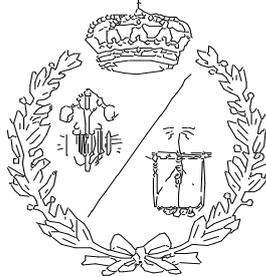


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Diseño, análisis cinemático, dinámico y
resistente, y comparación de dos cuadros de
bicicleta
(Design, analysis and comparison between two
bike frames)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Juan José Velasco Hervás

Junio-2020

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis profesores, tanto de la Universidad de Cantabria como los de la Universidad de Sevilla, en la que realicé la primera mitad de la carrera, que me han ido enseñando el bonito mundo de la ingeniería. Gracias a ellos por instruirme, por ayudarme a conocer mis gustos y preferencias, por enseñarme a trabajar con programas muy útiles, como los que se utilizan en este trabajo de diseño de piezas, y gracias por el trato recibido.

Gracias a mi familia por ayudarme y apoyarme en los momentos más difíciles, por sacarme fuerzas y motivación en los momentos de bajón, por ser mi apoyo diario y por la confianza que muestran en mí. En especial a mi padre y mi madre, gracias por la educación que me habéis dado y por convertirme en la persona que soy ahora, y a mis hermanas por subirme la autoestima especialmente en la elaboración de este trabajo.

Gracias a mis compañeros y amigos de ambas universidades que me han hecho esta etapa universitaria más amena, y con los que he compartido momentos de sufrimiento en épocas de exámenes y también muchas alegrías.

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado ha consistido en realizar un estudio acerca de las bicicletas de montaña, centrándose principalmente en la comparación entre el comportamiento de un cuadro de bicicleta con suspensión trasera y otro sin ella. Para ello se ha simulado el comportamiento de la suspensión trasera mediante el software de Autodesk Inventor aplicando diferentes fuerzas hasta obtener un comportamiento adecuado.

En la primera parte del trabajo se estudian los antecedentes de la bicicleta de montaña, los distintos materiales con los que puede fabricarse el cuadro, las distintas partes de las que se compone, relacionándolo con conceptos aprendidos en diferentes asignaturas a lo largo de la carrera, para tener un estudio previo con el que diseñar el cuadro.

Por último, se describe el proceso del diseño de ambos cuadros, así como el de la suspensión realizado en Inventor, para su posterior análisis mediante el método de elementos finitos. El análisis se centra en los requisitos de seguridad que dicta la normativa y se realiza una posterior comparación de los resultados obtenidos.

Abstract

This final degree project it consisted of conducting a study about mountain bikes mostly focusing on the comparison between the behavior of a bicycle frame with rear suspension and other one without it. To this end, it has been simulated the behavior of the rear suspension through Autodesk Inventor Software, applying different forces until obtaining the appropriate behavior.

In the first part of the project, the background of the mountain bike is studied, the different materials with which the frame can be made, the distinct parts of which it is composed, relating it to concepts learned in different subjects throughout the degree, to have a previous study with which to design the frame.

Lastly, the design process of both frames is described, as well as that of the suspension made in Autodesk Inventor, for further analysis throughout the finite element method. The analysis focuses on the security requirements that dictates the normative and a posterior comparison is carried out from the obtained results.

INDICE DE CONTENIDO

Contenido

1.	ESTADO DEL ARTE.....	17
1.1	INTRODUCCIÓN.....	17
1.1.1	Objetivo y motivación.....	17
1.1.2	El entorno socioeconómico	18
1.1.3	Historia y antecedentes.....	21
1.2	PARTES DE LA BICICLETA	28
1.3	GEOMETRÍA Y DIMENSIONES.....	38
1.4	MATERIALES	44
1.5	MÉTODOS DE FABRICACIÓN	54
1.5.1	Fabricación por hidroconformado.....	54
1.5.2	Fabricación por soldadura	55
1.5.3	Fabricación aditiva.....	58
2.	AMORTIGUACIÓN. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN.....	61
2.1	INTRODUCCIÓN	61
2.2	HISTORIA	61
2.2.1	Introducción y evolución de la suspensión delantera.....	62
2.2.2	Introducción y evolución de la suspensión trasera	63
2.3	DEFINICIÓN.....	65
2.3.1	Valores de k y c.....	70
2.3.2	El SAG.....	74
2.3.3	Diferencia entre carrera y recorrido.....	75
2.4	SISTEMAS DE SUSPENSIÓN.....	77

2.4.1 Monopivote	78
2.4.2 Monopivote articulado	79
2.4.3 Horst Link.....	80
2.4.4 Split Pivot	82
2.4.5 Pivote Virtual	83
2.5 COMPRACIÓN CON LAS BICICLETAS RÍGIDAS	84
3.DISEÑO CON AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2019	90
3.1 DIMENSIONES.....	90
3.2 AUTODESK INVENTOR	93
3.3 DISEÑO DE LOS CUADROS	94
3.3.1Cuadro rígido	94
3.3.2Cuadro con suspensión trasera	98
3.4 DISEÑO DE LA SUSPENSIÓN	105
3.4.1 Cálculo y ajuste de los parámetros del muelle.....	107
4. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN	114
4.1 NORMATIVA ISO.....	114
4.2 RESISTENCIA DE MATERIALES. LA FATIGA.....	116
4.3 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS SEGÚN LA NORMA.....	123
4.3.1 Ensayo de fatiga con una fuerza vertical.....	124
4.3.2 Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales	131
4.3.3 Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo	138
4.3.4 Ensayo de caída de masa.....	148
4.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	153

5. PRESUPUESTO	157
6. BIBLIOGRAFÍA.....	160

INDICE DE GRAFICAS

Ilustración 1. Gráfico de ventas de bicicletas en los últimos años	20
Ilustración 2. Ventas y porcentaje de bicicletas por modalidad en 2018	20
Ilustración 3. Datos de empleo asociado al ciclismo 2018	21
Ilustración 4. Boceto de la primera bicicleta	22
Ilustración 5. Evolución en el diseño de la bicicleta a lo largo de la historia	23
Ilustración 6. Modelo de la primera bicicleta de montaña Schiwin Excelsior	24
Ilustración 7. Diseño de la Schiwin Excelsior X	25
Ilustración 8. Primera bicicleta con ruedas de 29 pulgadas	26
Ilustración 9. Partes de la bicicleta	28
Ilustración 10. Partes del cuadro	29
Ilustración 11. Partes de la rueda	33
Ilustración 12. Partes de la transmisión	35
Ilustración 13. Bicicleta con sistema monoplato	37
Ilustración 14. Geometría del cuadro	38
Ilustración 15. Viga en voladizo	42
Ilustración 16. Comparación de la rigidez y peso de los distintos materiales	44
Ilustración 17. Primer cuadro de titanio impreso en 3D	47
Ilustración 18. Propiedades del aluminio	50
Ilustración 19. Fases del proceso de hidroconformado.....	55
Ilustración 20. Esquema de soldadura TIG.....	57
Ilustración 21. Técnica de fabricación aditiva con metales	58
Ilustración 22. Esquema prototipo del sistema softail	64
Ilustración 23. Bicicleta epic comp de Specialized.....	64
Ilustración 24. Amortiguador de aire Fox Float CTD Performance	65
Ilustración 25. Amortiguador de aire con muelle de acero	66
Ilustración 26. Amortiguador de depósito separado.....	67
Ilustración 27. Suspensión DPS iRD de Fox	67
Ilustración 28. Cómo y dónde regular la presión.....	69
Ilustración 29. Cómo y dónde regular la amortiguación	69
Ilustración 30. Modelo de suspensión trasera hecho en Working Model	71
Ilustración 31. Desplazamiento vertical de la rueda al sacarla de su posición de equilibrio.....	72
Ilustración 32. Resultado para una constante elástica de 1360 Ns/m	73
Ilustración 33. . Resultado para una constante elástica de 3000 Ns/m.....	73
Ilustración 34. . Resultado para una constante elástica de 500 Ns/m.....	74
Ilustración 35. Gráfica del desplazamiento de la rueda trasera tras simular el actuador	76

Ilustración 36. . Gráfica del desplazamiento de la rueda trasera tras simular el actuador	77
Ilustración 37. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de monopivote	78
Ilustración 38. Bicicleta Santa Cruz con sistema de suspensión monopivote	79
Ilustración 39. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de monopivote articulado.....	79
Ilustración 40. Puntos de articulación del sistema de suspensión Monopivote Articulado	80
Ilustración 41. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de Horst Link.....	81
Ilustración 42. Puntos de articulación del sistema de suspensión Horst Link	81
Ilustración 43. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de Split Pivot.....	82
Ilustración 44. Detalle de un cuadro con sistema de suspensión Split Pivot.....	83
Ilustración 45. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de Pivote Virtual	83
Ilustración 46. Puntos de articulación del sistema de suspensión de Pivote Virtual.....	84
Ilustración 47. Bicicleta de doble suspensión realizando una bajada con obstáculos.....	86
Ilustración 48. Bicicleta con cuadro rígido en el circuito de una prueba.....	87
Ilustración 49. Tabla resumen comparacion entre rígidas y dobles	87
Ilustración 50. Bicicleta con el sistema Internal Suspension Technology	88
Ilustración 51. Esquema del sistema Internal Suspension Technology	89
Ilustración 52. Bicicleta Single Speed	89
Ilustración 53. Tabla de tallas según altura del ciclista.....	90
Ilustración 54. Medidas de la geomtería del cuadro	91
Ilustración 55. Boceto 2D inicial desde el que parte el modelado del cuadro	92
Ilustración 56. Primer diseño del cuadro rígido.....	95
Ilustración 57. Propiedades físicas del cuadro rígido	95
Ilustración 58. Diseño final del cuadro rígido	97
Ilustración 59. Detalle del cuadro de la zona del eje pedalier	97
Ilustración 60. Detalle del cuadro de la zona del tubo de dirección.....	97
Ilustración 61. Detalle del cuadro de la zona de unión de tirantes con el triángulo principal	98
Ilustración 62. Diseño del triángulo principal del cuadro de doble suspensión	100
Ilustración 63. Diseño de el pivote del cuadro de doble suspensión	100
Ilustración 64. Diseño de los tirantes del cuadro de doble suspensión.....	101
Ilustración 65. Diseño de las vainas del cuadro de doble suspensión	101
Ilustración 66. Cuadro de doble suspensión ensamblado	102
Ilustración 67. Variables a introducir para el diseño de un muelle en Inventor	105
Ilustración 68. Diseño de la suspensión.....	106
Ilustración 69. Valores a introducir para crear una unión de muelle Inventor	107
Ilustración 70. Valores impuestos en el par prismático.....	108
Ilustración 71. Descomposición de la fuerza en vectores.....	110
Ilustración 72. Longitud del muelle tras aplicar la fuerza del peso	111
Ilustración 73. Gráfico de entrada de la fuerza introducida	112

Ilustración 74. Comportamiento de la suspensión tras aplicar la fuerza.....	113
Ilustración 75. Gráfica tensión - deformación	117
Ilustración 76. Propiedades mecánicas del Aluminio 6061	118
Ilustración 77. Representación de un ciclo de tensión	118
Ilustración 78. Curvas de los distintos métodos de corrección. Soderberg.....	119
Ilustración 79. Curva S-N. Límite de fatiga.....	121
Ilustración 80. Muestra de una pieza con rotura por fatiga	122
Ilustración 81. Cuadro de doble suspensión ensamblado con los elementos auxiliares necesarios para el ensayo	124
Ilustración 82. Método de realización del ensayo de fuerzas verticales	125
Ilustración 83. Mallado realizado en el modelo	126
Ilustración 84. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales.....	127
Ilustración 85. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales	127
Ilustración 86. Tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales aplicando directamente en los tirantes	128
Ilustración 87. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales aplicando directamente en los tirantes	128
Ilustración 88. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales para el cuadro rígido	129
Ilustración 89. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas verticales para el cuadro rígido.....	129
Ilustración 90. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales para el cuadro rígido	130
Ilustración 91. Método de realización del ensayo de fuerzas horizontales.....	131
Ilustración 92. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas horizontales. 1200 N.....	132
Ilustración 93. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas verticales 1200 N.....	133
Ilustración 94. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales 1200 N	133
Ilustración 95. Tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales 600 N.....	133
Ilustración 96. Detalle de la tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales 600 N	134
Ilustración 97. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales 600 N	134
Ilustración 98. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas verticales 600 N.....	134
Ilustración 99. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas horizontales 1200 N para el cuadro rígido ...	135
Ilustración 100. Detalle cuadro rígido tensiones de Von Mises	135
Ilustración 101. Primera tensión principal en el ensayo de fuerzas horizontales 1200 N para el cuadro rígido	136
Ilustración 102. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas horizontales 1200 N para el cuadro rígido.....	136
Ilustración 103. Tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas horizontales 600 N para el cuadro rígido	136
Ilustración 104. Soldadura con cordón de soldadura estrecho y ancho.....	138
Ilustración 105. Método de realización del ensayo de fuerzas de pedaleo	138
Ilustración 106. Modelo para la realización del ensayo de fuerzas de pedaleo	140
Ilustración 107. Disposición de las fuerzas aplicadas para el ensayo de fuerzas de pedaleo.....	141

Ilustración 108. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo 141

Ilustración 109. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas de pedaleo 142

Ilustración 110. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo para el cuadro rígido 142

Ilustración 111. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo para el cuadro rígido 143

Ilustración 112. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas..... 144

Ilustración 113. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas 144

Ilustración 114. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas 145

Ilustración 115. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas (pedal izquierdo)..... 145

Ilustración 116. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas para el cuadro rígido 146

Ilustración 117. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas para el cuadro rígido..... 146

Ilustración 118. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas para el cuadro rígido 147

Ilustración 119. Método de realización del ensayo de caída de masa 149

Ilustración 120. Tensiones de Von Mises en el ensayo de caída de masa..... 150

Ilustración 121. Desplazamiento de los elemetnos en el ensayo de caída de masa 151

Ilustración 122. Tensiones de Von Mises en el ensayo de caída de masa para el cuadro rígido 151

Ilustración 123. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de caída de masa para el cuadro rígido 152

Ilustración 124. Gráfica comparativa del desplazamiento del ciclista tras un impulso escalón 154

Ilustración 125. Gráfica comparativa del desplazamiento de la rueda trasera tras un impulso escalón 154

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 INTRODUCCIÓN.

1.1.1 Objetivo y motivación

El objetivo principal al cual queremos llegar con este Proyecto Fin de Carrera es el estudio del cuadro de una bicicleta, el estudio se centrará principalmente en el comportamiento de la suspensión trasera de la misma. Para ello, se van a utilizar modelos de bicicleta de doble suspensión de la modalidad 'TRAIL' dentro de los distintos tipos de Mountain Bike que existen y se simulará el comportamiento de las suspensiones ante excitaciones externas.

Después de la situación vivida estos últimos meses, se ha podido apreciar la necesidad que tiene la gente por practicar deporte. En las primeras fases de la desescalada millones de personas salían a practicar deporte en las franjas horarias permitidas, y es que cada vez la gente es más consciente de lo importante que es mantener una buena forma física para la salud. La bicicleta es un deporte que pueden practicar la mayoría de las personas, ya que dependiendo de tu estado de forma podrás practicarlo a unos niveles u otros. Además, puede utilizarse como un medio de transporte eficiente de bajo coste. Por estas razones, el sector de la bicicleta está en continuo auge, ya que cada vez son más las personas que deciden utilizar este bien, ya sea como deporte, como hobby o como medio de transporte. La demanda cada vez es mayor por lo que es un sector en el que todo el avance y tecnología que se introduzca será bien recibido.

La modalidad con la que se trabajará, es la más común dentro de las diferentes modalidades del MTB, se trata de bicicletas diseñadas para hacer lo mismo que las de carretera, pero por tramos sin asfalto, es decir, rodar y hacer kilómetros. No están pensadas para un solo tipo en concreto de terreno, sino que sirven para hacer un poco de todo: pistas forestales, caminos de tierra, tramos con piedras, zonas de monte... es precisamente, debido a su versatilidad por lo que a menudo se le conocen también como 'all mountain'. Son las más populares entre los

aficionados a la bicicleta de montaña, debido a que te permiten rodar a buen ritmo explorando nuevas rutas.

Pueden tener suspensión delantera o doble, con un recorrido de horquilla bajo, que suele variar entre 120mm y 140mm, aunque a veces puede llegar incluso hasta los 160mm. Normalmente, suelen tener ruedas de 29 pulgadas y cada vez es más frecuente que tengan doble suspensión para poder moverse de forma cómoda por tramos que requieran de cierta dificultad técnica.

Se ha elegido este tipo de bicicleta, por ser el más polivalente, por tanto, el que más demanda tiene, y del que podremos encontrar más información. Se hará un estudio en el que se usarán distintos tipos de suspensión trasera para comparar los resultados obtenidos del comportamiento de cada tipo y se comparará con la resistencia mecánica de una bicicleta sin suspensión en el cuadro.

Se intentará elegir una bicicleta de gama media que se pueda encontrar en el mercado, y estudiarla. Intentando que se mejoren aspecto de resistencia y funcionamiento gracias a la utilización de diferentes materiales en el cuadro y distintas tipologías de amortiguadores.

Dicho esto, los objetivos que debe cumplir este trabajo son los siguientes:

1. Modelado del cuadro de bicicleta de doble suspensión.
2. Análisis resistente por el método de elementos finitos del cuadro.
3. Análisis dinámico del comportamiento de la bicicleta en su funcionamiento ordinario.
4. Contraste de resultados obtenidos, aclarando ventajas e inconvenientes de cada tipo de material y suspensión, y toma de una decisión final.

1.1.2 El entorno socioeconómico

Antes de empezar, se va a analizar como esta en la actualidad el sector de la bicicleta y su industria. En ellos se engloba la fabricación, distribución y comercialización de productos en la práctica del ciclismo en todos sus niveles; de ocio, a nivel profesional y de competición y como medio de transporte.

Como se aprecia en el gráfico 1, los últimos datos estadísticos mostrados por AMBE (Asociación de marcas y bicicletas de España) muestran el incremento en volumen de ventas respecto al año anterior, un incremento del 5,45% que cerró el ejercicio de 2018 con una facturación de 1.712 Millones de euros. Pero los datos son algo confusos, porque también se puede observar como por primera vez desde 2014, las ventas caen, y se aprecia una recesión del 6,16% pasando de 1.116.232 bicicletas vendidas en 2017 a 1.047.492 bicicletas vendidas en 2018.

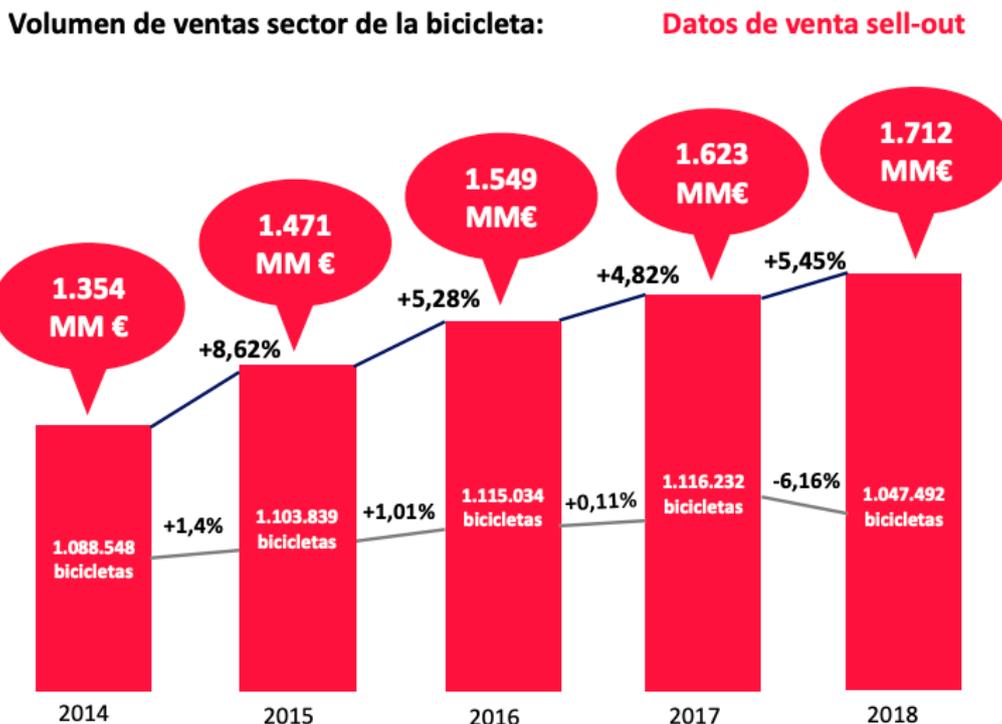
La explicación a este fenómeno, en el que disminuyen las ventas, pero aun así aumenta el volumen de mercado puede verse reflejado en el gráfico 2, en el que se ve como ha subido el precio medio de la bicicleta frente a ejercicios anteriores.

Esta caída en las ventas de bicicletas no se da en todas sus modalidades por igual

La mayor caída se observa en la bicicleta de montaña (-11,29%) y el mayor aumento en la venta de la bicicleta eléctrica (+ 54,52%), las de carretera y urbanas se mantienen estables frente a 2017 anterior ejercicio.

Analizando el precio medio de las bicicletas en nuestro país, se ve el incremento del 17,2%, y que sube su precio hasta 706 €. En el mercado actual el consumidor paga por una bicicleta eléctrica de media 2.165 €, 704 € por las de montaña y 1.755 € euros en las bicicletas de carretera.. Con esta subida de precio, y el aumento sobre todo en la venta de bicicletas eléctricas, podemos explicar que el volumen de mercado haya crecido un año más.

Ilustración 1. Gráfico de ventas de bicicletas en los últimos años



Fuente: <https://www.asociacionambe.com>

Ilustración 2. Ventas y porcentaje de bicicletas por modalidad en 2018

Volumen de ventas de bicicleta por modalidad y precio medio:		Datos de venta sell-out		
Modalidad	Precio medio (€)	Cambio % Precio	Unidades vendidas (Cambio %)	Participación (%)
Total 2018	706€	+17,2%	1.047.492 Uds. (-6,16%)	
Montaña	704€	+3,5%	409.030 Uds. (-11,29%)	39,1%
Carretera	1.755€	+5,1%	75.904 Uds. (+1,49%)	7,2%
Ciudad	258€	+4,2%	122.518 Uds. (+2,75%)	11,7%
Niños	141€	+3,2%	328.744 Uds. (-15,51%)	31,4%
Eléctrica	2.165€	+2,8%	111.297 Uds. (+54,52%)	10,6%

Fuente: <https://www.asociacionambe.com>

Los datos en cuanto al sector laboral (gráfico 3) según los datos obtenidos en AMBE, muestran como por primera vez ha habido una bajada (-1%) en la creación de empleo, sin embargo, en empresas fabricantes o distribuidoras la tasa de empleo ha subido (+6%), por lo que, en cifras generales, se da en este último ejercicio un aumento del empleo total en el sector (+1,72%).

Ilustración 3. Datos de empleo asociado al ciclismo 2018

Incremento de empleo en el Sector de la bicicleta 2018



Fuente: <https://www.asociacionambe.com>

Con este pequeño estudio del sector, se puede concluir que el ciclismo, es un deporte que beneficia a la economía española, que genera beneficios a las empresas y empleo a muchas personas. Además de comprobar que es un deporte que año tras año incrementa sus resultados.

