhIITs3nZM75P4ep6FVljOdZKUWmpJ3H5nKIBoC_8QAvD_BwE
19. Ortotex Medical. *Arnés de tobillo*. Obtenido de Ortotex sitio web: <https://ortotexmedical.com/producto/arnes-de-tobillo/>
20. Bicicletas eléctricas. (s.f.). *Hiram Kit de conversión de bicicleta eléctrica*. Obtenido de Bicicletas eléctricas sitio web: https://www.amazon.es/HIRAM-Conversion-Bicicleta-Conversion-Controlador/dp/B086PT6RLB/ref=asc_df_B086PT6RLB/?tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=420348721086&hvpos=&hvnetw=g&hvrand=17