1.1.3 Historia y antecedentes

No hay fecha establecida que se asocie a la primera bicicleta que se creó. Algunos textos de la obra Codez Atlanticus de Leonardo da Vinci, aparecen bocetos de un vehículo que se asemeja mucho a una bicicleta. Estos dibujos (imagen 1) quedaron atrás en el tiempo, y hoy se encuentran en la biblioteca Ambrosiana de Milán. Pero no fue hasta 1885 cuando el británico John Kemp Starley patentó la primera bicicleta con pedales. Desde aquí en adelante hubo muchos otros personajes de la historia que crearon bicicletas muy similares a las que hoy en día se siguen usando.

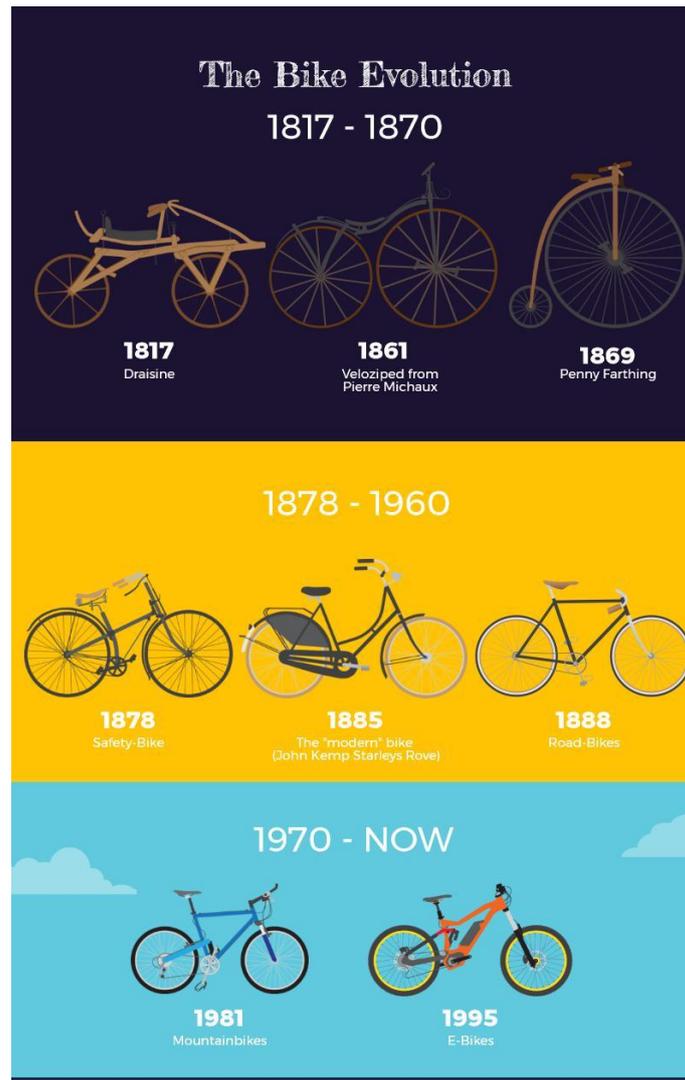
Ilustración 4. Boceto de la primera bicicleta

Fuente: <https://www.santafixie.com/blog/sabias-quien-primer-diseno-una-bicicleta/>

La bicicleta que hoy concebimos es un vehículo de transporte personal, que consta de dos ruedas generalmente de igual diámetro y situadas una detrás de otras en un eje perfecto, un sistema de transmisión a pedales, un cuadro metálico que da su estructura, un sillín para sentarse y un manillar con el que se controla la dirección.

Con el movimiento de las piernas giramos la caja de los pedales que a través de la cadena hace que gire el piñón que a su vez hace que la rueda trasera gire sobre el terreno. Aunque el diseño básico de la bicicleta no ha cambiado mucho desde los primeros modelos, sí que ha evolucionado mucho la bicicleta primitiva respecto a la actual.

Ilustración 5. Evolución en el diseño de la bicicleta a lo largo de la historia



Fuente: <https://www.bikester.es/info/historia-bicicleta/>

Puesto que este trabajo se centrará en la bicicleta de montaña, es conveniente revisar un poco acerca de la historia de esta modalidad dentro del ciclismo.

La bicicleta de montaña surge sobre el año 1930 en Estados Unidos, el diferenciante que hace que nazca este nuevo modelo de bicicleta es la creación de una llanta mas gruesa (26 x 2.125 pulgadas) que hacia posible su utilización por cualquier terreno. Fue en 1933 cuando Ignaz Schwinn una bicicleta mucho más robusta que las que había hasta el momento, el modelo se llamó la Schwinn Excelsior.

Ilustración 6. Modelo de la primera bicicleta de montaña Schwinn Excelsior



Fuente: <https://www.pinterest.com.mx/pin/295337688043910066/>

Aunque estos fueron sus inicios, fue en la década de los 70 cuando se popularizó la práctica de usar bicicleta por caminos de tierra. Las primeras bicicletas que se usaban esos años para hacer carreras montaña abajo en California eran de bicicross, tenían la llanta más delgada. Fue entonces cuando a Joe Brezze, Charlie Kelly junto a otros ciclistas que empezaban a practicar la modalidad de monte, se les ocurrió ponerle a estas bicicletas las llantas anchas de sus viejas Schwinn Excelsiors, que pesaban más, y así obtuvieron control, velocidad y unas llantas adecuadas para cualquier terreno. Estos fueron los primeros en tirarse ladera abajo por la cara este de Pine Mountain (California) con unas bicicletas de los años de la Gran Depresión que ellos mismos modificaban.

A raíz de aquí se volvieron a coger las “viejas” Schwinn Excelsiors para modificarlas y ajustarlas a las necesidades de los ciclistas de montaña.

Gary Fisher, uno de los primeros ciclistas de mountain bike, modificó su Schwinn Excelsiors, añadiéndole los cambios de velocidad para poder hacer subidas con esta, y no solo bajadas. Fue cuestión de tiempo observar que el secreto de las Schwinn no era el grosor de los tubos, sino la geometría del cuadro. Así nace la MTB, bicicletas con bastidores de una geometría similar, pero con grupos más eficientes.

En 1977 Joe Breez, uno de los primeros visionarios del MTB, monto algunos cuadros de Cromoly usando los mismos principios de la geometría que las bicis Schwinn Excelsior. Este nuevo cuadro inspiro a Gary Fisher a crear la Schwinn Excelsior X, a la que añadió quince velocidades y las manetas del freno de una moto, se muestra en la siguiente imagen.

Ilustración 7. Diseño de la Schwinn Excelsior X



Fuente: <https://esmtb.com/historia-gary-fisher/>

Con esta compitió en la mítica carrera Repack. Y fue en 1979 junto con Charlie Kelly, cuando crearon “MountainBikes” una empresa en la que Tom Ritchey construía los cuadros. Desde entonces, las bicicletas de montaña fueron evolucionando hasta que apareció el elemento que mejor las define: las suspensiones. Éstas también han experimentado una fuerte evolución desde que llegaron al mercado. Las simples horquillas de elastómeros pronto se llenaron de aire.

Ya moldeada la bicicleta de montaña como se conoce actualmente, los precursores y visionarios de este deporte fundaron sus marcas que años después fueron vendidas a los emporios industriales del MTB.

Un innovador plus que incluyó Gary Fisher en sus bicicletas fue que a partir de los 90, comenzó a crear ruedas no solo de 29", dando un salto y dejando atrás las hasta ese momento usadas ruedas de 26". Las probaba el mismo, y llegó a concluir que era "un 5% más rápido con la 29"". Desde ese momento supo que tenía que empezar a apostar por esta rueda. El inconveniente era conseguir material para montarlas, debían tener una medida muy similar a las 26".

En 1999, WTB comenzó a fabricar neumáticos de 29", y en 2001 lanzó la primera línea de bicicletas con ruedas de 29 pulgadas Gary Fisher con muchísimo éxito en su lanzamiento, a pesar del cambio que supuso.

Ilustración 8. Primera bicicleta con ruedas de 29 pulgadas



Fuente: <https://esmtb.com/historia-gary-fisher/>

Pero los avances no fueron solo en cuestión de neumáticos. Las MTB vivieron en esos años numerosas modificaciones que pretendían afianzar las bicicletas de montaña y conseguir el perfecto diseño para su correcta funcionalidad. Como el paso de horquillas rectas a horquillas con offset, el diseño del tubo superior más largo y potencias más cortas, que vinieron de la mano de la geometría Génesis, que Gary Fisher introdujo en sus bicis a partir del 2007. Así

como la suspensión trasera con un diseño de 4 barras y las direcciones y bujes más anchos, de 135mm.

Así se llega a la bicicleta de montaña actual, que ha evolucionado tanto como las necesidades de los ciclistas y el propio deporte de MTB lo ha hecho en estos años.

En las MTB encontramos, la combinación entre ligereza que se busca en los ascensos y la robustez necesaria para hacer frente todo tipo de terrenos, y que cumpla así las prestaciones que busca un exigente ciclista de montaña.

1.2 PARTES DE LA BICICLETA

El primer paso a la hora de estudiar cualquier mecanismo es conocerlo, antes de comenzar con el modelado y el diseño, es conveniente explicar los distintos componentes por los que está compuesta una bicicleta.

La bicicleta puede dividirse en 5 grandes grupos, que a su vez dentro de cada uno de ellos podemos diferenciar más componentes importantes a tener en cuenta a la hora de estudiar la bicicleta.

Los grupos que se considerarán para estudiar las bicicletas son: el cuadro, manillar y potencia, ruedas, grupo mecánico, y horquilla y suspensiones.

Ilustración 9. Partes de la bicicleta



Fuente: <https://www.scott-sports.com> editada en Paint

1.-Cuadro:

Conforma la estructura principal de la bicicleta, además es el componente de mayor importancia, encargado de soportar la mayor parte del peso del usuario y el que más depende de la estatura del ciclista para elegir el tamaño correcto para su óptimo funcionamiento, tiene gran influencia en la ergonomía, confort y resistencia estructural del conjunto. Está formado

por tubos de distintas longitudes y, normalmente, también distintas secciones. Al cuadro se acoplan los demás componentes necesarios para formar la bicicleta.

Dentro de las bicicletas de montaña hay dos opciones de cuadro, puede ser rígido, es decir, sin suspensión trasera, o las conocidas como “dobles”, en las que el cuadro incorpora la amortiguación trasera.

Aunque de esto hablaremos un poco más adelante, los materiales más utilizados para la fabricación del cuadro son el aluminio y la fibra de carbono. También existen, aunque no tan frecuentes, cuadros fabricados en acero y titanio. Los de acero son resistentes, aunque no muy ligeros, y los de titanio comparten propiedades de los de acero y los de aluminio, pero con el precio más elevado.

Además, la estructura del cuadro se divide en diferentes partes, cada uno de los tubos que forman el cuadro tiene un nombre distinto, y su geometría influirá en el comportamiento de la bicicleta. Estas son los nombres de los principales tubos que lo forman:

Ilustración 10. Partes del cuadro



Fuente: <https://willier.com> editada en Paint

A.- Tubo de dirección, de horquilla, frontal o caja de dirección: aquí es donde se colocan las piezas que hacen de articulación permitiendo el giro de la dirección.

B.- Tubo horizontal: tubo superior del cuadro, es la que más se tiene en cuenta a la hora de elegir la talla del cuadro.

C.- Pivote-articulación: conecta el amortiguador con el cuadro por dos puntos, es una pieza fundamental para el funcionamiento de la suspensión.

D.- Tubo del sillín: tubo sobre el que se sitúa la tija.

E.- Tirante o vaina superior.

F.- Vaina.

G.- Caja de pedalier: es la parte sobre la que se coloca el eje pedalier, a través de esta caja se conectan las dos bielas

H.- Tubo inferior: une la caja de dirección con la caja de pedalier.

2.-Tija

Del cuadro sale un tubo recto que se denomina tija, es el componente que conecta el sillín con el resto de la bici. La tija permite regular la altura del sillín, que dependerá de la altura del ciclista, introduciendo la tija en mayor o menor cantidad en el interior del tubo del sillín. Existen en diferentes longitudes y distintos diámetros de tubo, los distintos materiales en los que se fabrican son aluminio, acero y fibra de carbono.

3.- Sillín

El sillín es la parte de la bicicleta en la que se sienta el ciclista y debe permitir que el ciclista se eche hacia atrás en bajadas empinadas o situaciones técnicas sin obstaculizarle. La parte metálica que se utiliza para agarrar el sillín a la tija está fabricada en acero, aluminio o fibra de carbono, y la parte en la que se sienta el ciclista pueden ser de cuero o plástico forrado, los más blandos y cómodos suelen ser de gel elastopolímero.

Manillar y Potencia:

Estos son los elementos responsables del manejo de la bicicleta y de dar movimiento a las direcciones.

4.- Potencia

Es el elemento que une el manillar con la horquilla. Pueden ser de dos tipos: planos o “de doble altura”, que tienen un ángulo de inclinación positivo hacia arriba, dejando el manillar

por encima del tope de la dirección. Los planos se caracterizan por ser más aerodinámicos, sin embargo, los de doble altura ofrecen una posición más cómoda la ciclista y un mejor manejo. La potencia puede ajustarse dependiendo de la altura del ciclista para adaptarse adecuadamente a la geometría y poder lograr así mayor rendimiento y confort.

El manillar es uno de los tres puntos de contacto en una bicicleta, además de los pedales y el sillín, es el componente en el que se sujeta el ciclista con las manos, el tubo que permite al ciclista actuar sobre la rueda delantera para guiar y controlar la bicicleta, los hay de distintas longitudes y angulaciones dependiendo de lo que se busque en cada caso, un manillar más largo dará una mayor manejabilidad y estabilidad, mientras que uno corto proporcionará más aerodinámica y agilidad.

5.- Manillar

El manillar tiene, además, unos componentes desde los que se maneja la transmisión, frenado y amortiguación de la bicicleta. Lleva incorporado unas manetas que tienen las siguientes funciones: maneta de freno trasero y delantero, maneta de cambio del desviador y maneta del cambio trasero. Algunas bicicletas están empezando a introducir una palanca para bloquear o seleccionar distintos niveles de amortiguación para regular las suspensiones delantera y trasera. Y por último, lo más reciente que se ha introducido al mercado es un botón para poder regular la altura del sillín gracias a el uso de una tija telescópica, muy útil en bajadas abruptas ya que permite bajar la postura y montar con más seguridad en estas bajadas técnicas, lo ha empezado a introducir Canyon en sus bicicletas de montaña.

6.- Horquilla y suspensión delantera:

Es el componente que se encarga de unir la rueda delantera con el cuadro, y se fija mediante un cierre rápido, en ella se encuentra la suspensión delantera. Su objetivo es el de amortiguar y aislar al ciclista de las irregularidades del terreno, y absorber la fuerza que se ejerce en el frenado al utilizar el freno delantero.

Aunque el cuadro sea rígido, la suspensión delantera siempre la llevará, en el caso de las bicicletas de montaña actuales, excepto en la modalidad de maratón. En este tipo de

pruebas, aun siendo por montaña, se trata de circuitos llanos la mayoría del recorrido y el hecho de incorporar amortiguación en la horquilla, incrementará el peso y restarán rendimiento en la pedalada, son menos explosivas.

7.- Dirección:

Conforma la unión del cuadro con la horquilla, se realiza a través de la caja de dirección que se encuentra en el tubo frontal del cuadro. Es un elemento que hace que pueda girar correctamente el manillar para guiar la bicicleta.

Está compuesta por rodamientos internos y cazoletas que pueden ir roscados o con apriete insertados en el cuadro. Existen distintos tipos de dirección en función de su instalación en el tubo frontal, su nomenclatura está estandarizada mediante el SHIS (Standardized Headset Identification System), que es el sistema de identificación de direcciones[tfg9_pag19].

Actualmente, el más usado es el sistema "Aheadset", que se trata de un sistema de dirección que no lleva rosca en el tubo de dirección y se sujeta gracias a la potencia. En las bicicletas más económicas es común encontrarse con los modelos de tuerca. Hay de distintos ángulos y longitudes.

8.- Suspensión trasera:

Es el componente que se utiliza, al igual que la horquilla delantera, para absorber las irregularidades del terreno. Existen de diferentes tamaños dependiendo de la modalidad, del tipo de bicicleta y del uso. Además, hay de diferentes tipos: los de aire, son poco sensibles a los obstáculos pequeños y son muy ligeros; los de resorte, más pesados, pero tienen buenas especificaciones, sensibles ante cualquier obstáculo y resistentes; los hidráulicos, compuestos por aceite; y los elastómeros, ya poco usuales, que son una especie de goma. Más adelante hablaremos de los distintos tipos de amortiguadores y sus funciones.

9.- Ruedas:

Son la única parte de la bicicleta que mantienen contacto con la superficie. El tamaño más común actualmente es de 27.5 pulgadas, aunque cada vez es más frecuente la medida de 29". Hace unos años, sólo había ruedas de 26", esta medida se refiere al diámetro exterior que presenta la cubierta. A su vez está compuesta por varios componentes: radios, llanta, cubierta y buje.

Ilustración 11. Partes de la rueda



Fuente: <https://www.scott-sports.com> editada en Paint

1.- Radios: unen la llanta con el eje de la rueda. Gracias a los radios la rueda es una circunferencia perfecta, puede ajustarse la tensión de éstos a través de unas tuercas llamadas niples, para alinear las ruedas correctamente en el caso de que sufran algún golpe o esfuerzo que haga que se modifica la geometría de la rueda. El material del que están hechos los radios es el acero y los niples pueden ser de bronce o aluminio.

2.- Llantas: se trata del componente que delimita el perfil estructural exterior de la rueda sobre el que se monta la cubierta, suelen estar fabricadas en aluminio y algunos llevan un recubrimiento de materiales cerámicos en los bordes con el fin de mejorar la eficiencia de los frenos de zapata, también pueden fabricarse en fibra de carbono o acero.

3.- Buje: se encarga de unir el eje con la llanta mediante los radios. Es el elemento central de la rueda sobre el que se apoya y el que hace que gire el eje, están acoplados a él los rodamientos, y además el buje trasero contiene el núcleo sobre el que van montados los piñones. Por último, el eje es el componente de unión de la rueda al cuadro, en el caso de la rueda trasera, y a la horquilla, en el caso de la rueda delantera.

4.- Cubierta: es la parte de la bicicleta que se coloca sobre la llanta y la única parte en contacto con el suelo, su material es el caucho, al igual que los neumáticos de los coches o motos. Los hay de distintos espesores, desde 1.8 hasta 2.4 pulgadas. Entre la cubierta y la llanta se sitúa la cámara, que se trata de un tubo de goma contiene aire comprimido en su interior y da forma a la cubierta, sirve como amortiguador para reducir el impacto del ciclista con los baches y reduce el desgaste de las ruedas. La última novedad que ha salido al mercado es las cubiertas *tubeless*: tubelizar una rueda es que nuestra bicicleta deje de llevar cámara, pasando a llevar el aire en el interior de la cubierta.

En las ruedas también se encuentran los frenos de la bicicleta, hay dos tipos de frenos: los de zapata, que crean fricción con la llanta, y los de disco, que pueden ser hidráulicos o mecánicos, en el caso de las bicicletas de montaña son muchos más comunes los frenos de disco. Actualmente, se están incrementando el uso de los frenos de disco hidráulicos debido a que proporcionan una mayor capacidad de frenado en un menor tiempo, aunque un inconveniente es que precisan de mayor mantenimiento. **Los discos (6.)** son la superficie utilizadas para detener la bicicleta, debido a los continuos cambios de temperatura a los que están expuestos por el roce de las pastillas de freno, se fabrican de acero aleado, que resiste bien a los cambios de temperatura. Los diámetros de los discos son variables, siendo el rango desde los 140 hasta los 220 mm, el tamaño más común es el de 160 mm.

Los frenos son accionados mediante **la pinza (5.)** del freno de disco, que es el componente donde llega a fuerza que se transmite desde la maneta de freno situada en el manillar hasta las pastillas, ésta fuerza puede ser de tipo mecánica, mediante una sirga, o una fuerza ejercida por un fluido, que serían los frenos hidráulicos, ya comentados, el fluido suele ser aceite.

10.- Grupo mecánico:

Este es el conjunto de elementos que se conoce como la transmisión, gracias a éstos hacen que el movimiento de la bicicleta sea posible mediante los siguientes componentes:



Fuente: <https://www.scott-sports.com> editada en Paint

1.- Bielas y 2.- Platos: están unidos entre sí como una única pieza o mediante unos tornillos allen, se coloca en el eje de pedalier. Su función es la de transmitir la fuerza que ejerce el ciclista con las piernas en un movimiento circular a través de unos engranajes, ésta fuerza será a la vez transmitida a la rueda trasera mediante una una cadena que engrana en los piñones situados en el eje trasero. Los platos varían en el diámetro y en el número de dientes, pudiendo ir desde 20 hasta 52, cuánto más chico sea el plato menos resistencia hay que vencer al pedalear. Las bielas están hechas de acero, aluminio o fibra de carbono. Las bielas están unidas entre sí a ambos lados a través del **eje pedalier (3.)**.

A las bielas hay que añadirles el pedal, que es la parte sobre la que apoya el pie el ciclista para hacer la acción del pedaleo. Existen dos tipos de pedales: automáticos y normales. Los automáticos llevan un mecanismo de anclaje gracias a unas piezas llamadas *calas*, en las que se coloca un zapato especial y mantiene la zapatilla unida al pedal, pudiendo ejercer fuerza en el pedaleo mientras el pie asciende y desciende; y los normales son los que llevan la

mayoría de bicicletas que se ven por la calle. Se unen a las bielas mediante una rosca, y suelen ser de acero, aunque también hay de aluminio y fibra de carbono.

4.- Cadena: es la pieza compuesta por la unión de muchos eslabones, se utiliza para transmitir la fuerza del pedaleo de los platos a los piñones mediante dientes de engranaje, convierte la potencia que se da a los pedales en el giro de la rueda. Están fabricadas en acero.

5.- Piñones: es el componente que se sitúa en la parte central de la rueda trasera, el conjunto de piñones o coronas se conoce como cassette. Cada piñonera tiene un número de dientes distinto, las bicicletas de montaña pueden tener desde 7 hasta 12 piñones o velocidades dependiendo de la modalidad y de lo que se busque en cada caso. Además, dependiendo de si delante lleva dos platos, suponen una combinación de más de 20 opciones. Se fabrican en acero aleado, que es un material que resiste muy bien, ya que este componente está expuesto continuamente al rozamiento de la cadena sumado al efecto del barro y polvo, que hacen que el desgaste sea mayor.

6.- Cambio trasero: es la parte de la bicicleta que tiene como función principal el cambio de marcha o de piñón en función de terreno y/o el desnivel por el que se circule en cada momento. En su interior lleva incorporado un muelle que facilita el movimiento, está situado en la rueda trasera, unido al cuadro mediante en la unión de las vainas. Suelen estar hecho de aluminio, aunque también hay de titanio y composites. Los más reconocidos son Shimano y SRAM, que no tienen por qué ser compatibles entre sí.

7.- Cambio delantero: en este caso, es más conocido como desviador. Su función es cambiar de plato cuando se requiera. Este elemento se sitúa en el cuadro unos mm por encima de los dientes del mayor plato. Normalmente están hecho de aluminio, pero al igual que en el cambio trasero, también puede haber de titanio.

No todas las bicicletas precisan de desviador, ya que ahora se está empezando a implementarse el sistema monoplato, es decir un solo plato. Esta opción es cada vez más popular y tiene sus razones. Las principales ventajas son que reduce el número de piezas en movimiento, por lo que el peso se ve reducido y aumenta la fiabilidad, ofrece una imagen más

limpia, y puede conseguirse relaciones de velocidad muy parecidas a las que se podrían obtener llevando dos platos simplemente aumentando el número de piñones. Aunque muchos cuadros modernos vienen diseñados de tal manera que se puede utilizar sólo un plato. Las piñoneras de 12 velocidades se fabrican de acero, excepto las coronas grandes, que se fabrican en aluminio para contener el peso.

Al fin y al cabo, lo que se busca es que la relación sea la adecuada en cada momento. Para subir pendientes se buscará una relación pequeña, es decir un plato pequeño y un piñón grande, y para descensos lo contrario, una relación grande, lo que se consigue con un plato grande y un piñón pequeño. La relación se calcula dividiendo el número de dientes del plato entre el número de dientes de la piñonera que se lleve en cada instante, y es el número de vueltas que da la rueda motriz por cada giro completo que se da en el pedal, y el desarrollo de una marcha es la longitud que avanza la bicicleta por cada vuelta en los pedales, pero en esto último influirá también el diámetro de la rueda. La marca más conocida y la que da mejores prestaciones cuando se habla de bicicletas con un único plato es SRAM.

Ilustración 13. Bicicleta con sistema monoplato

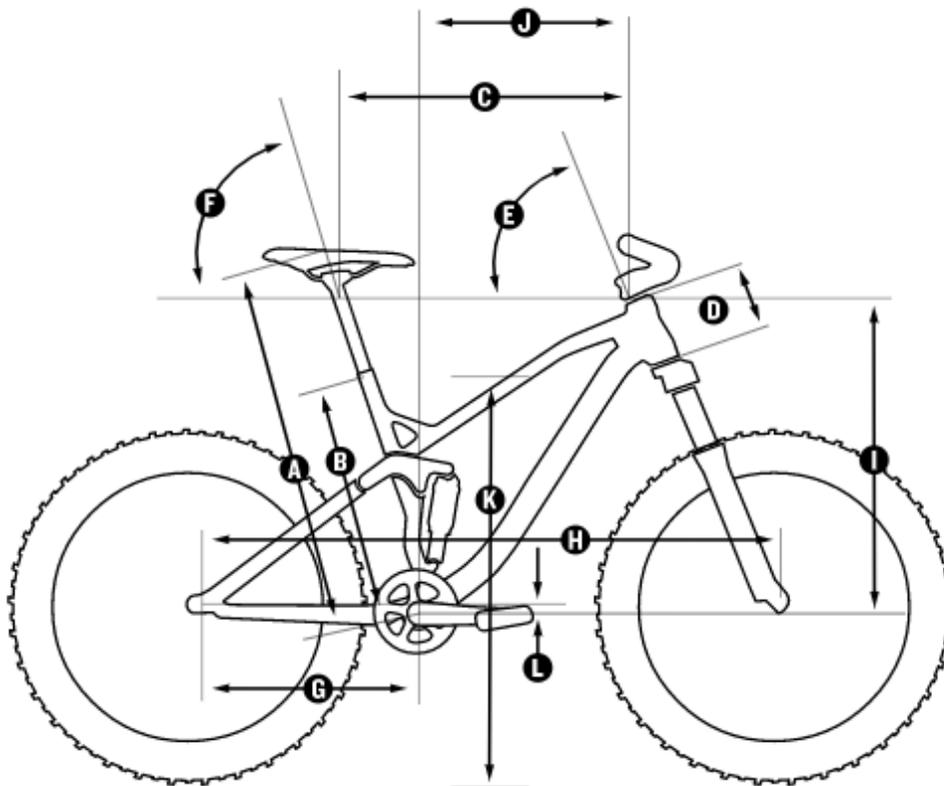


Fuente: <https://www.solomtb.es/el-monoplato-en-mountain-bike>

1.3 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES

Uno de los aspectos que más influye a la hora de estudiar y modelar la bicicleta es la geometría y las dimensiones del cuadro. Estas dimensiones irán relacionadas directamente con la altura del ciclista, para lograr un mayor rendimiento y confort. Que la geometría se adecue a las medidas que requiere el ciclista marcan un buen comportamiento y equilibrio. Se explicarán ahora los elementos que definen la geometría del cuadro, explicando brevemente la importancia y la influencia en el comportamiento de cada uno de estas dimensiones.

Ilustración 14. Geometría del cuadro



Fuente: <https://www.canyon.com>

A.- Altura del sillín.

En esta medida se tiene en cuenta el largo del tubo del sillín y la medida del tubo de la tija. Esta medida puede ser regulada por el usuario para conseguir su punto óptimo de confort.

B.- Medida del tubo de sillín.

Desde la parte más baja del cuadro, el centro de la caja pedalier, hasta la parte superior del cuadro donde se inserta la tija. Se usa para definir la talla de la bicicleta, dependiendo de la longitud de la entrepierna.

C.- Longitud del tubo superior.

Desde el corte del tubo horizontal con el tubo del sillín hasta el corte del tubo horizontal hasta el tubo de dirección. Determinará la postura del ciclista, suele corresponder con la medida del tronco, aunque cuanto menor sea esta distancia mayor será el confort a la hora de conducirlo, ya que permite una posición más erguida; es por eso que en algunas modalidades de mountain bike es mayor esta medida debido a que se busca una posición más agresiva para encarar las bajadas.

Este tubo, en las bicicletas de montaña, y en unas modalidades más que en otras, presenta una caída más o menos pronunciada hacia atrás, esta caída es conocida como *sloping*, y su principal objetivo es facilitar poder poner un pie en el suelo en cualquier momento que fuese necesario.

D.- Largo del tubo de dirección.

Esta medida va desde la parte superior de la horquilla hasta la potencia. Esta medida solo repercute en la ergonomía del ciclista, un valor pequeño conseguirá una posición más aerodinámica, mientras que un mayor valor implica una posición más cómoda y erguida.

E.- Angulo del tubo de dirección.

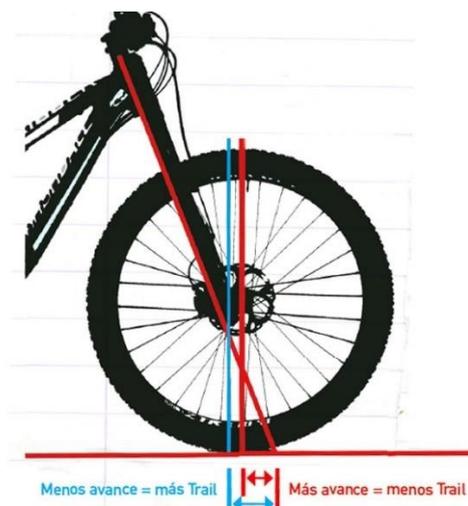
Se mide con el ángulo formado por la prolongación del eje de dirección con la horizontal, este ángulo debe tomarse hacia atrás, es decir, empezando por la izquierda desde la horizontal del suelo hasta que corte con la prolongación de la horquilla. También es conocida

esta medida como ángulo de ataque. El ángulo de dirección es, de las partes de la geometría, la característica que más influye en el comportamiento de la bici.

Este ángulo puede oscilar entre 62 y 72 grados en las bicicletas de montaña. Influye en el control de la bicicleta, un ángulo mayor provoca un control más sensible e inmediato, haciéndola más manejable, mientras que un menor ángulo hará que sea más estable, al haber más distancia entre ejes, pero menos sensible, menos cómoda, y torpe. En las bicicletas de carretera, se utilizan ángulos más rectos, llegando hasta los 75º, esto hace que sean ágiles, pero en las bajadas el comportamiento sería más inestable. La mayor característica de las bicicletas con ángulos de ataque poco pronunciados es la estabilidad a altas velocidades y en caminos técnicos, mayor resistencia al giro, lo que implica que necesiten más espacio para realizar giros.

Esta medida es la que origina el avance. El avance es la medida de la distancia horizontal entre el punto de contacto de la rueda delantera con el suelo y el punto de la prolongación del eje de dirección hasta el suelo. Esta es una característica muy importante a tener en cuenta en el diseño de la bicicleta. Este parámetro influye en la estabilidad y en la capacidad de absorción de impactos debido a las irregularidades del terreno.

Ilustración 15. El avance en la geometría



Fuente: <http://pxsports.com/2019/01/el-trail-y-el-avance-que-son-y-como-funcionan/>

Gracias al avance de la bicicleta, ésta puede dirigirse de manera automática, sin necesidad de apoyar las dos manos sobre el manillar de la bicicleta. Además, facilita los giros y la conducción por curvas.

F.- Angulo del tubo del sillín.

Es el ángulo que forma el tubo del sillín con la horizontal del suelo. Un tubo perpendicular al suelo tendría 90 grados. La mayoría de bicicletas llevan un ángulo de sillín de entre 71 y 74 grados. Este ángulo afecta a la posición del ciclista sobre la bicicleta, sobre todo a la posición de la rodilla a la hora de pedalear. Una posición más adelantada favorece el ataque sobre los pedales, siendo mayor la fuerza transmitida, y una posición más aerodinámica, mientras que un ángulo más pequeño, hará que la posición del centro de gravedad esté más retrasada favoreciendo el comportamiento en las bajadas. El desplazamiento de los raíles del sillín permite ajustar esta posición.

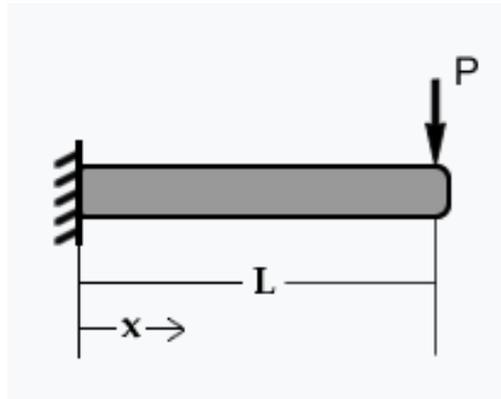
G.- Largo de las vainas.

Es la longitud que existe entre el centro del eje pedalier hasta el centro de la rueda trasera. Esta medida repercute en la estabilidad, en la velocidad de reacción y en la capacidad de escalada. Cuanto menor sea la longitud de la vaina mejor serán estas características. Excepto la estabilidad a grandes velocidades, que será mayor cuanto mayor sea la distancia entre ejes, por lo tanto, cuanto mayor sea la longitud de las vainas. La longitud de la vaina influirá directamente en la distancia entre ejes. Lo más importante es la influencia en la fuerza de transmisión de pedaleo, a menor distancia de las vainas, mejor será esta transmisión.

Antes se hacían bicicletas con las vainas largas, pero ahora se busca que sean lo más corta posibles debido a que hace bicicletas más cortas, manejables y con mayor tracción en la rueda trasera.

La vaina trasera podría modelarse como una viga en voladizo, suponiendo el peso de la rueda trasera como una carga puntual, se asemejaría a la figura que está abajo, a la que corresponden las siguientes ecuaciones:

Ilustración 16. Viga en voladizo



$$y_{max} = \frac{P * L^3}{3 * E * I}$$

$$k = \frac{3 * E * I}{L^3}$$

Donde:

- y_{max} = desplazamiento máximo, que se da en el extremo
- P = valor de la carga aplicada
- E = módulo de elasticidad, propiedad del material
- I = Momento de inercia de la sección del tubo
- K = Rigidez del tubo
- L = Longitud de la viga

Viendo las ecuaciones, se corrobora que a menor longitud de las vainas mejores propiedades, cuanto menor longitud mayor rigidez.

H.- Batalla.

Es la distancia entre ejes, y se mide de centro a centro de cada rueda. Una mayor distancia de ejes hace que haya mayor estabilidad, mientras que una menor distancia mejora la reactividad.

I.- Stack.

Es la altura del cuadro, distancia vertical entre el eje del pedalier hasta la parte superior de la caja de dirección. Junto con la longitud del tubo superior, es la medida más usada para calcular la talla de un cuadro.

J.- Reach.

En español "alcance", es la distancia horizontal desde el centro del eje pedalier y la proyección del centro de la caja de dirección, influye en la medida del tubo superior. Esta medida junto con el Stack son las que definen la posición del ciclista cuando éste va de pie sobre la bicicleta.

K.- Standover.

Es la distancia que va desde la horizontal del suelo hasta la parte superior del tubo superior del cuadro en el centro exacto entre los dos ejes de las ruedas. Influye mucho la altura del eje pedalier.

Por último, una medida a tener en cuenta a la hora de elegir la bicicleta que más se adecue a los gustos y usos que le vaya a dar el ciclista es la altura del eje pedalier. Esta medida afectará a la estabilidad de la bicicleta, según dónde esté situado el eje desplazará el centro de gravedad hacia un punto más alto o mas bajo. Una altura baja conseguiría una bicicleta más estable, pero hay que tener cuidado, ya que un eje pedalier muy bajo puede ocasionar golpes de las rocas, ramas o cambios de rasante contra él. Por lo que esta medida debe ser lo suficientemente grande para proporcionar una conducción segura sobrepasando los obstáculos del suelo sin golpear el cuadro.

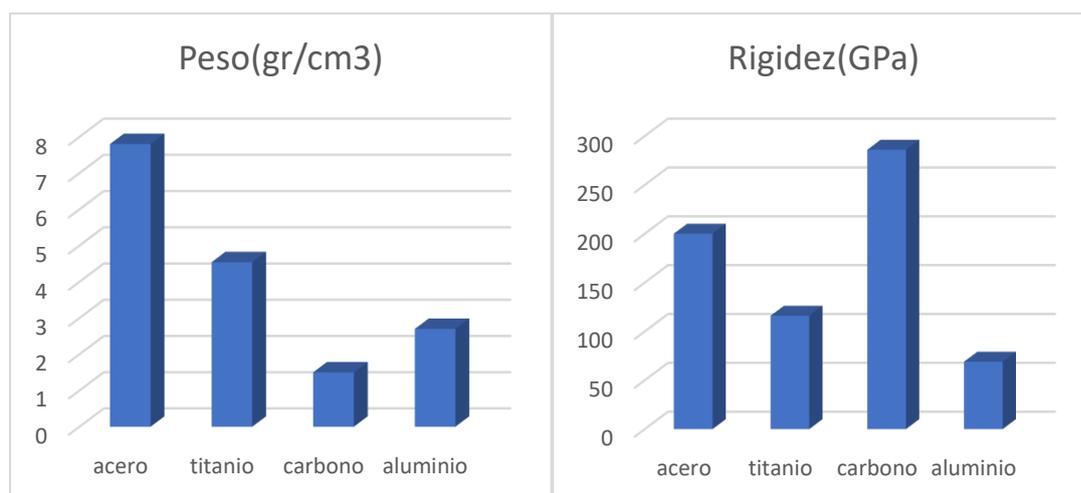
1.4 MATERIALES

En este apartado se hablará sobre los distintos materiales que se utilizan para fabricar cuadros de bicicleta a lo largo de la historia y sus propiedades. Hasta principios del siglo XXI, que comenzaron a introducir la fibra para la fabricación de bicicletas, antes predominaban los materiales metálicos.

Dentro de los materiales metálicos se encuentran el acero, titanio, Scandium y aluminio. Por otro lado, está el material compuestos por fibras, como la fibra de carbono y la fibra de basalto. Ahora hablaremos de estos materiales y sus propiedades más importantes. Los materiales más utilizados en el mercado actualmente son las de fibra de carbono y, el aluminio y sus aleaciones.

No hay un material mejor que otro, sino que, dependiendo del tipo y el tiempo de uso y el presupuesto habrá uno que se adecue mejor que otros. El material del cuadro determina características como resistencia, capacidad de carga, durabilidad, etc. Las propiedades más relevantes a la hora de elegir con qué material fabricar el cuadro son el peso, la resistencia y la rigidez.

Ilustración 17. Comparación de la rigidez y peso de los distintos materiales



Fuente: elaboración propia con datos de <https://www.ingmecanica.com>

La resistencia podría confundirse con la rigidez, pero no es lo mismo. La resistencia se refiere a la capacidad de soportar una fuerza antes de llegar al fallo, mientras que la rigidez se refiere

a cuánto se flexiona algún tubo del cuadro, en este caso, al estar sometida a una fuerza. La resistencia no afecta a la conducción de la bicicleta, sin embargo, la rigidez sí que afecta. Por último, el peso es un factor importante sobre todo para la competición.

1. Acero

Es un metal compuesto por una base de hierro y un porcentaje de carbono, que varía entre el 0,08 y el 2% en masa. Se le añaden, además, materiales como el cromo, el magnesio, el molibdeno o el silicio para alterar las propiedades del material, aumentando éstos la resistencia a la corrosión, resistencia a la abrasión, la dureza y la maleabilidad, respectivamente.

Se utiliza un código de 4 dígitos para la identificación de los aceros creado por American Iron and Steel Institute (AISI), en la que el primer dígito representa el aleante de mayor porcentaje; el segundo, el porcentaje de éste elemento principal; y los dos últimos, indican la cantidad de carbono que lleva dicha aleación.

El acero más utilizado en el ciclismo es el 41xx, en concreto el acero 4130, conocida dicha aleación en la industria por el nombre de Cromoly. Consiste en una aleación de cromo y molibdeno, con un porcentaje de carbono de, aproximadamente, el 0,3%; 1% de cromo y 0,2% de molibdeno, además de un 0,15% de silicio. Este conjunto de elementos consigue una aleación más resistente y dura que el acero, resistente a la oxidación y con gran soldabilidad.

Es un material fácil de trabajar, de gran duración. Tiene buena resistencia a tracción, yendo desde los 375 MPa hasta los 1800, dependiendo de la serie utilizada, y ofrece una resistencia de 210 MPa para ser doblado. Gracias a su resistencia, permite la fabricación de tubos de espesor mínimo, teniendo que aumentar el grosor de dichos tubos en los extremos para poder realizar una correcta soldadura.

El acero Hi-ten, es un tipo de acero con mejores propiedades que el acero convencional gracias a los tratamientos térmicos y con un bajo contenido en carbono. Es utilizado para bicicletas de gamas bajas en las que el peso no es relevante.

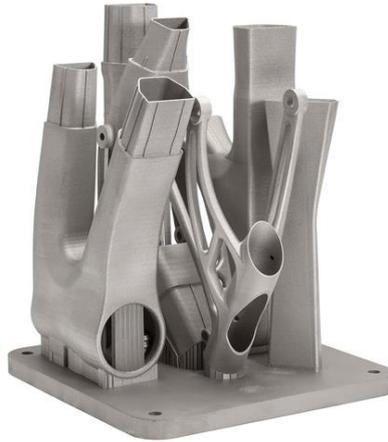
Hace 15 años aproximadamente, el acero era el material mas utilizado para los cuadros de bicicleta, aportaba una buena rigidez con un peso aceptable, pero con la introducción del aluminio, que ofrece una mejor relación peso-resistencia y mayor amortiguación, a pesar de un incremento del precio, le ganó terreno al acero, y ahora es poco común ver bicicletas de montaña con cuadro de acero.

2. Titanio

Es un metal de transición de color gris plateado, tiene baja densidad, gran dureza, resistente a la corrosión a temperatura ambiente y es alotrópico, es decir, dependiendo a la temperatura que se encuentre tiene una forma u otra. Tiene una muy buena relación peso-resistencia, un alto límite elástico, gran tenacidad y resistente a las altas temperaturas. Además, gran capacidad de formar aleaciones con aluminio, manganeso o molibdeno, que les proporcionan unas mejores propiedades.

Tiene algunas desventajas, su principal inconveniente es su elevado precio, difícil mecanización y alta reactividad química a elevadas temperaturas con el oxígeno o el nitrógeno. Es por esto que resulta complicado soldar los tubos y se requiere hacerlo en cámaras de vacío o llenas de gas argón.

Con la aparición de las impresoras 3D se han conseguido fabricar cuadros de titanio, como el que se puede apreciar en la imagen. La empresa de bicicletas Empire Cycles consiguió crear un cuadro compacto mediante el proceso de optimización topológica, consiguiendo una forma óptima. La empresa afirmó: “El nuevo sistema de fabricación permitirá que el cuadro sea más barato”, ya que una de las razones de el elevado precio de las bicicletas de este material es su complejidad de fabricación. El resultado fue un cuadro resistente y ligero, de 1,4 kg, reduciendo en mas de un 30% el peso del modelo de aluminio.

Ilustración 18. Primer cuadro de titanio impreso en 3D

Fuente: <https://www.solobici.es>

A pesar de sus desventajas, es un material muy utilizado en la industria aeroespacial, en la se requiere que una resistencia elevada y mínimo peso. En la industria de la bicicleta también es usado, aunque de forma reducida, casi de manera artesanal. Destaca su uso en piezas de tornillería, ya que con un peso mínimo aguanta grandes esfuerzos. Algunas bicicletas de montaña profesionales están hechas de titanio, resiste mejor a los impactos y a la torsión que los demás materiales, absorbe muy bien las vibraciones.

3. Fibra de carbono

Este material se fabrica superponiendo láminas flexibles compuestas de centenares de fibras de carbón que son calentadas con precisión. Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales con distintas propiedades, que se juntan para dar un elemento que mejora estas propiedades sin alterar su composición química. Están los plásticos reforzados con fibras (FRP) o materiales compuestos de matriz polimérica (PMC).

Las fibras de carbono se producen a partir de dos tipos de materias primas, las fibras PAN (poliacrilonitrilo), fibra polimérica de origen textil; y las fibras PITCH, que se obtienen de la brea de alquitrán o de petróleo purificado. Las fibras PAN son las que más se utilizan para fabricar la fibra de carbono, aunque las pitch sean más rígidas pero más frágiles.

Las propiedades son su baja densidad y su elevada resistencia, además de un coste bajo en comparación con otras fibras. Como matriz polimérica se utiliza la resina de epoxi. Ambos

materiales se unen dando un material compuesto por un porcentaje de fibras de entre el 10 y el 60%, a partir de valores superiores al 65% se consiguen peores propiedades estructurales.

En función de la temperatura alcanzada en el tratamiento térmico final se clasifican en tres tipos de fibra: tipo I, se alcanzan temperaturas superiores a los 2000°C, tipo II, temperaturas hasta los 1500°C, y las de tipo III, que llegan hasta los 1000°C. Cada una de ellas presenta unas propiedades:

- Tipo I o fibras de alto módulo (HMF): presentan un módulo elástico elevado, alrededor de 400 GPa, y un alargamiento de rotura bajo. Son las más rígidas y necesitan mayor temperatura en el tratamiento, el coste para su obtención es elevado.
- Tipo II o fibras de módulo intermedio (IM): módulo elástico no tan elevado, en torno a 300 GPa. Su coste de elaboración es inferior.
- Tipo III o fibras de alta tenacidad (HT): tienen un módulo de elasticidad bajo, 100 GPa, y gran resistencia a la tracción, en torno a 4GPa. Son conocidas también como fibras de súper alta resistencia (SHT).

Las propiedades más relevantes de la fibra de carbono son su resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia a la fatiga y amortiguación de vibraciones. Estas propiedades hacen que pueda ser utilizada en la industria aeroespacial, el transporte, robots e incluso en la medicina.

En la industria del ciclismo actual es el material más utilizado, a pesar de que hace unas décadas no era muy común. Este material es más costoso que el aluminio y el acero, pero tiene la ventaja de que puede adquirir cualquier forma geométrica, en la alta competición se ven tubos curvos. Su mayor ventaja es la relación peso-rigidez, este material se contrae o expande en función de la tensión aplicada.

También tiene desventajas, es frágil a los impactos, un golpe directo puede fracturar el cuadro permanentemente. La calidad depende del grosor y la colocación de las fibras.

4. Grafeno

Es un material que está todavía en crecimiento, pero apunta que será el futuro de muchas industrias. Es un material que proviene del grafito y está compuesta por carbono puro, con átomos organizados de forma densa en láminas de un patrón regular hexagonal. Tiene unas propiedades excepcionales, es más resistente que el carbono, tiene elevada flexibilidad y elasticidad, además de una gran ligereza. Su mayor inconveniente a la hora de introducirlo de manera regular en el mercado es su elevado precio.

A pesar de que su precio hace que no sea posible fabricar un cuadro de grafeno, algunas empresas han empezado a introducirlo combinándolo con fibra de carbono y otros elementos.

5. Aluminio

Se trata de un metal blanco, es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre y uno de los metales más abundantes en la tierra. El aluminio y sus aleaciones, presentan unas propiedades que lo sitúan como una de los materiales más versátiles y económicos para una gran variedad de usos y aplicaciones, desde papel de aluminio para uso doméstico hasta su uso en la industria aeroespacial.

Se trata del material más utilizado actualmente para la fabricación de bicicletas, es más ligero que el acero, más barato que el titanio y posee unas propiedades mecánicas buenas. El uso y fabricación de este metal ha mejorado con los años y se ha logrado conseguir propiedades específicas en los cuadros al variar los espesores de los tubos y la geometría de las secciones.

Este es el material que utilizaremos para la modelización de nuestro modelo, por ser un material muy utilizado en las bicicletas de gama media y ser asequible de precio. En este cuadro se muestran las propiedades de este metal.

Ilustración 19. Propiedades del aluminio

Símbolo	Al
Número atómico	13
Densidad	2,70 g/cm ³
Masa atómica	26,98 g/mol
Calor específico	0,92 J/g K
Conductividad eléctrica a 20°C	34,6 m/Ωmm ²
Punto de fusión	660 °C
Punto de ebullición	2467 °C
Módulo de elasticidad (E)	70000 Mpa
Módulo de cizalla(G)	26300 Mpa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,33
Dureza Brinell	21-40 HB

Fuente: Elaboración propia con los datos obtenidos de <https://www.ingmecanica.com>

Estas son las propiedades del aluminio puro o aluminio comercial, pero dependiendo de el elemento que se añade a la aleación las propiedades varían mucho. La razón principal por la que el aluminio se combina con otros elementos es para conseguir mayor resistencia sin incrementar el peso. Las principales propiedades del aluminio con sus aleaciones son la ligereza, es el segundo metal para uso estructural más ligero después del aluminio; la resistencia mecánica, la aleación con algunos metales consigue ser tan resistente como el acero; la elasticidad, resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y no inflamable.

El aluminio y sus aleaciones son agrupados en series. Esta serie consiste en 4 dígitos, en la cual el primer dígito representa el grupo de la aleación, el segundo los límites de la impureza, si es cero no tendrá impurezas, y el tercer y cuarto dígitos representan el valor en décimas y centésimas del porcentaje de aluminio. A continuación, se describen las series y sus principales características.

- Serie 1xxx: Aluminio al 99,0 % o más. Al tratarse de aluminio puro, presenta una alta conductividad térmica y eléctrica, maleabilidad y resistencia a la corrosión, por eso es utilizado especialmente en los campos eléctricos y químicos. Sus impurezas más comunes son el hierro y el silicio.

- Serie 2xxx: representa la aleación del aluminio con el cobre como principal elemento, el magnesio puede estar presente como adición secundaria. Requieren de un tratamiento térmico para obtener sus propiedades óptimas. Las aleaciones de esta serie no presentan muy buena resistencia a la corrosión, como si lo hacen las demás, buena relación resistencia-peso. Se utiliza en la industria aeroespacial.
- Serie 3xxx: aleaciones de aluminio con manganeso. No son tratables térmicamente, tienen una resistencia de hasta un 20% mayor que las de la serie 1xxx. El manganeso se añade eficazmente al aluminio hasta 1,5% aproximadamente, por lo que en estas aleaciones el porcentaje de manganeso va del 1 al 5%.
- Serie 4xxx: el principal elemento de la aleación en las aleaciones de la serie 4 es el silicio, puede encontrarse en proporciones de hasta el 12% sin llegar a producir fragilidad. Se utilizan en alambres de soldadura, no suelen ser tratables térmicamente. Las aleaciones con gran cantidad de silicio adquieren un color grisáceo oscuro, éstas son utilizadas en arquitectura.
- Serie 5xxx: el principal elemento en esta serie es el magnesio. El resultado es un material endurecido por acritud, como consecuencia de la deformación en frío, que aumenta su resistencia, actuando como mejor endurecedor que el manganeso, 0,8% de Mg equivalen en dureza a lo que se conseguiría con 1,25% de Mn. Además, esta aleación posee buena resistencia a la corrosión marina y buena soldadura.
- Serie 6xxx: éstas contienen silicio y magnesio en las proporciones adecuadas para la formación de siliciuro de magnesio, este compuesto hace que sean tratables térmicamente. Menos resistentes que las aleaciones de las series 2 y 7, pero tienen buenas soldabilidad, resistencia a la corrosión y maquinabilidad. Son utilizados en ventanas, lámparas, marcos y la industria de la arquitectura.
- Serie 7xxx: el componente que se añade es el Zinc en porcentajes del 1 al 8%, se pueden añadir también, pero en menores cantidades, cobre, cromo o escandio,

mejorando las propiedades. Estas aleaciones se utilizan en móviles y en piezas que soportan altas tensiones. Son tratables térmicamente y adquieren una elevada resistencia.

- Serie 8xxx: estas son aleaciones con una variedad de composiciones químicas. Por ejemplo, en aleaciones con litio se consigue una baja densidad y alta rigidez, que se utiliza en aplicaciones aeroespaciales, como helicópteros; también aleaciones Al-Fe-Ce en las que se consigue un mayor rendimiento a elevadas temperaturas.

Actualmente se utilizan algunas de estas aleaciones que hemos visto para fabricar cuadros de bicicleta, las que presentan mejores características para el uso en este sector son las series 6 y 7. Las más utilizadas dentro de esta serie son la 6061 y la 7005, aunque también son frecuentes la 6063, 6066 y 7075, esta última se utiliza sobre todo en componente ya que, por sus propiedades, no es soldable. La aleación 7005 es más fácil de tratar que la 6061, lo que permite obtener geometrías más precisas, sin embargo, la aleación 6061 es más dura y resistente, aunque menos flexible. Con respecto a las propiedades mecánicas, las aleaciones de la serie 7xxx alcanzan mayor resistencia a tracción, llegando a soportar 504 MPa, comparados con los 290 MPa que son capaces de soportar los de la serie 6xxx.

Adicionalmente al código numérico, se tiene una denominación alfabética que se utiliza para identificar los estados de entrega o *tempers* del aluminio resultantes de los tratamientos a los que es sometido. El sistema se basa en los tratamientos utilizados para las diversas aleaciones y adopta la forma de letras, que se pone seguida del código numérico. Puede seguir a la letra uno o dos números que indican subdivisiones de estos tratamientos. Los principales sufijos de los estados de entrega son los siguientes:

- F: cómo son fabricadas (en frío, en caliente o por fundición)
- O: recocido
- W: solubilizada
- H: endurecidas por deformación al ser trabajado en frío
- T: tratada térmicamente

El tratamiento T-6 es el tratamiento más utilizado en la fabricación de tubos de aluminio para bicicletas. Este temple consiste en un tratamiento térmico, enfriado al agua tras extruir y

envejecimiento artificial, lo que consigue un endurecimiento en el material resultante que mejora sus propiedades.

Finalmente, el material que se ha escogido para la fabricación del cuadro es el aluminio 6061-T6, por tener buena resistencia mecánica, buena soldabilidad y ligereza.

1.5 MÉTODOS DE FABRICACIÓN

No sólo el material es importante a la hora de estudiar el cuadro, en nuestro caso se ha elegido el aluminio, otro aspecto que limita el diseño del producto es el método de fabricación.

Las técnicas más usadas en la fabricación de bicicletas son la fabricación mediante tubos soldados, la fabricación con materiales compuestos por fibras, la fabricación por hidroconformado y la fabricación mediante deposición aditiva de material. De éstas, la de fabricación con materiales compuestos por fibras tiene a su vez dos métodos, mediante racores y tubos, y la fabricación en monocasco, pero no se tendrán en cuenta, debido a que es utilizada estas técnicas para los cuadros de fibra de carbono.

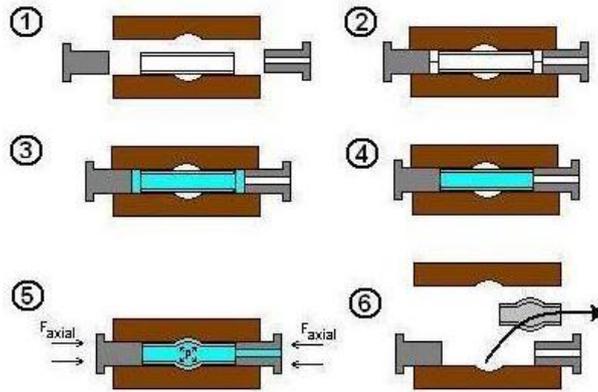
En este proyecto, como se centra en los cuadros de aluminio, explicaremos las diversas técnicas de fabricación para este material. Antiguamente, el único método era mediante tubos soldados, pero con el avance de la tecnología y el desarrollo de la industria han surgido nuevos métodos.

1.5.1 Fabricación por hidroconformado

Este proceso consiste en dar forma a un metal mediante presión de agua utilizando aceite, gracias a este método se consigue reducir peso en muchas partes del cuadro y dar resistencia a las partes de mayor uso y fricción.

Los pasos de este proceso se pueden ver en la figura. Primero se introduce el tubo metálico en la matriz, que tendrá en las paredes la forma que se busca conseguir, se cierra la matriz por un proceso hidráulico. Después, se cierran las extremidades del tubo mediante punzones de sellado y se inicia el llenado. El material se expande debido al aumento de presión que ejerce el líquido que está en el interior del tubo, mientras la acción de una fuerza de compresión en dirección axial se ejerce haciendo avanzar los punzones dándole la configuración final a la pieza. Por último, se extrae la pieza de la matriz con la forma deseada.

Ilustración 20. Fases del proceso de hidroconformado



Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/hidroconformado>

Este proceso es útil para la fabricación de piezas complejas, ofrece una mayor durabilidad a las piezas. Consigue una reducción en el peso, reduciendo o variando los espesores de los tubos. Pero también tiene algunas desventajas, el precio del equipo para el hidroconformado es elevado, tiene un elevado tiempo de ciclo y una baja productividad.

Pero fue la demanda de componentes ligeros y flexible la que hizo que esta técnica se popularizara en las industrias de automóviles, componentes deportivos e incluso aeroespaciales. Es considerado un proceso de alta precisión.

1.5.2 Fabricación por soldadura

Los cuadros de aluminio que son fabricados por soldadura previamente tienen un proceso de moldeado de los tubos en prensas, esto permite obtener tubos de distintas secciones.

El aluminio y sus aleaciones pueden soldarse mediante muchos de los procesos de soldeo por fusión, como TIG, MIG, haz de electrones, etc., por soldeo blando, soldeo fuerte y soldeo en estado sólido, explicaremos las más utilizadas.

Eso sí, no todas las aleaciones de aluminio son soldables, son soldables la minoría, pero además de ser soldables necesitan que puedan ser tratables térmicamente para aliviar tensiones al final del proceso de soldadura. Los tratamientos térmicos a los que se suelen someter los cuadros después de la soldadura son la solubilización y el endurecimiento por precipitación.

El aluminio y sus aleaciones tienen una propiedad que no es favorable a la soldadura, tienen una gran conductividad térmica, por lo que necesitarán un aporte térmico elevado para poder ser soldados. Los tubos de gran espesor requieren de un calentamiento, que disminuirá el aporte térmico requerido para la soldadura. Lo contrarresta el bajo punto de fusión con respecto a otros materiales como el acero o titanio, por lo que consume menos energía al cortar las piezas por láser.

Antes de la soldadura es importante preparar la superficie. Hay que limpiar la pieza, cualquier resto de óxido o grasa puede empeorar la calidad de la soldadura, para preparar las piezas se utiliza chafinado por plasma y corte, también puede usarse alcohol con un trapo. Una vez seco el material puede empezar a soldarse.

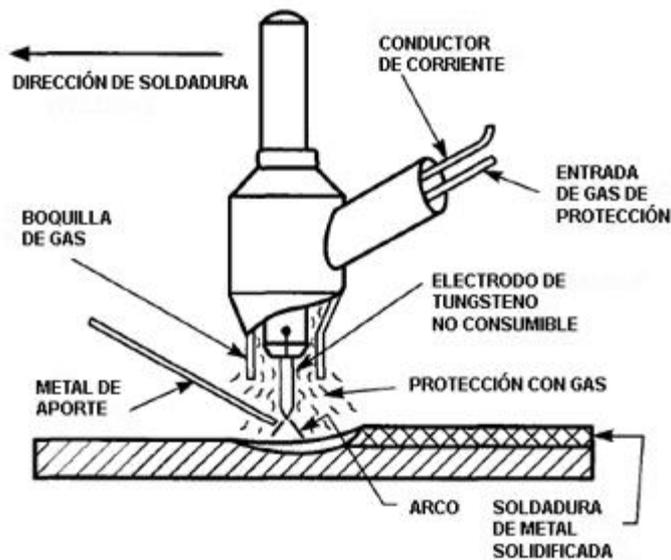
- Soldeo TIG

Este es el proceso más utilizado para soldar aluminio es uno de los procesos que proporcionan mejor calidad al producto acabado, pero es también exigente y difícil de realizar. Es difícil un proceso de automatizar, sobre todo por la dificultad de soldar las líneas curvas, los soldadores de aluminio cualificados y especializados podrían soldar hasta 15 cuadros por turno.

Es un tipo de soldadura que puede controlar la corriente, por lo que es muy útil para evitar el sobrecalentamiento y las quemaduras. Para la soldadura TIG de aluminio se utiliza gas de protección, normalmente argón, aunque se puede añadir un 3% de helio para dar mayor estabilidad al arco. A continuación, se explican brevemente los pasos a seguir para soldar con TIG el aluminio:

1. Seleccionar el amperaje adecuado. Por cada 0.025mm de grosor en la pieza de aluminio se necesita 1 amperio.
2. Regular el soplete. Tienen un botón que hay que pulsar para crear el arco eléctrico y poder empezar a soldar, hay que apoyar la punta del electrodo sobre la pieza de metal y mantenerla a unos 5mm.
3. Crear el charco. Fundir el material y crear el charco de soldadura que se necesita para llenar la unión.
4. Esperar a que se enfríe una vez realizada la soldadura.

Ilustración 21. Esquema de soldadura TIG



Fuente :<http://www.sapiensman.com/>

- Soldeo MIG

Consiste en un soldeo de muchas pasadas en las que se irá aumentando la tensión progresivamente en cada pasada, la primera de ellas tendrá la tensión mínima necesaria que permita la fusión y limpieza de la pieza.

La soldadura MIG utiliza un electrodo de metal que sirve como material de relleno para la soldadura y se va consumiendo durante la misma. Tiene además un gas, inerte o activo, se suele utilizar el argón, que lo protege de la atmósfera. Se utiliza una técnica de soldeo hacia adelante, comienza por la limpieza y después la fusión del metal, inclinando la pistola unos 10º aproximadamente, en el soldeo de dos piezas se dirige hacia la pieza de mayor espesor. Y, para terminar la soldadura se cambia el sentido o se aumenta la velocidad de soldeo, cortando así el cordón de soldadura.

Las imperfecciones más comunes en esta técnica cuando se trabaja con aluminio son las grietas que se pueden formar en el cráter, la falta de fusión y la porosidad.

- Soldeo por OXIGAS

Se recomienda que este método se utilice solo en reparaciones o en soldaduras de poca importancia, siempre que los espesores serán menores de 25 mm y mayores de 0,7 mm. Se trata de un proceso simple, pero es un proceso lento y se deforma de manera muy fácil.

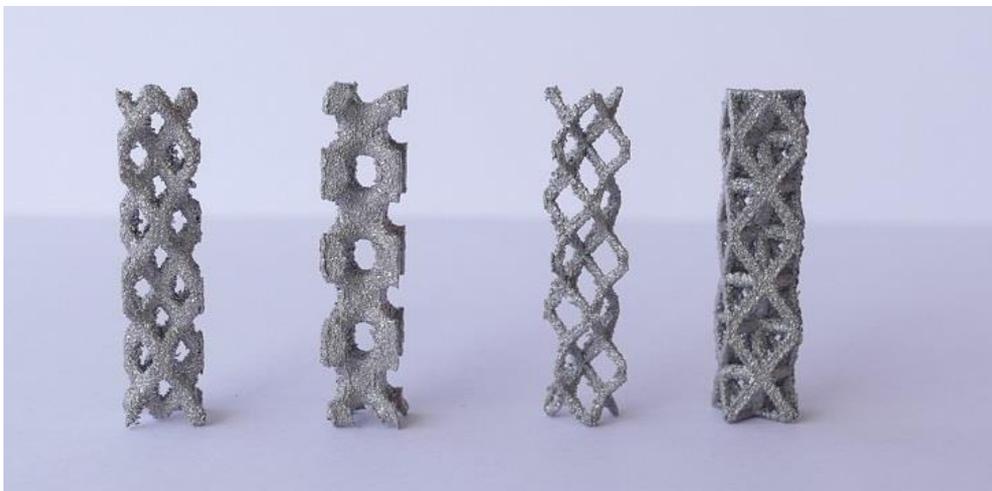
Se utiliza acetileno con una llama neutra como combustible, reduce la formación de óxido si posee gran cantidad de acetileno. Las piezas con mas de 5 y hasta 12mm de espesor se realizan chaflanes en V, no es recomendable usar plazas de respaldo ni uniones de solape.

Al finalizar la soldadura, se eliminan los residuos del fundente, bañando la pieza en agua con una pequeña proporción de ácido sulfúrico.

1.5.3 Fabricación aditiva

Se trata de un nuevo método que ha supuesto una revolución en sectores como la medicina, aeronáutica, automoción... Una de las innovaciones más conocidas de la fabricación aditiva es la impresión de materiales 3D, con un gran potencial enfocado al futuro.

Ilustración 22. Técnica de fabricación aditiva con metales



Fuente: <http://mizaradditive.com/>

Tiene muchas ventajas frente a la industria tradicional, permite fabricar geometrías complejas simplificando el número de pasos de producción y de maquinaria. Se reduce el plazo, produce de manera económica y supone un ahorro de material, no se desaprovecha nada, todo el material va a la pieza, aunque es cierto que la inversión inicial es elevada. Este método tiene una gran precisión y calidad.

En 1987, se implantó la fabricación aditiva con metales, hasta hoy día ha sido una aplicación muy demandada. Para este proyecto t, se aplicará este método trabajando con aluminio, ya que éste es un material con buena resistencia estructural, con una buena relación resistencia-peso y una baja temperatura de fusión, aunque como inconveniente cabe destacar que tiene una elevada conductividad térmica. Gracias al gas inerte que lo protege evita la aparición de nuevos gases que produzcan poros en el momento del enfriamiento.

La deposición capa a capa del metal ha favorecido la aplicación en otras nuevas tecnologías. Gracias a este método de fabricación aditiva se puede fabricar y se analizará un cuadro fabricado en un pieza hecha de aluminio, el cuál no necesita soldaduras debido a la geometría monocasco que formará el cuadro.

A continuación, se analizan y se describen brevemente los tres tipos de tecnología más utilizados en la fabricación aditiva en metal:

➤ Selective Laser Melting (SLM)

O fusión selectiva por láser, esta técnica aditiva consiste en depositar, inicialmente, una capa de polvo metálico de unas décimas de milímetro en una cuba, en las áreas de polvo metálico seleccionadas se les da con un láser produciendo así la fusión y posterior solidificación. Se aplica una nueva capa de polvo en la parte superior y se repite este proceso tantas veces como se necesite hasta completar la pieza.

Con este método se consiguen piezas de geometrías complejas con buena resistencia y gran densidad. Se puede hacer con acero, titanio aluminio y níquel.

➤ Electron Beam Melting (EBM)

O fusión de polvo metálico por haz de electrones, este proceso consiste en ir depositando capa a capa polvo metálico que va siendo fundido por la incidencia controlad de un haz de electrones dándole así forma a la pieza. Se realiza al vacío evitando que se contamine con la atmosfera pudiendo ocasionar oxidación del material.

➤ Laser Cladding

Utiliza también el metal como materia prima, se funde directamente el polvo metálico proyectado sobre una capa base sin variar la concentración ni mezclando el metal. Sólo

se funde una pequeña capa del sustrato, con un máximo de 2mm. Es por esto por lo que esta técnica se utiliza para mejorar las propiedades de una pieza o repararla, actuando como complemento.

Gracias a su papel reparador, es una técnica muy útil en la aeronáutica, automoción o herramientas.

El método de fabricación aditiva presenta algunas ventajas frente a los demás métodos vistos anteriormente. Permite fabricar piezas con geometrías complejas, tienen un menor impacto en el medioambiente, aún cuando se combinan materiales y, por último, se reducen los errores de montaje y los costes.

A su vez, presenta algunas desventajas que hacen que no sea el método más utilizado en la industria de la bicicleta. Adquirir los equipos que aplican esta tecnología tienen un coste elevado, se requiere una cámara de vacío y, el que más influye es que el tamaño de las piezas que se pueden fabricar es limitado.

A pesar de que con el método de fabricación aditiva se obtendrían ciertas ventajas tanto en el diseño como en el análisis del cuadro, como por ejemplo reducción de peso o mejor reparto de la tensión debido a que al ser un cuadro monocasco no cuenta con zonas críticas ni aristas vivas, el método que se utilizará en este proyecto será la fabricación mediante tubos soldados. Para realizar el método de fabricación aditiva habría que realizar un desembolso inicial muy grande comparado con los gastos que supone la fabricación por soldadura.

La soldadura es el método más usado cuando se trata de bicicletas fabricadas en aluminio, es el más barato de realizar y se obtienen buenos resultados.

2. AMORTIGUACIÓN. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La introducción de las suspensiones a la bicicleta ha sido el mayor avance y evolución que se ha producido en el sector de las bicicletas. Para llegar a las suspensiones, primero se pasó por las horquillas telescópicas.

Las suspensiones son los elementos cuya función principal consiste en mantener las ruedas en contacto con el terreno todo el tiempo, consiguiendo así una mayor tracción, comodidad y control de la bicicleta. Al mismo tiempo, con las suspensiones se busca que el cuadro mantenga una trayectoria rectilínea con respecto al suelo, absorbiendo las irregularidades del terreno.

2.2 HISTORIA

Antiguamente se buscaban algunos métodos para intentar mejorar la comodidad del ciclista, pero no fue hasta los años 80 hasta que no surgieron las primeras suspensiones. Primero se encontraban sólo en las horquillas delanteras, y posteriormente llegaron las bicicletas con doble suspensión.

Al pasar de las ruedas grandes, existentes en el siglo XIX, a las de 26 pulgadas se transmitían mucho las irregularidades, por lo que surgió la necesidad de mejorar este aspecto además de la comodidad. Con la llegada del neumático y la mejora de las carreteras, ya no existía el problema de confort de manera tan grave, por lo que se paró el uso de las suspensiones. Y hasta la llegada de las mtb no fue hasta que se volvió a ver la necesidad de poner suspensiones a estas bicicletas, para poder circular por cualquier tipo de terreno. Primero surgieron las suspensiones delanteras.

2.2.1 Introducción y evolución de la suspensión delantera

La adaptación a la bicicleta fue sencilla, tuvieron mucho éxito en el mercado. Podían hasta montarse en las bicicletas sin necesidad de variar la geometría. La primera empresa en incorporar amortiguación en las horquillas fue la conocida marca norteamericana RockShox, sigue siendo una de las más importantes actualmente.

Aunque se intentaron varios diseños, salieron adelante las horquillas telescópicas, usaban aire como elemento elástico, y un sistema abierto de aceite para controlar la amortiguación. Luego aparecieron los elastómeros para sustituir el aire. Eran suspensiones sencillas, sin ni siquiera control de rebote. Los recorridos de las primeras suspensiones, en 1989, no llegaban a los 5 centímetros.

La primera suspensión fabricada por RockShox, tenía poca rigidez y elevado peso, la RS-1. Con 49 mm de recorrido, tenía muelles y amortiguación de aceite. En la competencia se encontraba la marca Manitou, su primera horquilla estaba fabricada con elastómeros, 38 mm de recorrido y menor mantenimiento que la RS-1.

Fue en 1991, cuando se empezaron a introducir horquillas monotubo con sistema de amortiguación en el mismo tubo de dirección, destacando marcas como Marzocchi, Scott y las anteriores. Los recorridos aumentaron, llegando hasta las 65 mm, y ya era común que tuviesen bloqueo y regulación de la compresión.

A finales de la década de los 90, Marzocchi introdujo la línea de horquillas Bomber, supuso un gran avance y revolución gracias a su buen funcionamiento. RockShox, por su parte, sacó las primeras horquillas de DownHill, recorridos de hasta 120 mm y doble pletina, con doble cámara de aire. Se notó el avance en el peso.

A comienzos del siglo XXI, se aumenta la venta y producción de las horquillas, y esto se notó en el avance tecnológico y evolución. Los recorridos siguen aumentando, sistemas electrónicos de bloqueo, y el sistema Terrallogic, supuso una revolución en el mercado. Este

sistema inteligente, que fue creado en 2012 y ha seguido mejorando hasta hoy día, actúa cuando el movimiento en la amortiguación proviene de las irregularidades del terreno y no lo hace cuando el movimiento lo provoca el ciclista, consiguiendo una mejor transmisión de potencia y mayor eficiencia.

Con la aparición de las ruedas de 29", tuvieron que adaptarse y sufrir un cambio en las horquillas, haciendo que se retrasase el cambio en los tamaños de rueda.

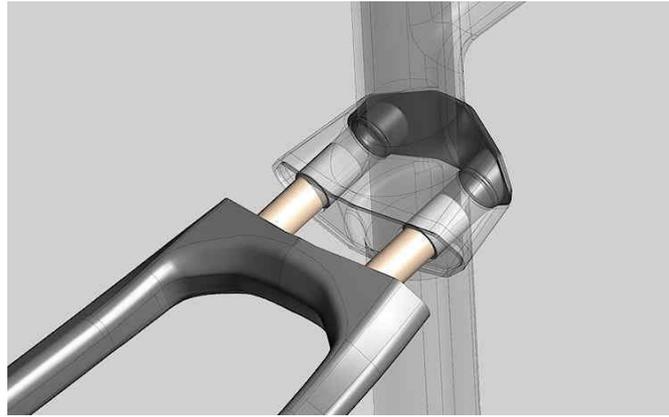
2.2.2 Introducción y evolución de la suspensión trasera

La doble suspensión fue diseñada para ir por los caminos más complicados con la mayor comodidad posible, proporcionan gran estabilidad, control y, con el avance en la tecnología, buena tracción.

Cuando se empezó a trabajar las suspensiones en las horquillas, en la década de los 80, poco tardaron en aparecer las primeras bicicletas con doble suspensión, aunque eran bicicletas pesadas, poco refinadas y la frenada afectaba de manera negativa sobre el comportamiento de la suspensión.

Se fueron desarrollando diferentes sistemas, siempre teniendo en cuenta los factor de peso y eficiencia. Con la aparición de los primeros modelos, se empezaron a desarrollar de manera más activa las modalidades de DH, enduro o freeride.

La primera invención fue el sistema *Softail*, la suspensión la proporcionaban la flexión de las propias vainas, con recorridos de menos de 40 mm, pero útil para lo que se buscaba, ligereza, rendimiento y comodidad. Algunas marcas como Trek o BMC, están recuperando y mejorando este sistema en sus bicicletas.

Ilustración 23. Esquema prototipo del sistema softail

Con el avance en el mercado y mejoras técnicas, Specialized inventó el sistema FSR para implantarlo en sus bicicletas de doble suspensión. Un sistema revolucionario con válvula de inercia que deja actuar al amortiguador cuando recibe esfuerzos debidos a las irregularidades del terreno, y no cuando provienen del movimiento de pedaleo del ciclista.

En el año 2008, el ciclista Christophe Suaser, consiguió ser el primer ganador del campeonato del mundo de Cross-Country utilizando el sistema de doble suspensión, con esta bicicleta.

Ilustración 24. Bicicleta epic comp de Specialized

Fuente: <https://www.specialized.com/es/es/epic-comp/p/21855>

Con el tiempo se fueron aumentando los recorridos y ajustándolos a las distintas modalidades, buscando siempre la máxima absorción de energía, minimizar la interacción

de la suspensión con el pedaleo y la comodidad, y esto ha hecho que surjan distintos sistemas que se verán a continuación, en el punto 3.

2.3 DEFINICIÓN

El amortiguador es un elemento que ha marcado claramente la evolución del ciclismo de montaña. Gracias a este elemento existe el concepto de suspensión en las bicicletas. Hay distintos tipos de amortiguador, desde los primeros modelos de aceite hasta las innovadoras suspensiones de autorregulación electrónica. A continuación, se muestran y se explican como funcionan los principales tipos.

- Suspensiones de aire

Es el aire introducido por una válvula lo que se comprime dentro del amortiguador. Dependiendo de la cantidad de aire de la que disponga, la compresión será mayor o menos. La extensión puede realizarse mediante algún gas en otra cámara para darle progresividad, como el nitrógeno, con aceite o aire.

Las medidas, en estos amortiguadores, se muestran mediante dos valores: en primer lugar, la longitud total del amortiguador expresada en milímetros, y segundo, el recorrido del amortiguador.

Ilustración 25. Amortiguador de aire Fox Float CTD Performance



Fuente: <http://www.bike-chollos.com>

- Suspensiones de muelle

El muelle dota de mayor rigidez y compresión al amortiguador, además el muelle se utiliza para regular la compresión. Aunque, en su interior también hay aceite, que se combina con aire utilizado para regular el flujo de aceite de una cámara a otra. Este tipo de suspensiones es muy útil cuando se precisa de recorridos largos.

En las suspensiones de muelle, la manera de mostrar las medidas es iguales a las del amortiguador de aire, pero además se añaden dos valores adicionales, la constante elástica k , expresada en libras de presión, que hace referencia a la presión necesaria para comprimir el amortiguador una pulgada; y la longitud máxima que puede llegar a comprimirse el muelle, es decir, la carrera, en pulgadas también.

Ilustración 26. Amortiguador de aire con muelle de acero



Fuente: <https://www.hibike.es/>

- Suspensiones de botella o depósito separado

Este tipo de suspensiones se utiliza cuando se requiere de grandes recorridos en amortiguadores de pequeñas longitudes. Al tener los depósitos separados, permiten una mayor compresión debido a la gran capacidad de fluido, que suele ser aire u otro gas, en el interior. El aire es comprimido por el paso del aceite.

Ilustración 27. Amortiguador de depósito separado

Fuente: <https://www.bikesworldrevista.es/>

- Suspensiones de sistema electrónico

La parte electrónica en estas suspensiones de el control de ajuste. Llevan incorporado un sistema de tres sensores que recoge datos cada décima de segundo enviándolos a un ordenador interno, que con estos datos regula automáticamente la amortiguación y rigidez de la suspensión en función del terreno por el que se circule. Algunas marcas trabajan con este tipo de suspensiones, como el DPS iRD de Fox, o el Monarch RT3 de Rock Shox.

Además, este nuevo sistema incluye además un nuevo método de mostrar las medidas basado en el sistema métrico. Desde 2017, se aplica un método que introducirá a las longitudes y medidas de su hardware, tornillos y casquillas, en medidas del sistema métrico, simplificando así las elecciones de compatibilidad con cada cuadro.

Ilustración 28. Suspensión DPS iRD de Fox

Fuente: <https://esmtb.com/>

Para lograr cumplir las funciones, las suspensiones están compuestas por un resorte y un amortiguador. El resorte se encarga de absorber la energía producida por el desplazamiento de las ruedas devolviéndolas a su posición inicial cuando finalice la carga que produzca su desplazamiento, ; y, el amortiguador hace que las suspensiones no estén en continuo movimiento de extensión y compresión mientras la bicicleta va en movimiento.

Los factores que influyen en el resorte y el amortiguador son la fuerza y la velocidad respectivamente. Cuanto mayor sea la fuerza aplicada mayor será la compresión del resorte, y a mayor velocidad de la bicicleta más rígido estará el amortiguador. Esto permite regular el sistema de cada uno de manera independiente. Cuando el origen del problema proviene por la fuerza, afectando al recorrido de la suspensión el factor a tener en cuenta es el resorte. Por otro lado, si el problema está relacionado con la velocidad, afectando a los rebotes, oscilaciones, etc., el sistema que hay que regular es el amortiguador.

Estos valores de rigidez, aportado por el resorte, y amortiguación son variables, es decir, pueden modificarse gracias a las regulaciones que incorpora la suspensión. Según la presión de aire que se introduzca en la suspensión, regula el valor de la rigidez; y, con un mando situado en la parte inferior de las horquillas o en un extremo de las suspensiones se modifica el valor de la amortiguación. En las fotos que se muestran a continuación, se muestra cómo se modifican estos parámetros.

Ilustración 29. Cómo y dónde regular la presión



Fuente: <https://www.mountainbike.es/bici-facil/>

Ilustración 30. Cómo y dónde regular la amortiguación



Fuente: <https://www.pedalesyzapatillas.com/>

2.3.1 Valores de k y c

La función del muelle en el sistema es como la de una fuerza resistente y el amortiguador representa un disipador de energía. El resorte o muelle genera una fuerza que es proporcional al desplazamiento de la masa no suspendida, y el amortiguador depende de la velocidad que tenga el sistema. Estos componentes, se relacionan directamente con los conceptos de dinámica de vibraciones de k y c . La rigidez del muelle representa la k , y la amortiguación se refiere a la c .

Para modelar un amortiguador hay que tener en cuenta tres parámetros fundamentales. El resorte actúa según la ley de Newton:

$$F = k \times x$$

Donde F es la fuerza aplicada, k es la constante elástica del resorte y x la elongación de éste. La constante elástica representa la rigidez. El segundo parámetro es la longitud libre del muelle, que es la compresión que tiene el muelle cuando no tiene aplicada ninguna fuerza, esto depende del SAG, que a su vez depende del peso del ciclista. Y por último, el tercer parámetro es el amortiguamiento, que viene definida mediante la siguiente ecuación:

$$F = c \times v$$

Donde F es la fuerza, C es el amortiguamiento del resorte y v la velocidad relativa entre los dos extremos del muelle.

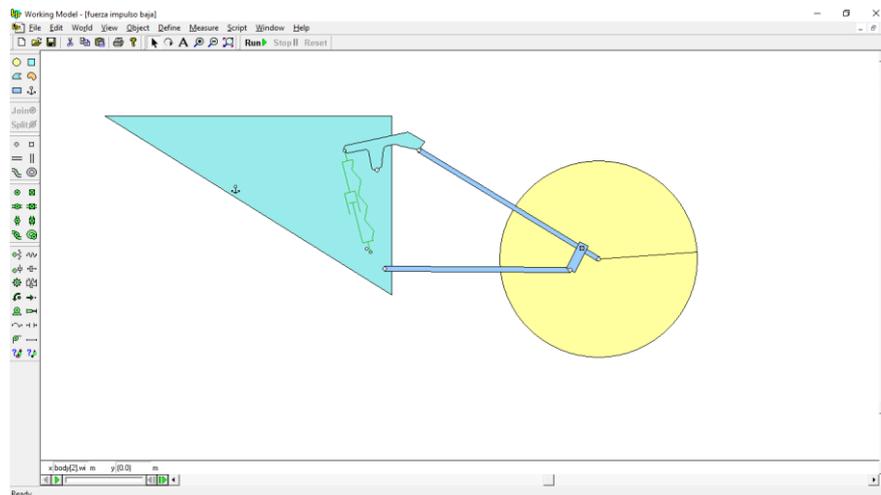
En las especificaciones de una de las suspensiones traseras del fabricante Fox nos indica que la rigidez puede tomar valores desde 250 hasta 550 libras/pulgada, variando de 25 en 25 libras/pulgadas. Aunque esto es un valor que, como se ha visto, puede variar con las regulaciones, se tomará un valor de k intermedio de 375 libras/pulgadas, que pasándolo a unidades del sistema internacional, se obtiene un valor de 65700 N/m, este será el valor que se utilizará para el modelado dinámico en Working Model.

Working Model es un programa de simulación de ingeniería de Design Simulation Technologies, trabaja con componentes mecánicos virtuales, tales como motores, resortes, amortiguadores, etc. Gracias a su espacio de trabajo 2D se pueden realizar simulaciones que se aproximan muy bien al comportamiento real de manera sencilla.

Para calcular el amortiguamiento de la suspensión se procederá por dos métodos, el analítico y el práctico, a través de la simulación. Para ello, se diseña un modelo con las masas, pares cinemáticos y mismas distancias que el sistema real, para conseguir la equivalencia dinámica. Lo importante es que se corresponda con los pares y la distancia, la forma no es determinante para el comportamiento del modelo.

En la siguiente figura se muestra el modelo creado para la simulación en Working Model. Primero se busca el punto de equilibrio del sistema, trabajando con la gravedad en el plano vertical y se saca la suspensión, sin amortiguador, de la posición de equilibrio. Al sacar la masa no suspendida de su posición de equilibrio y no haber disipación de energía, por no haber amortiguación, el sistema no se pararía nunca.

Ilustración 31. Modelo de suspensión trasera hecho en Working Model



Fuente: elaboración propia

Esta que se muestra a continuación es la gráfica que representa el desplazamiento vertical del centro de la rueda trasera. De esta gráfica se calcula el periodo, tomando el tiempo que

tarda el sistema en realizar un ciclo completo. Se obtiene $T=0,085$ s. Aplicando la fórmula:

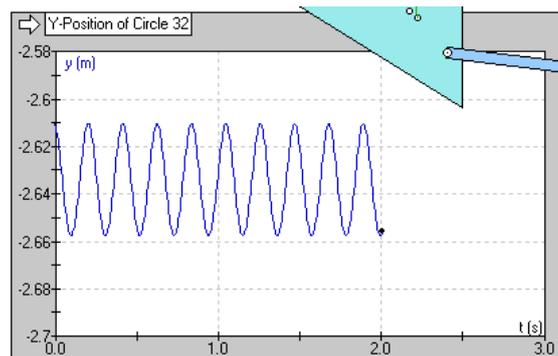
$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi}{T}, \text{ se obtiene una frecuencia natural de } 73,91 \text{ rad/s.}$$

Por otro lado, conociendo el valor de la rigidez y la masa equivalente, y a través de la fórmula:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}}, \text{ se calcula el valor de manera analítica, obteniendo un valor de frecuencia}$$

natural de 85,25 rad/s. Es una frecuencia elevada, es por eso por lo que necesita un valor alto de amortiguamiento para que no se transmitan las vibraciones y se disipe la energía lo más rápido posible, situando el centro de la rueda en su posición inicial. En la siguiente gráfica se muestra el desplazamiento vertical que sufre la rueda trasera al sacarla de su posición de equilibrio.

Ilustración 32. Desplazamiento vertical de la rueda al sacarla de su posición de equilibrio



Fuente: elaboración propia

Se busca conseguir un comportamiento sobreamortiguado, para ello primero se calcula cuál es el valor de amortiguamiento crítico.

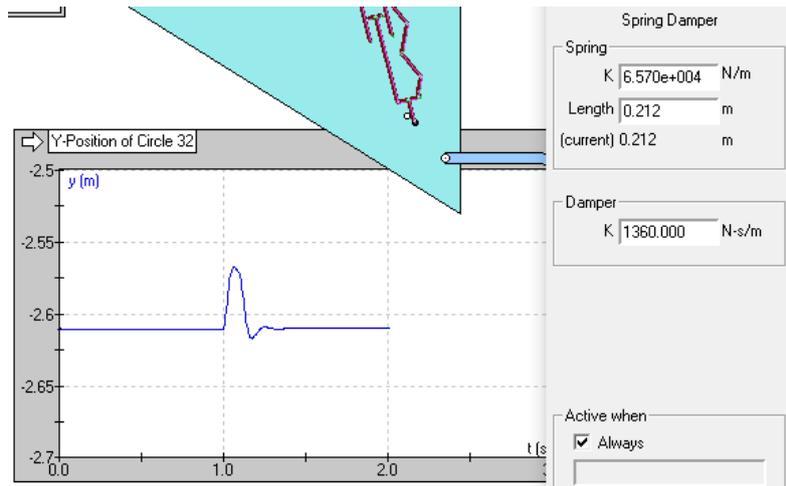
$$c_c = 2 \cdot m \cdot \omega_n$$

De esta fórmula, se obtiene un valor de amortiguamiento crítico de $1360 \frac{N \cdot s}{m}$.

Para el comportamiento de la suspensión en una bicicleta se quiere conseguir que la transmisión de las vibraciones sean lo menor posible. Para ello, habrá que elegir un valor de amortiguamiento mayor que el crítico calculado arriba. Se eligen los valores de amortiguamiento de 2000 y, otro de $500 \frac{N \cdot s}{m}$.

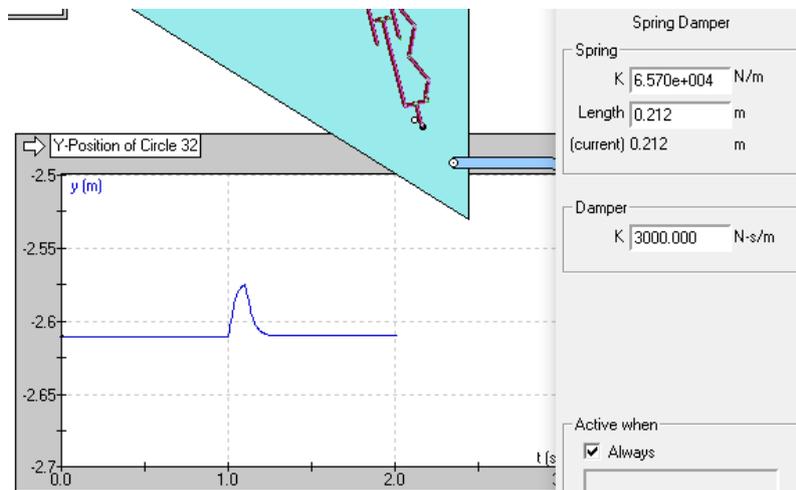
Se someten a un estudio en Working Model, para comparar el comportamiento de la suspensión frente a un impulso unitario de 400 N, equivalente al esfuerzo que provocaría una rama al golpear contra la cubierta de la rueda trasera mientras circula por una ruta de montaña.

Ilustración 33. Resultado para una constante elástica de 1360 Ns/m



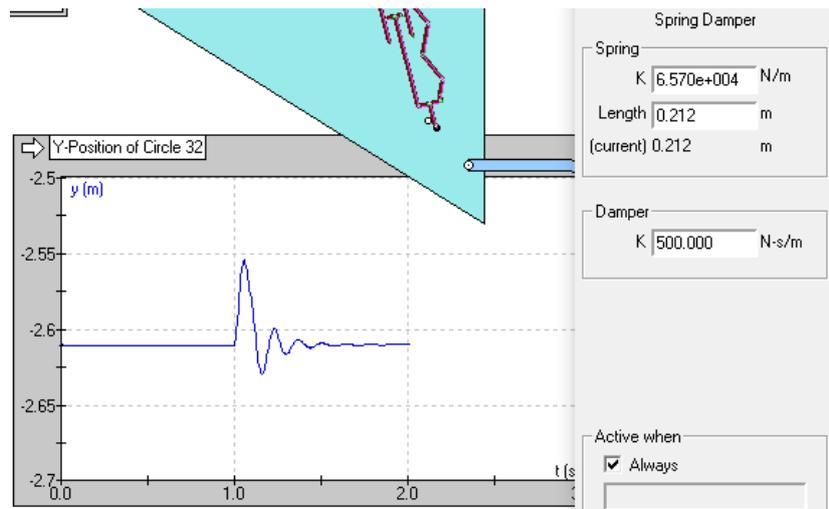
Fuente: elaboración propia

Ilustración 34. . Resultado para una constante elástica de 3000 Ns/m



Fuente: elaboración propia

Ilustración 35. . Resultado para una constante elástica de 500 Ns/m



Fuente: elaboración propia

La gráfica que más se acerca al comportamiento deseado de la suspensión de la bicicleta es aquella cuyos valores son $k=65700 \frac{N}{m}$ y $c=1360 \frac{N \cdot s}{m}$.

Estos valores se encuentran dentro del rango de valores que aparecen en las especificaciones de las suspensiones Fox, por lo que se aceptan para el estudio.

La expresión matemática que describe el movimiento del mecanismo de suspensión es:

$$y(t) = e^{-\xi\omega t} \cdot X \cdot \cos(\omega_D t - \theta)$$

siendo ξ el amortiguamiento relativo, $\xi = \frac{c}{c_c}$.

2.3.2 El SAG

Para ajustar los valores de estas variables habrá que decidir la precarga que se debe meter a la suspensión. Es importante que ésta disponga de un hundimiento una vez que el piloto se monte en la bicicleta para evitar que las ruedas se separen del suelo en los cambios de rasante o agujeros.

Una precarga blanda lo que hará es hundir más de lo que se necesita el amortiguador delantero en un frenada brusca, o el trasero en un pedaleo fuerte mientras se asciende por una pendiente. Por el contrario, una precarga dura producirá problemas de confort y no se realizará correctamente el trabajo del amortiguador de adaptar la bicicleta ante las fuerzas que recibe por las irregularidades del terreno.

El SAG, que traducido literalmente del inglés como hundimiento, se define como el tanto por ciento de la carrera de las suspensiones u horquilla que se introducirá desde el inicio en el interior del tubo de dicha suspensión cuando nos subimos a la bici.

Aunque, una de las variables más importantes para deducir el SAG necesario en las suspensiones es el peso del ciclista con todos los accesorios que vaya a necesitar cuando salga de ruta, para que sea lo más aproximado posible, también depende del método de conducción. A pesar de eso, hay unos valores orientativos de SAG para suspensiones y horquillas, siendo el de las primeras entre el 20% y el 30%, y el de las segundas suele estar entre el 15 y el 25%. El SAG es muy importante para maximizar el comportamiento de la amortiguación.

2.3.3 Diferencia entre carrera y recorrido

Para entender bien que es el SAG, hay que tener bien claros los conceptos de carrera y recorrido.

Los términos de carrera y recorrido están relacionados entre sí, pero no son lo mismo. El recorrido de la suspensión puede definirse como la distancia vertical que hay entre lo máximo que puede subir la rueda y lo máximo que puede bajar, mientras que la carrera se refiere a cuánto se comprime la suspensión.

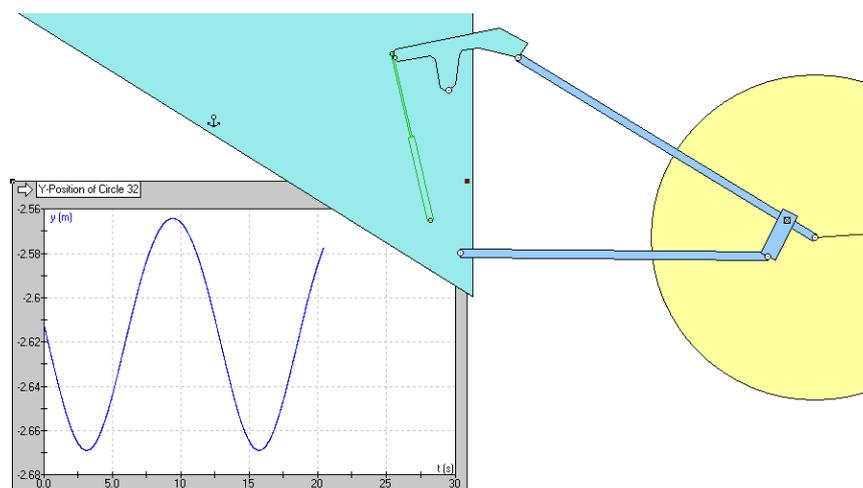
En el caso de la suspensión delantera, la relación entre recorrido y carrera es igual, ya que la trayectoria que sigue la horquilla es lineal. En este caso, una horquilla de 90 mm de carrera supondrá un recorrido en la rueda delantero de 90 mm.

No ocurre lo mismo en el caso de las suspensiones traseras. Cada tipo de suspensión tiene una curva de progresividad diferente, pueden tener vainas de distinta longitud, distinto número de puntos de rotación y ubicados en zonas diferentes. Es por esto por lo que dos amortiguadores iguales, con la misma carrera, montados en distinta disposición muestran valores de recorridos dispares. También podría darse el caso de encontrar bicicletas con el mismo recorrido pro distinta carrera.

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de dos suspensiones en las que se ha impuesto la misma carrera y se aprecia en la gráfica del desplazamiento vertical de la rueda trasera cómo tienen distinto recorrido.

Se simulan dos tipos de suspensiones en Working Model y se realiza el experimento.

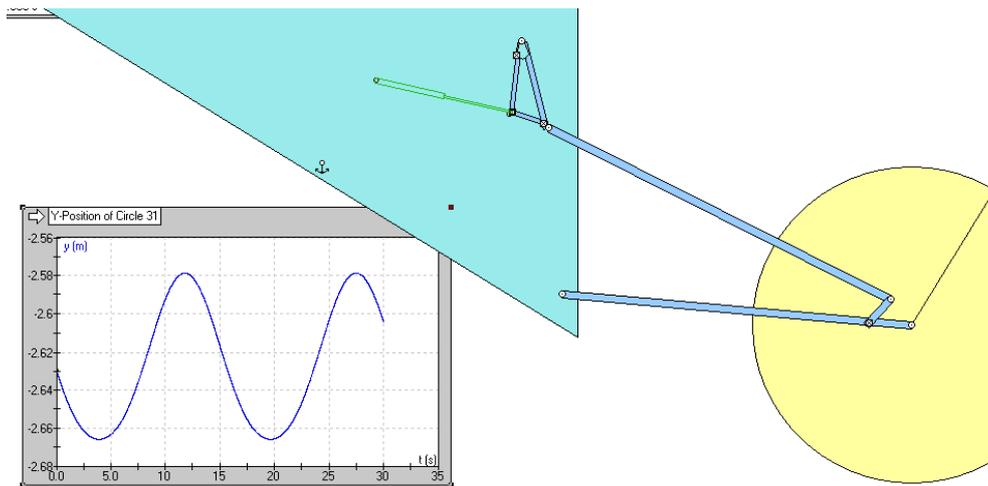
Ilustración 36. Gráfica del desplazamiento de la rueda trasera tras simular el actuador



Fuente: elaboración propia

Con este amortiguador de una carrera de 40 mm, se ha conseguido, gracias a la acción de un actuador que lleva incorporada la función: $0.210 + 0.02 \cdot \sin(0.5 \cdot t)$, siendo 0.210 la longitud inicial, 0.02 la amplitud y 0.5 la frecuencia, un recorrido en la rueda trasera de 106 mm, como se observa en la gráfica, en la que se muestra la posición vertical del centro de la rueda a lo largo del tiempo.

Ilustración 37. . Gráfica del desplazamiento de la rueda trasera tras simular el actuador



Fuente: elaboración propia

Y, en este mismo amortiguador, pero con otra disposición de los puntos de rotación y anclaje con el cuadro, con una carrera de 40 mm, que se ha conseguido gracias a la acción de un actuador que lleva incorporada la función: $0.210 + 0.02 \cdot \sin(0.5 \cdot t)$, se obtiene un recorrido en la rueda trasera de 86 mm, como se observa en la gráfica, en la que se muestra la posición vertical del centro de la rueda a lo largo del tiempo.

2.4 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Aunque cada marca utiliza un nombre diferente para cada variante de las suspensiones, todas tienen aspectos en común. A partir de la curva de progresividad que describe el eje de la rueda trasera, la ubicación de los puntos de giro y el número de puntos de rotación pueden distinguirse los siguientes tipos de suspensiones.

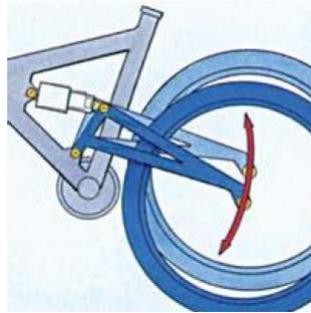
Aunque cada sistema de suspensión podría aplicarse a todas las modalidades prácticamente, algunas están más enfocadas al Descenso o al Freeride, por lo que se analizarán éstos desde el punto de vista para su uso en la modalidad de Trail, por ser las más polivalentes y tratarse de la modalidad en la que se fija el proyecto. A continuación, se explican cada uno de ellos.

2.4.1 Monopivote

Éste se trata uno de los sistemas más básicos y sencillos. Las vainas traseras son una única pieza unida al eje de la rueda trasera, está unida a la suspensión por la parte superior y anclada al cuadro mediante el único punto de giro, situado cercano del eje pedalier. La posición de este punto de giro es lo que más influye en el comportamiento de este tipo de suspensiones.

El eje de la rueda trasera sigue un movimiento circular de radio constante, tiene un comportamiento lineal, por lo que tiene pocas opciones de ser personalizado.

Ilustración 38. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de monopivote



Fuente: <https://www.mountainbike.es/>

Las ventajas de este sistema son su simplicidad y, esto implica, poco mantenimiento. Como el recorrido depende plenamente del movimiento del amortiguador, es sencillo gestionar su sensibilidad, es decir, a mayor compresión del amortiguador más blanda se vuelve la suspensión, pero este efecto se puede modificar variando la cantidad de aire del amortiguador.

La principal desventaja es que no tener puntos de giro que hagan el recorrido más progresivo, sufriendo las inercias creadas por la cadena.

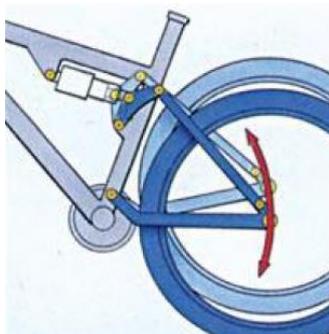
Ilustración 39. Bicicleta Santa Cruz con sistema de suspensión monopivote

Fuente: <https://www.mtbpro.es/afondo/revoluciones-del-mtb-ii-los-sistemas-de-suspensi-n>

2.4.2 Monopivote articulado

Este sistema es parecido al monopivote. El eje trasero se une al cuadro mediante un único punto de giro. Pero se añade una bieleta al amortiguador, atacando así indirectamente la compresión del amortiguador a el recorrido de la rueda.

La trayectoria de la rueda sigue consigue ahora una mayor progresividad, dependiendo del tamaño, de dónde y el ángulo en el que se ubique esta bieleta el recorrido variará.

Ilustración 40. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de monopivote articulado

Fuente: <https://www.mountainbike.es/>

Este es uno de los sistemas más usados. El uso de las bieletas permite variar la progresión, aunque la trayectoria de la rueda no sufre mucha variación. Gracias a las bieletas se consigue, además, conseguir una mejor independencia de la pedalada y la frenada que el sistema

monopivote, pero siguen interfiriendo las inercias. Es por eso que ambos sistemas deben tener sistemas de bloqueos, para poder obtener buen rendimiento en la pedalada a la hora de ascender.

Ilustración 41. Puntos de articulacion del sistema de suspensión Monopivote Articulado



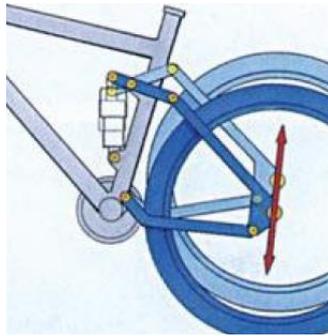
Fuente: <https://esmtb.com/>

Más tarde, se empezaron a introducir nuevos sistemas que utilizaban un nuevo punto de giro en el triángulo trasero, surgiendo así nuevos sistemas:

2.4.3 Horst Link

O sistemas basados en el mecanismo de 4 barras. Se añade un punto de giro adicional respecto al sistema monopivote articulado. Este sistema utiliza bieletas cortas y un nuevo punto de giro en el triángulo trasero, en la vaina inferior normalmente, cerca del eje de la rueda.

Este sistema, al introducir un punto de rotación en la vaina inferior, dividiendo la barra que une el eje de la rueda trasera con el cuadro, hace que la trayectoria sea la de un arco muy abierto.

Ilustración 42. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de Horst Link

Fuente: <https://www.mountainbike.es/>

La introducción del nuevo punto de giro aumenta complejidad y peso al sistema. La mayor ventaja es que hace que mejore la independencia de las fuerzas de frenado y el funcionamiento de la suspensión. No ocurre lo mismo con las fuerzas de pedaleo, que sigue afectando bastante, por lo que también requiere de sistemas de bloqueo.

Este sistema fue diseñado por el ingeniero Horst Leitner y era Specialized quien tenía la patente, que expiró hace pocos años.

Ilustración 43. Puntos de articulación del sistema de suspensión Horst Link

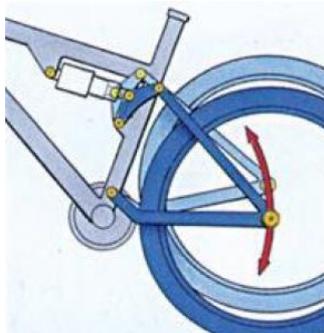
Fuente: <https://www.mtbpro.es/> y posterior modificación en Paint

2.4.4 Split Pivot

Este sistema, también llamado ABP (Active Braking Pivot), deriva del Monopivote articulado y es parecido al Horst Link, pero con la diferencia de que el punto de giro, en lugar de estar en la vaina trasera, se encuentra situada en el eje de la rueda. La vaina superior está unida al amortiguador mediante una bieleta.

Este sistema obtiene un buen nivel de rendimiento, la trayectoria de la rueda consigue describir un arco de radio constante.

Ilustración 44. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de Split Pivot



Fuente: <https://www.mountainbike.es/>

Su principal ventaja es que separa practicamente por completo la interacción de las fuerzas de pedaleo y de frenado con el comportamiento del amortiguador, esto permite ajustar el funcionamiento de la suspensión de manera eficiente. Reúne las cualidades de los sistemas vistos y las mejora. No requiere de bloqueo en para obtener su máximo rendimiento. Pero este sistema requiere de más mantenimiento y tiene más peso.

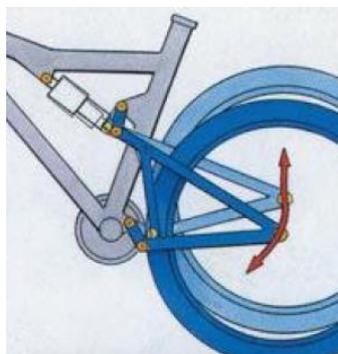
Ilustración 45. Detalle de un cuadro con sistema de suspensión Split Pivot

Fuente: <https://www.mtbpro.es/>

2.4.5 Pivote Virtual

Este sistema tiene 4 puntos de giro, en este caso el punto de giro del triángulo trasero no está definido, sino que va variando en función de la compresión y descompresión del amortiguador, de ahí proviene su nombre de pivote “virtual”. Cada vez es más utilizado este sistema.

La ubicación y las longitudes de las bieletas determinan la progresividad del recorrido, y hacen que el movimiento de la rueda trasera describa una curva en forma de ‘S’.

Ilustración 46. Trayectoria de la rueda trasera en el sistema de Pivote Virtual

Fuente: <https://www.mountainbike.es/>

Hay dos estructuras triangulares rígidas, la del cuadro y la formada por las vainas, que se unen mediante dos bieletas, situándose la suspensión entre ambas bieletas. Este funcionamiento ofrece un buen funcionamiento en el pedaleo, el sistema consigue oponerse al descenso que sufre la suspensión por la fuerza del pedaleo con un movimiento ascendente de igual intensidad, neutralizando la suspensión.

Al introducir un mayor número de puntos de giro, supone un mayor mantenimiento, una mayor complejidad, pudiendo ocasionar holguras que afecten al rendimiento, y un aumento en el peso. A pesar de su complejidad, es uno de los más utilizados.

Ilustración 47. Puntos de articulación del sistema de suspensión de Pivote Virtual



Fuente: <https://esmtb.com/>

2.5 COMPARACIÓN CON LAS BICICLETAS RÍGIDAS

Después de ver los distintos tipos de sistemas de suspensión, la pregunta que surge es qué es mejor, si utilizar una bicicleta con alguno de estos sistemas o hacer uso de una bicicleta rígida, con suspensión únicamente en la horquilla delantera.

Desde los comienzos de la bicicleta cada elemento nuevo que se ha ido introduciendo ha sido aceptado y utilizado para la competición, pero con la introducción de la doble suspensión no pasó lo mismo. Si es cierto que en el ámbito de la competición es muy común el uso de las

bicicletas con suspensión delantera y trasera, pero también hay ciclistas que siguen utilizando las bicicletas con cuadro rígido.

En este apartado, se verán las diferencias entre ambos tipos analizando los pros y contra de cada uno de los tipos.

El aspecto más influyente a la hora de decidir entre rígida o doble es el terreno por el que se vaya a circular. No existe la bici total. Por lo que habrá que decantarse por unas características u otra para tomar esta decisión, ya que cada uno de estos tipos de bicicleta tiene unas propiedades que hacen que sean mejor para un uso determinado, y tengan aspectos que puedan mejorarse con respecto a la otra.

Primero se mostrarán **las ventajas que tienen las de doble suspensión** con respecto a las rígidas. El principal factor que hace a los ciclistas amateurs decidirse por este tipo de bicicletas es la comodidad, la capacidad de absorber las vibraciones provocadas por las irregularidades del terreno que ofrecen estas bicicletas. Estas bicicletas son muy recomendables para aquellas personas que sufren dolores en la espalda o cadera, ya que en las bicicletas rígidas son éstas las partes del cuerpo que absorben las irregularidades mientras que en las dobles, la suspensión trasera es la que se encarga de esta función.

El siguiente punto en el cuál las bicicletas dobles están por delante de las rígidas es la seguridad, éstas te permiten realizar descensos más técnicos con menor dificultad y riesgos, aunque la técnica del ciclista influye mucho es muy importante tener la bicicleta adecuada y en buenas condiciones. Una de las características que más han evolucionado en las bicicletas de doble suspensión es la tracción, este tipo de bicicletas ha conseguido obtener una tracción incluso mejor que en las rígidas, ya que en subidas con obstáculos la suspensión trasera hace que la rueda no pierda el contacto con el suelo posibilitando el pedaleo en zonas críticas que las rígidas no permitirían, consiguen adecuarse perfectamente al relieve del terreno.

Por último, la estabilidad es una virtud que destaca en las dobles. Aunque esto es algo que está muy relacionado con la geometría del cuadro, más concretamente con el ángulo de dirección. Las bicicletas de doble suspensión tienden a tener ángulos de dirección más inclinados, haciendo que la distancia entre ejes sea mayor. Además, debido a la compresión

del amortiguador aumenta la distancia entre los ejes aún más, beneficiando a la estabilidad de la bicicleta. Es raro ver bicicletas dobles con ángulos de dirección por encima de los 69 grados.

Ilustración 48. Bicicleta de doble suspensión realizando una bajada con obstáculos



Fuente: <https://www.mundobici.co/blog/>

Ahora se verán **las ventajas que tienen las bicicletas rígidas** sobre las de doble suspensión. En primer lugar, el peso de estas bicicletas es notablemente inferior a las bicicletas dobles. En dos bicicletas de la misma gama puede llegar a haber hasta 3 kilos de diferencia por tratarse de una bicicleta sin suspensión trasera., debido a que éstas carecen de articulaciones, rodamientos y bieletas. Este es un factor que les interesa mucho a los ciclistas sobre todo a la hora de afrontar las subidas, donde buscan la mayor ligereza posible.

Otro aspecto importante es la rigidez, al no existir articulaciones ni amortiguación trasera que influyan en el pedaleo, en el pedaleo la fuerza que se ejerce va directamente al eje pedalier. La fuerza de nuestra pedalada produce una mayor potencia, reduciendo por completo la pérdida de potencia consiguiendo una mayor aceleración instantánea en este tipo de bicicletas.

El menor mantenimiento que requieren estas bicicletas es otro punto a favor. Debido a la simplicidad del mecanismo no precisan de tantas revisiones ni hace falta regular las

amortiguaciones. La reducción en el número de piezas y de elementos complejos reduce la probabilidad de que pueda fallar o romper alguna pieza.

Por último, las bicicletas rígidas son más económicas. El precio de una bicicleta rígida de misma calidad y materiales es menor que el de una doble de la misma gama. Además de que el coste de adquisición es menor, los costes de mantenimiento también suponen un ahorro con respecto a las bicicletas dobles.

Ilustración 49. Bicicleta con cuadro rígido en el circuito de una prueba



Fuente: <https://esmtb.com/mundial-bike-maraton->

A modo de resumen, en esta tabla se muestran las principales ventajas de ambos tipos de bicicleta:

Ilustración 50. Tabla resumen comparacion entre rígidas y dobles

Doble suspensión	Rígidas
<ul style="list-style-type: none"> - Comodidad - Mejor tracción - Requieren menos técnica - Estabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Ligereza - Rigidez - Mejor transmisión de potencia - Económicas

Fuente: elaboración propia

En 2015 y tras muchos años de desarrollo, surgió la marca Bold Cycles, una marca Suiza que redefinió las reglas de las bicicletas convencionales.

Introdujo un nuevo modelo de cuadros que consiste en el diseño de un cuadro rígido, con una suspensión completamente oculta en el interior de la estructura del cuadro. El sistema llamado *Internal Suspension Technology*, combina las características de los dos tipos de bicicletas explicados arriba. La bicicleta lleva incorporada una suspensión con una carrera de 130 mm, medida ideal para su uso en Trail, entre otras.

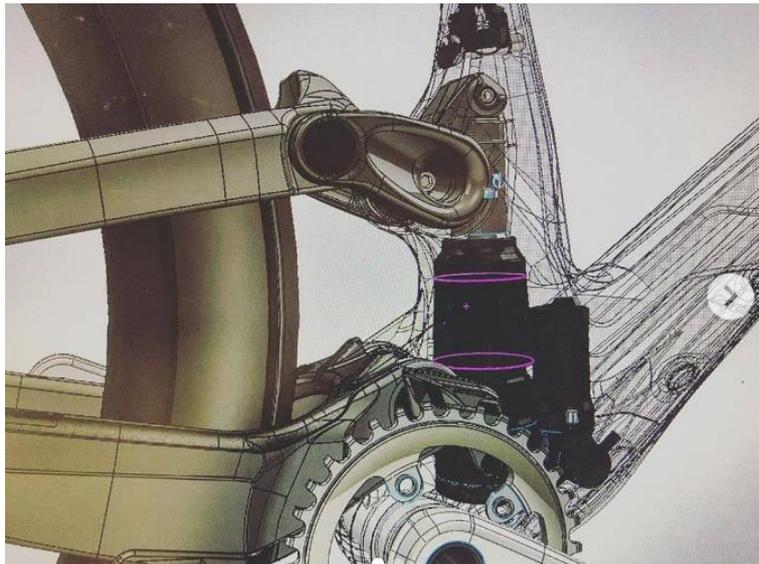
Ilustración 51. Bicicleta con el sistema Internal Suspension Technology



Fuente: <https://esmtb.com/bold-cycles-linkin>

En esta imagen se muestra un plano de cómo está incorporada la suspensión de manera que quede oculta.

Ilustración 52. Esquema del sistema Internal Suspension Technology



Fuente: Instagram de live_to_mtb

Por otro lado, un nuevo tipo de bicicletas que algunos ciclistas están empezando a utilizar son las llamadas *Single Speed*. Este tipo de bicicletas se caracteriza por tener una sola velocidad. Un plato y un piñón.

Aunque parezca un disparate ir con un solo desarrollo a la montaña, tiene algunas ventajas que hacen que algunos ciclistas se decanten por estas bicicletas:

- Ayuda a mejorar la condición física
- Simplicidad y sencillez en el pedaleo
- Ligereza

Ilustración 53. Bicicleta Single Speed



Fuente: <https://www.brujulabike.com/>

3.DISEÑO CON AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2019

3.1 DIMENSIONES

Para el modelado de la bicicleta se supondrá un ciclista de altura y peso estándar. Se elige una persona de 185 centímetros de altura y 75 kilos de peso. Con estas dimensiones, y tomando como referencia los valores de la tabla que se muestra abajo, se tomará una bicicleta de la talla 22 pulgadas, que equivaldría a una talla L/XL del producto. Se elige esta medida por ser la más desfavorable, y si se consigue que con estas longitudes de tubos se cumplan los estudios a realizar, se cumplirán con medidas menores.

Ilustración 54. Tabla de tallas según altura del ciclista

Altura del ciclista (cm.)	Bicicleta de Carretera (cm.)		Mountain Bike (pulgadas)
160 - 165	47 - 51	S	14
165 - 170	51 - 53	M	16 - 17
170 - 175	53 - 55	M	17 - 18
175 - 180	55 - 57	M - L	18 - 19
180 - 185	57 - 59	L	20 - 21
185 - 190	59 - 61	L - XL	20 - 21 - 22
190	61	XL	22

Fuente: <https://www.merkabici.es/blog/calcula-la-talla-de-tu-bici-con-nuestro-simulador/>

Las marcas más importantes dentro del sector de la bicicleta llegan a tener hasta 5 ó 6 tallas distintas para un mismo modelo con el fin de ajustarse de la manera más precisa posible al ciclista. Las marcas menos reconocidas simplemente cuentan con tres tallas, debido a que es más barato para la empresa tener menos número de tallas para ahorrar gastos tanto en fabricación, como en almacenaje. Pero gracias al método de producción de origen japonés llamado *Just in Time*, que permite reducir costos por la reducción de inventario de materia prima, ensamblaje y productos finalizados almacenados, cada vez son más las marcas que incluyen mayor número de tallas para hacer cuadros personalizados al cliente.

Para el estudio biomecánico, se busca adaptar la fisionomía del ciclista a la geometría del ciclista. Los parámetros que más influyen en este estudio son la altura del ciclista, la altura de la entrepierna y la longitud del antebrazo. Con estas medidas del ciclista, y la correspondiente talla, se obtienen las siguientes medidas para el cuadro de la bicicleta que se aplicarán para su diseño y modelado:

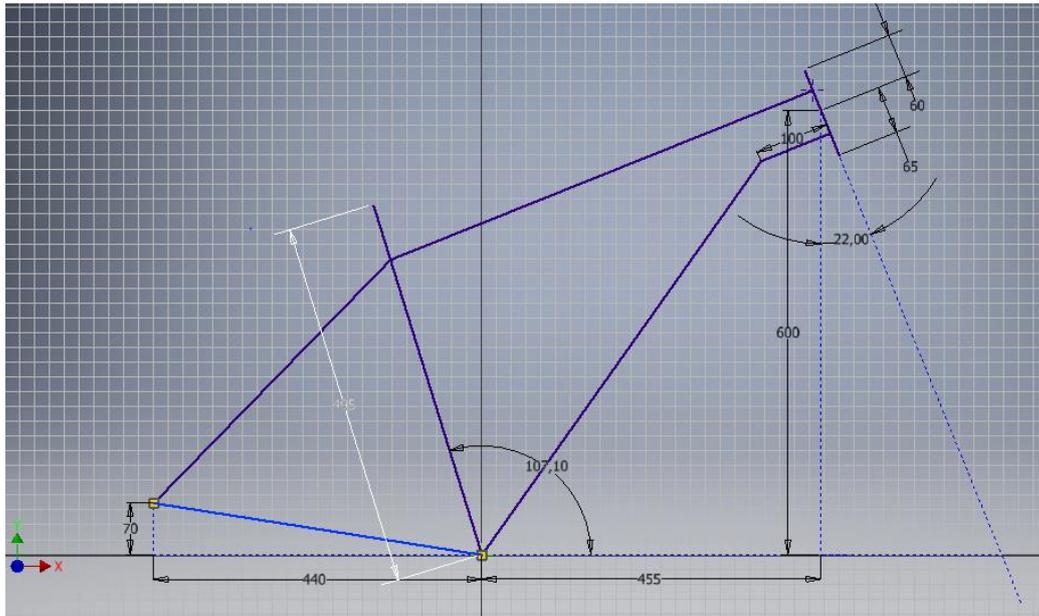
Ilustración 55. Medidas de la geometría del cuadro

Ángulo del tubo de dirección	68°
Stack	630 mm
Largo de vainas	440 mm
Ángulo del tubo del sillín	72.9°
Medida del tubo del sillín	495 mm
Largo del tubo de dirección	120 mm
Reach	455 mm

Fuente: medidas obtenidas de Canyon.com

Con estas medidas iniciales se puede realizar el primer boceto. El boceto inicial habrá que modificarlo según se vaya modelando el cuadro. Se trata de un proceso iterativo donde se empieza con este diseño preliminar, pero según avanzaba el modelado y el análisis hubo que tomar decisiones para mejorar aquellos aspectos que no se ajustasen a lo que se buscaba con respecto a la geometría. El modelo debe cumplir los requisitos de fatiga y análisis estático que se explicaran más adelante.

Ilustración 56. Boceto 2D inicial desde el que parte el modelado del cuadro



Fuente: elaboración propia

Ambos cuadros serán de aluminio, cuyas propiedades han sido especificadas en apartados anteriores, ofrece unas buenas características y la mayoría de los cuadros de gama media del mercado están fabricados en este material.

Las medidas seleccionadas están dentro del rango de los valores establecidos en el sector. Con un reach por encima de los 400 mm y un stack superior a los 600 mm recomendados. Además de las medidas especificadas en la tabla anterior, a continuación, se enumeran algunas tecnologías y medidas importantes que se han tenido en cuenta para el diseño de estos cuadros:

- i. Tubo de sillín con diámetro exterior de 34 mm y diámetro interior de 31 mm, por lo que será necesario una tija de este mismo diámetro para conseguir un ajuste con apriete de '31H8h9', que se trata de un ajuste de agujero único con un asiento deslizante sin necesidad de lubricación, utilizado en ejes de lira, y una posterior abrazadera con un par de apriete máximo de 7Nm para hacer fija la posición de la tija.
- ii. Ruedas de 29 pulgadas y anchos de hasta 3 pulgadas, aunque para las bicicletas de Trail es aconsejable ruedas de perfil estrecho para tener menos agarre en terrenos

arenosos y poder tener mayor aceleración, mejor frenado y mejores aptitudes en subidas. Además de poder rodar a más velocidad con menos esfuerzo. Para Trail se recomiendan perfiles de 1,8 a 2,10 pulgadas de ancho, aunque cada vez son más utilizadas las ruedas anchas.

- iii. Eje pedalier de 75 mm de ancho en el caso del cuadro rígido y 90 mm para el cuadro de doble suspensión ambos con el sistema BB30.
- iv. En el eje trasero hay una separación entre las caras paralelas interiores de 125 mm, por lo que es compatible con los bujes de esta medida. Se trata de la anchura de bujes más común en el mercado.
- v. La caja de dirección tendrá una estructura cónica, con mayor diámetro en la parte inferior del tubo, y por lo tanto más material, para hacerlo más resistente. Un diámetro exterior en la parte superior de 58 mm y en la parte inferior de 65 mm. El diámetro interior será el mismo en la parte superior e inferior para que puede sujetar correctamente el eje de la horquilla o del tubo de dirección y será de 52mm. Será necesario un eje de dirección de 52 mm para conseguir un ajuste con apriete de '52H7j6', que se trata de un ajuste de agujero único de forzado ligero.

3.2 AUTODESK INVENTOR

Para elaborar, tanto los diseños de los cuadros como el diseño del amortiguador, se utilizará un software de diseño de la empresa AutoDesk, este programa es uno de los más utilizados a nivel mundial. Inventor es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D.

Con este programa se realiza desde el boceto 2D de la pieza, hasta diseños 3D de piezas y geometrías complejas. Gracias a las herramientas con las que se pueden trabajar en este programa se pueden realizar diseños que se aproximen a objetos reales. Además, incorpora herramientas muy útiles como la simulación dinámica y el análisis mediante elementos

finitos. Gracias a los usos de este programa se pueden reducir los costes de desarrollo de un producto y analizarlo de manera precisa antes de producirlo.

Pero es papel del ingeniero saber interpretar los resultados que se obtengan del análisis, saber dónde y cómo implementar los esfuerzos y cargas, y el correcto diseño y ensamblaje para llegar a realizar el correcto estudio del mecanismo en cuestión.

3.3 DISEÑO DE LOS CUADROS

Esta se trata de la parte del trabajo que más horas a llevado para su elaboración. Es en este apartado donde se pone en práctica todo el conocimiento explicado anteriormente. Tanto el diseño como el análisis son un proceso iterativo, por lo que a medida que se ha ido avanzando en ambos estudios se han ido tomando consideración que han hecho modificar el diseño.

En el diseño, se parte del boceto 2D que se ha mostrado en el apartado anterior y, a través de los comandos del software de extrusión, barrido, elevación, etc. se llega a un modelo 3D del cuadro que se aproxima a uno real.

Este boceto se ha utilizado para los dos cuadros, el rígido y el de doble suspensión. El rígido se ha diseñado como si hubiese sido fabricado mediante soldadura, en concreto soldadura TIG, que es el proceso más recomendable para este tipo de aluminio. Gracias a la soldadura se convierte el modelo en una única pieza inseparable. El triángulo principal del cuadro de la bicicleta de doble suspensión también se ha diseñado por este método, pero las demás piezas se modelaron como si hubiese sido fabricado por hidroconformado, haciendo cada pieza por separado y una vez se tuvieron todas las piezas necesarias modeladas se pasó al ensamblaje de éstas.

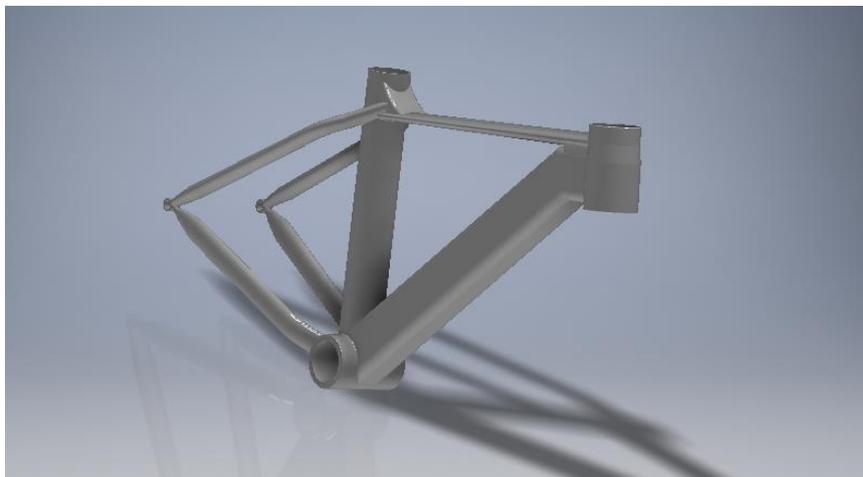
3.3.1 Cuadro rígido

Es un cuadro formado por varios tubos con longitudes y geometrías distintas. Se trata de un cuadro fabricado en aluminio con aspecto similar a los cuadros convencionales.

El cuadro tiene secciones distintas dentro de un mismo tubo con el objetivo de optimizar el diseño e intentar reducir el peso. Para ello se han creado distintas geometrías en los bocetos creados en planos normales a la trayectoria de los tubos. Posteriormente, se han unido dichos bocetos mediante las herramientas de barrido y elevación utilizando como eje el creado en el boceto de la figura anterior.

El primer cuadro que se realizó tenía una estructura gruesa y un peso de 14,796 Kg. Claramente, se obtuvo un fallo en los dimensionados de los tubos, además se realizaron los tubos compactos. En la siguiente figura se muestra el resultado del primer diseño.

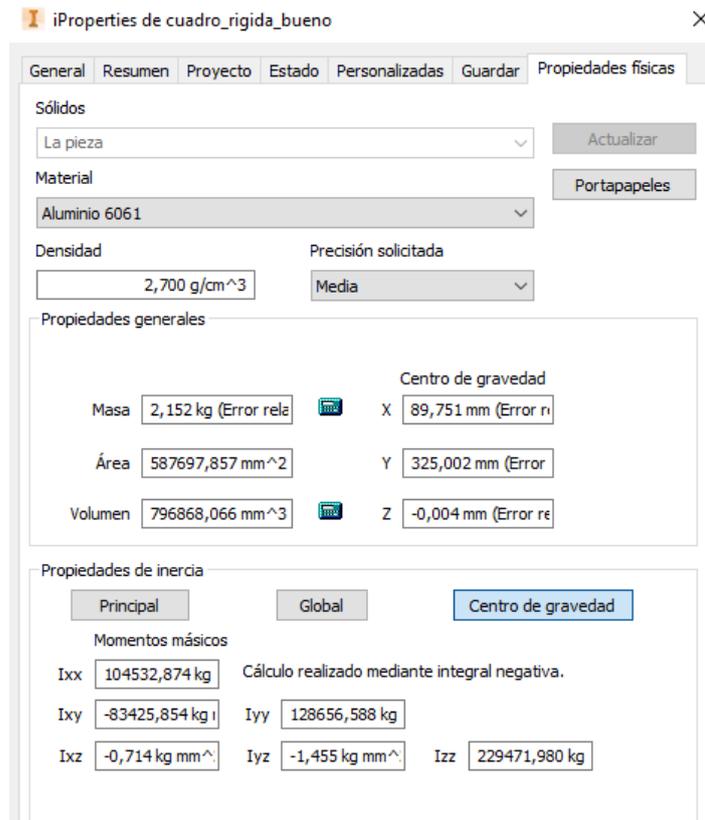
Ilustración 57. Primer diseño del cuadro rígido



Se puede observar una falta de relación en el tamaño de los tubos, un tubo de sillín y tubo inferior del cuadro muy anchos con respecto al tubo superior. Las vainas del triángulo trasero también estaban sobredimensionadas.

Tras unos análisis y muchos cambios, se llegó a un cuadro con una buena estética, que cumple con las tecnologías impuestas en el apartado anterior, espesor en la mayoría de tubos de 2,5 mm y un peso de 2,151 kg.

Ilustración 58. Propiedades físicas del cuadro rígido



Que es un peso bastante ligero al tratarse de un cuadro de gama media de aluminio con un diseño sencillo. Una bicicleta rígida de aluminio de gama alta ronda los 1900 gramos. El peso lo calcula el propio programa en la pestaña de 'Propiedades físicas' al introducir el material utilizado, en este caso Aluminio 6061 de 2,700 g/cm³ de densidad. El error relativo en el cálculo de la masa del cuadro es del 0,484786%.

En las siguientes figuras se muestra el diseño final del cuadro rígido fabricado con tubos de aluminio soldados y algunos detalles de la unión de los tubos.

Ilustración 59. Diseño final del cuadro rígido

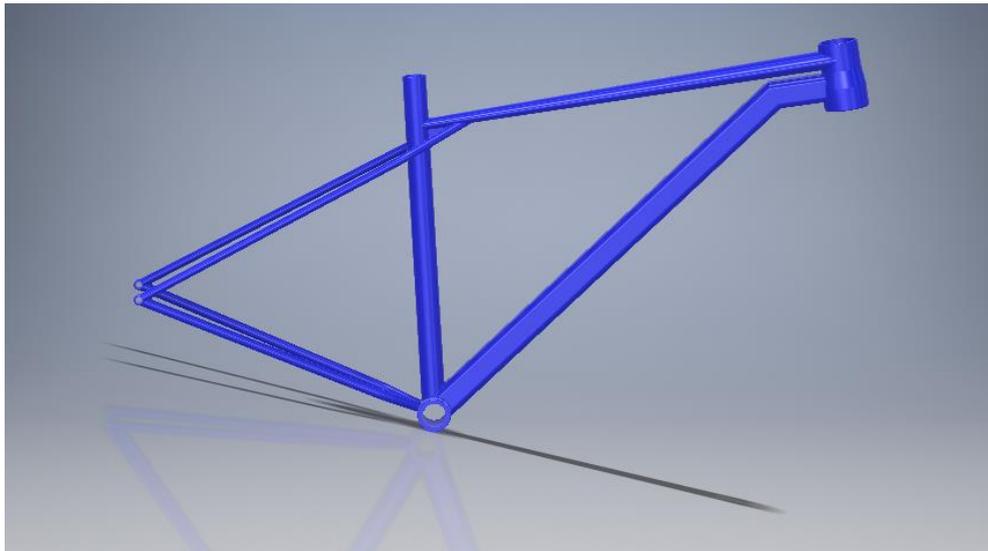


Ilustración 60. Detalle del cuadro de la zona del eje pedalier

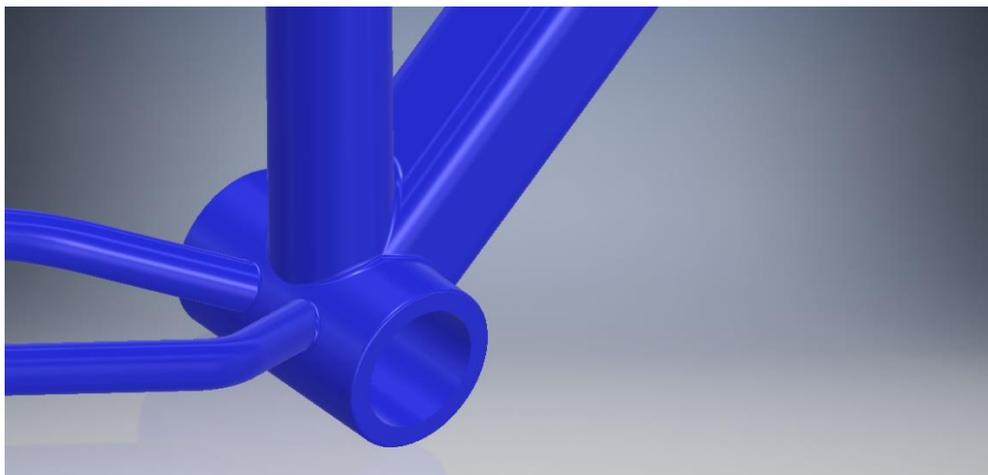


Ilustración 61. Detalle del cuadro de la zona del tubo de dirección

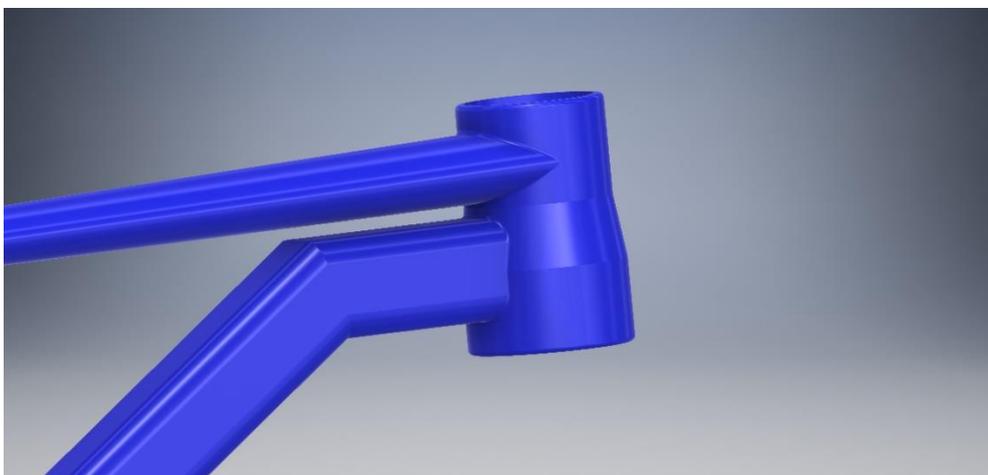
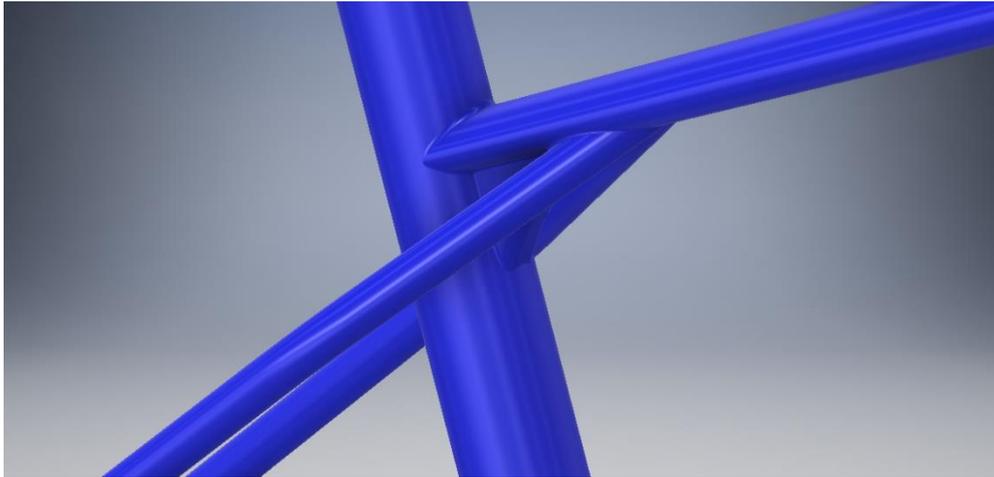


Ilustración 62. Detalle del cuadro de la zona de unión de tirantes con el triángulo principal

3.3.2 Cuadro con suspensión trasera

El triángulo principal está fabricado a partir de la geometría del cuadro rígido, pero con algunas modificaciones apreciables a simple vista.

Se ha dado una longitud de eje pedalier mayor, ya que en los cuadros con suspensión trasera ésta es una de las partes que más fuerza tienen que soportar debido a que la vaina trasera está anclada al cuadro mediante un punto de rotación. Su anchura se debe también a que se necesita de mayor espacio entre el tubo del sillín y los platos para que haya espacio suficiente para las vainas sin que toquen con los platos. No se encuentra situado dicho punto de rotación en la misma caja pedalier porque de no ser así, sería demasiado ancho y sobre todo se vería muy afectado el movimiento de las vainas con la fuerza de pedaleo ya que estarían en el mismo punto, provocando un hundimiento en la suspensión y en las vainas trasera que producirían una pérdida de potencia innecesaria.

Además, se ha dado un ángulo en mitad del tubo del sillín para eliminar la rectitud de éste. En los cuadros con suspensión, el tubo del sillín tiene que soportar más esfuerzo ya que la suspensión está sujeta al cuadro a través de algún punto de este tubo.

Se han añadido anclajes para poder unir el sistema de amortiguación con el cuadro y las vainas traseras. El sistema de suspensión que se implementará en este cuadro será el Horst Link.

El principal motivo por el cual se ha elegido este sistema es por ser el único que no tiene el punto de rotación de ambas vainas traseras coincidente con el eje de la rueda trasera, sino que tiene el punto de unión entre vaina y tirante en una de ellas. Al tener un punto de rotación entre el eje y el cuadro hace que el estudio cinemático y el movimiento sea más interesante. Además, se modelará para que el punto de rotación entre ambas vainas se encuentre en la vaina superior, a diferencia de la mayoría de bicicletas con el sistema Horst Link que lo sitúan en la vaina inferior.

Para la modalidad que se usará el cuadro que se va a modelar, no se requieren suspensiones de mucha carrera. Para el Trail o Maratón, que son las modalidades más comunes y que menos técnica requieren, basta con suspensiones que ofrezcan un recorrido de 100 mm tanto en la parte delantera como en la parte trasera. Para conseguir este recorrido, hará falta una horquilla que ofrezca una carrera de 100 mm, ya que como se vio en el capítulo anterior, en la horquilla es directamente proporcional el recorrido con la carrera. Para el caso de la suspensión trasera, más concretamente para el caso del sistema Horst Link, hará falta una suspensión con una carrera inferior a esa longitud que habrá que calcular cuando corresponda.

Para el diseño y modelado de este cuadro se han fabricado por separado cuatro piezas, además del amortiguador. Una vez creadas las piezas se procedió al ensamblaje. Las piezas separadas se muestran a continuación indicando el peso de cada una de ellas.

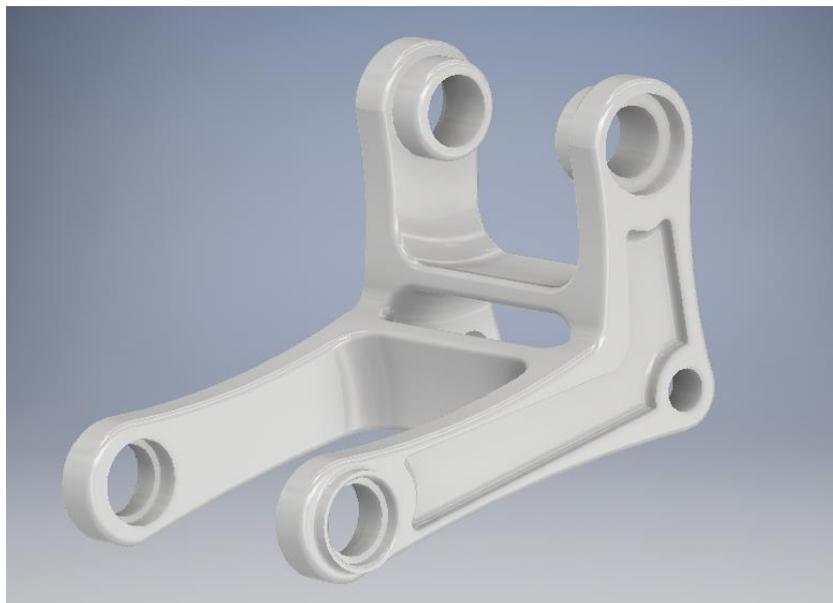
El triángulo principal del cuadro, fabricado en Aluminio 6061, tiene una masa de 1658 gramos. Y, su diseño es el siguiente:

Ilustración 63. Diseño del triángulo principal del cuadro de doble suspensión



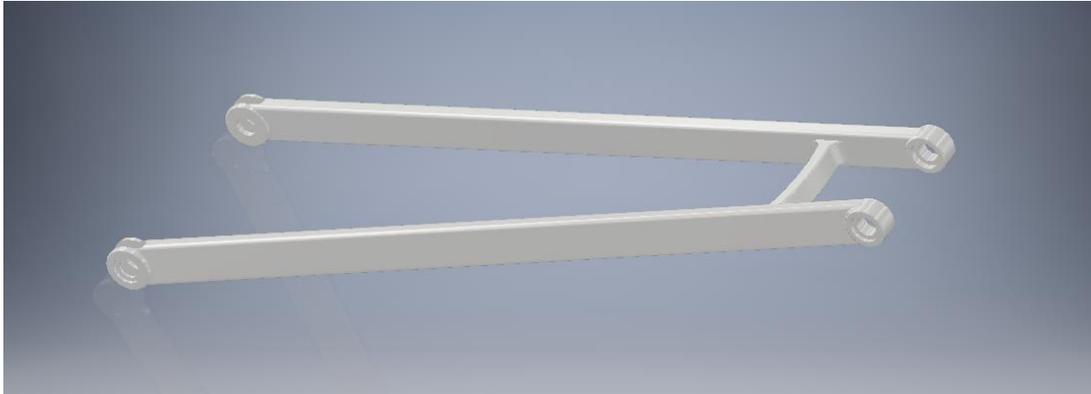
El siguiente elemento el pivote-articulación o bieleta, fabricado en Aluminio 6061 y con una masa de 93 gramos, el diseño que se le ha dado es el siguiente:

Ilustración 64. Diseño de el pivote del cuadro de doble suspensión



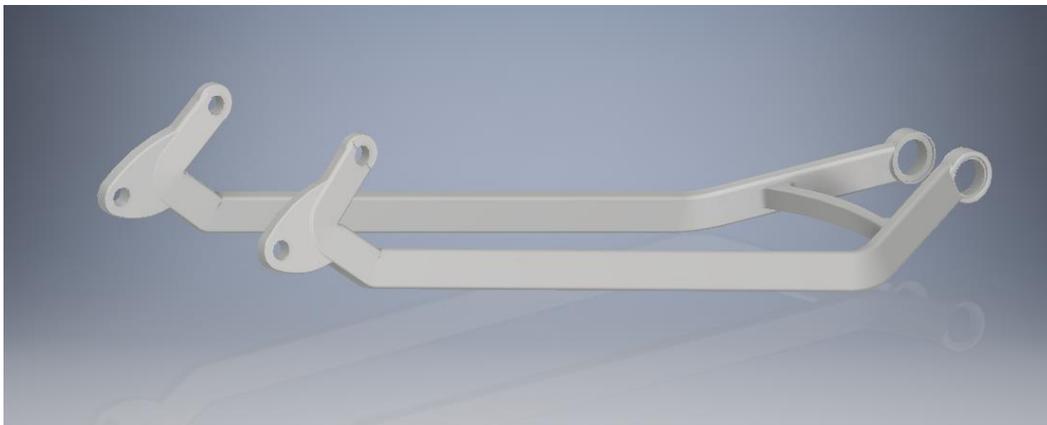
Los tirantes, están fabricados en Aluminio 6061, tiene una masa de 215 gramos y un diseño que se muestra a continuación:

Ilustración 65. Diseño de los tirantes del cuadro de doble suspensión



Por último, las vainas también fabricadas en Aluminio y con una masa de 305 gramos. El diseño de éstas es el siguiente:

Ilustración 66. Diseño de las vainas del cuadro de doble suspensión



Una vez diseñadas estas piezas, se pasó al ensamblaje. Se creó, en Inventor, un nuevo archivo de ensamblaje Normal.iam, se insertaron las piezas recién mostradas y se fueron aplicando las restricciones, tanto de ejes con ejes como de planos de unas piezas con otras. Lo primero fue hacer fija una de ellas, en este caso se fijó el triángulo principal, y a partir de ahí se fueron uniendo las demás piezas con las restricciones correspondientes. Finalmente, se llegó a un cuadro que cumple con el diseño de los cuadros convencionales y con un movimiento que se aproxima al movimiento real del cuadro.

El cuadro montado tiene una masa de 2271 gramos, que coincide con la suma de las masas de las demás piezas por separado. Es un peso aceptable para tratarse de un cuadro para una bicicleta de doble suspensión, aunque habría que sumar la masa de los rodamientos y tornillos, y la de la suspensión. Con todos estos componentes el cuadro rondaría los 3kg.

Ilustración 67. Cuadro de doble suspensión ensamblado



Se ha seleccionado un color distinto para cada elemento del cuadro con el fin de diferenciar más fácilmente donde se sitúa cada pieza. En cada unión entre piezas se situaría un rodamiento, ya que cada unión se trata de un par de rotación en el que cada pieza gira con respecto a su pieza contigua.

3.3.1.1 Grados de libertad en el cuadro

Una vez ensamblada la bicicleta, la pregunta que se plantea es cuántos grados de libertad tiene el cuadro. El concepto de grado de libertad puede definirse como el número mínimo de coordenadas independientes que se necesitan para conocer plenamente el movimiento que describe el mecanismo.

Para calcularlo, se aplicará una ecuación vista en la asignatura de Máquinas y mecanismos. Para calcular el grado de libertad de un mecanismo que se encuentra en un plano se aplica la ley de Grübler:

$$G = 3(N - 1) - 2C_i - C_{ii}$$

Las restricciones de los pares que unen los sólidos pueden eliminar hasta dos grados de libertad en el caso plano, serían pares de clase 1, y un ejemplo sería un par prismático, que anula el desplazamiento lineal respecto a un eje y el giro, y sólo permite el desplazamiento sobre un eje.

Para mecanismoS 3D que se encuentran en el espacio no se puede aplicar esa fórmula, ya que en lugar de tener 3 grados de libertad como se tienen en el caso de un mecanismo plano, ahora hay 6.

En el plano hay dos movimientos libres de traslación, sobre los ejes x e y, por ejemplo, y un movimiento de rotación sobre el eje perpendicular a estos dos, el eje z en este caso. En el espacio existen 3 gdl ligados a la traslación sobre los tres ejes y otros 3 correspondientes a los giros respecto a cada uno de los ejes.

A diferencia del caso plano, una restricción puede eliminar hasta 5 grados de libertad. Esta es la ecuación que se aplica para calcular los gdl de un mecanismo situado en el espacio tridimensional:

$$G = 6(N - 1) - 5C_i - 4C_{ii} - 3C_{iii} - 2C_{iv} - C_v$$

En la ecuación, N hace referencia al número de elementos. Para el caso de el cuadro de bicicleta, serán 4. El triángulo principal se tomará como el elemento fijo, en la asignatura de Máquinas y Mecanismo se trata al elemento fijo como el 'sólido 1'. Todas las uniones entre piezas del mecanismo en cuestión se tratan de pares de revolución, que solo permiten el giro respecto a un eje, por lo que eliminan los otros 5 grados de libertad y pertenecen al grupo C_i .

En nuestro caso, aunque se trata de un mecanismo que tiene longitud, anchura y profundidad, la fórmula que conviene aplicar es la ley de Grübler para el movimiento plano, ya que el cuadro está contenido en un único plano. Utilizando la primera fórmula se obtiene:

$$G = 3 \cdot (4 - 1) - 2 \cdot 4 = 1$$

El cuadro como mecanismo independiente de la bicicleta tiene 1 grado de libertad que, como se puede apreciar en la figura del ensamblaje del cuadro, dependerá directamente del comportamiento de la suspensión.

Distinto sería si se quisiera calcular los grados de libertad de la bicicleta completa, en este caso sí habría que utilizar la segunda fórmula ya que no sólo se mueve en un plano, sino que el movimiento es tridimensional. El manillar, ruedas y cuadro pueden moverse en distintos planos.

Como dato se van a calcular de manera análoga los grados de libertad que tiene la bicicleta. Se consideran 4 partes distintas: el cuadro, la rueda trasera, rueda delantera y manillar, y el sólido 1 será el suelo.

Antes de poder aplicar la fórmula hay que analizar las uniones que existen entre las distintas partes. El manillar está unido al cuadro mediante un par de revolución, entre ambos sólidos sólo existe giro respecto de del eje z, imaginando la bicicleta apoyada en el plano XY. Lo mismo pasa con la unión de las dos ruedas con el cuadro, sólo es posible un giro respecto al eje y, eliminando los otros 5 grados de libertad. Estas tres uniones pertenecen al grupo C_i . Queda ver el movimiento que se produce entre las cubiertas de las ruedas y el suelo, entre éstos puede haber desplazamientos en los planos X e Y y giro respecto a un eje, por lo que en este caso el par pertenece al grupo C_{iii} , permite 3 y elimina otros 3 grados de libertad. Se trata de una rodadura sin deslizamiento. Aplicando la fórmula se obtiene que la bicicleta completa tiene 3 grados de libertad:

$$G = 6 \cdot (5 - 1) - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 2 = 3$$

3.4 DISEÑO DE LA SUSPENSIÓN

Al igual que en el cuadro de doble suspensión, el amortiguador se ha diseñado por separado. Por una parte, se hizo la cabeza inferior con el eje, y por separado la cabeza superior y el cuerpo donde se inserta el eje.

En el ensamblaje se creó una restricción de coincidencia de ejes y otra de ángulos, para que no girase el eje del amortiguador sobre el cuerpo, dejando como único desplazamiento libre el movimiento lineal entre eje y cuerpo. El muelle se podría haber creado como otra pieza independiente, ya que el programa Inventor ofrece una ventana dentro de la opción de ensamblaje para generar ‘muelles de compresión’, pero este método no te da la opción de introducir los parámetros que interesan para su estudio cinemático como son la rigidez elástica y el coeficiente de amortiguamiento. Pero si se hubiese hecho por este método quedaría como se muestra en las siguientes figuras.

Ilustración 68. Variables a introducir para el diseño de un muelle en Inventor

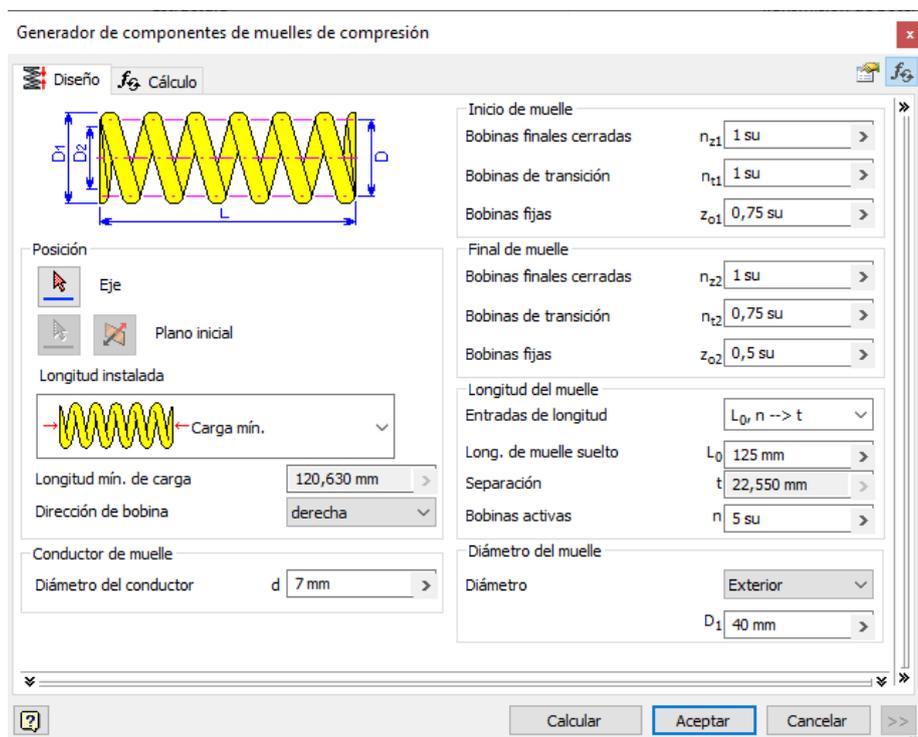


Ilustración 69. Diseño de la suspensión

Tanto el eje como el cuerpo se modelaron en Aluminio 6061, pero el resorte se modeló en acero de densidad $7,850 \text{ g/cm}^3$, ya que para el caso de muelles este material tiene mejores propiedades.

Calculando las masas de las tres piezas se obtiene una masa final para la suspensión de 563 gramos, que sumado a la masa del cuadro tienen una masa de 2834 gramos.

Uno de los requisitos de la norma UNE- EN ISO 4210-2:2015 referente a las normas de las bicicletas de montaña es que el diseño del cuadro de la bicicleta de doble suspensión pueda seguir funcionando sin llegar a colapsar con el cuadro en el caso de que falle la amortiguación, que no se produzca contacto entre rueda y los tirantes. Este requisito se cumple gracias a los topes que lleva el sistema de suspensión dentro del cuerpo. La carrera de la suspensión viene limitada por los topes que incluye el eje al moverse por el cuerpo impidiendo que éste puede salir del mismo debido a estos topes.

3.4.1 Cálculo y ajuste de los parámetros del muelle

Una vez diseñadas las partes del muelle, se procede a la simulación dinámica de la amortiguación para estudiar el comportamiento de la suspensión en distintos casos cuando se aplican unas fuerzas exteriores similares a las que sufriría en una situación real.

Para realizar dicha simulación dinámica, se trabajará en la herramienta que nos ofrece Inventor denominada 'Simulación dinámica'. Lo primero que hace el software al entrar en esta herramienta es convertir las uniones en estándar, aunque se puede cambiar manualmente para que no las convierta. Pero, para realizar las simulaciones que se van a hacer en este caso sí es necesario esta transformación.

Dentro de esta herramienta, te da la opción de crear una unión de fuerza, dentro todos los tipos de uniones se selecciona la de 'Muelle/Amortiguador/Conector'. Esta opción permite introducir los valores de rigidez, longitud libre y amortiguamiento necesarios para definir el resorte.

Ilustración 70. Valores a introducir para crear una unión de muelle Inventor

Muelle helicoidal: Muelle / Amortiguador / Conector:2

Desactivar accionador

Rigidez: 65,000 N/mm

Longitud libre: 120,000 mm

Amortiguamiento: 1,200 N s/mm

Aceptar Cancelar <<

Tipo: Muelle helicoidal

Cotas

Radio: 24,000 mm

Propiedades

Facetas: 10

Vueltas: 5

Radio de conductor: 3,000 mm

+ Transparencia -

Escala: 1,000

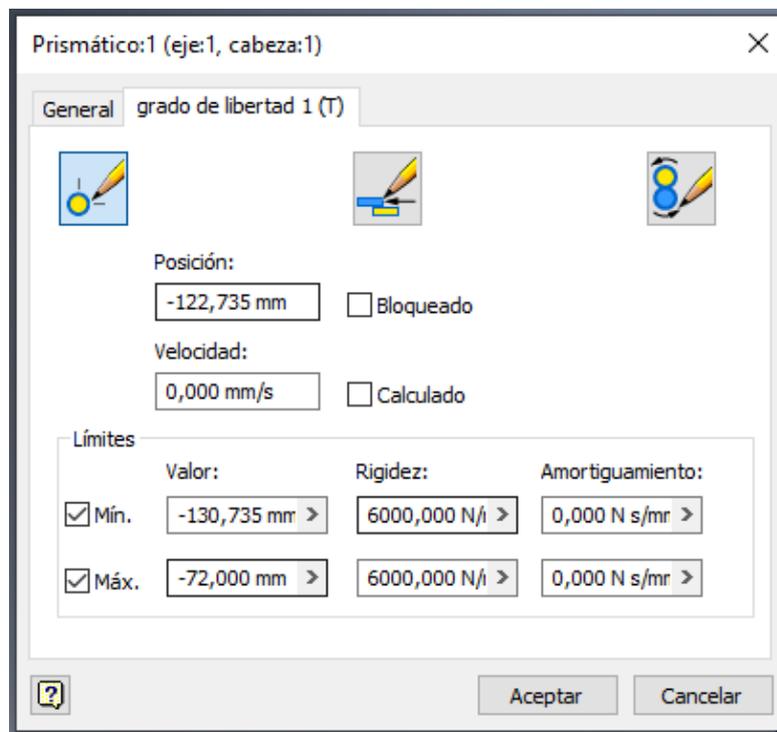
Mostrar

Se introducen como valores iniciales los que se muestran en la figura, que son similares a los calculados en el capítulo anterior con el software Working Model , pero pueden ser modificados a medida que se hagan las simulaciones si el comportamiento no fuese el deseado.

De la misma manera que se hizo en el apartado 6.2, se ha diseñado un modelo básico del sistema de amortiguación Horst Link, con la articulación situada en el tirante superior, para calcular la carrera que necesita tener el resorte para conseguir un recorrido en la rueda trasera de 100 mm aproximadamente, que es lo que se está buscando. Tras varias simulaciones, se obtiene que con una carrera de 50 mm en la suspensión se consigue un recorrido de 106mm.

En las propiedades del par prismático, se puede introducir el valor máximo y mínimo de longitud entre las caras de ambos extremos. Se introducirá para asegurar que la carrera del resorte no sobrepase los 50 mm impuestos. Además, se aplica una rigidez elevada a esta restricción para que se asegure el valor de estos límites impuestos.

Ilustración 71. Valores impuestos en el par prismático



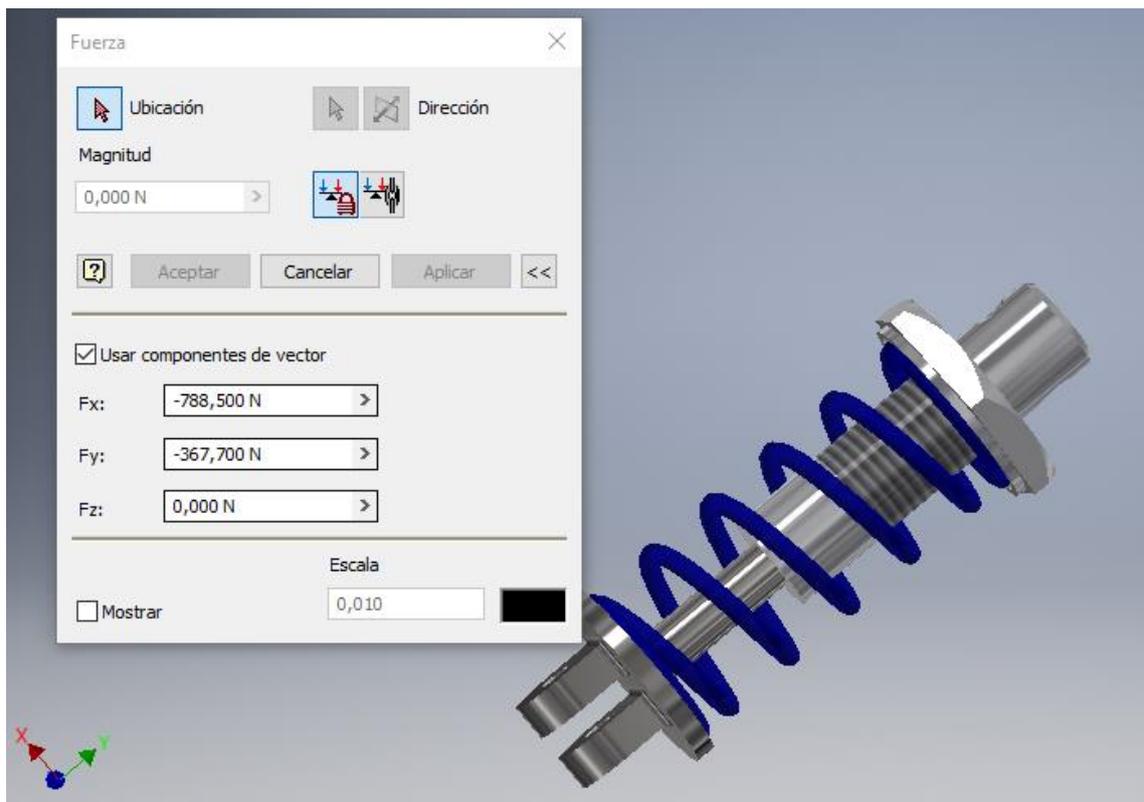
Esta relación entre carrera y recorrido supone que el ratio de acción del final de recorrido del muelle será bajo, lo que indica que habría que aplicar mucha fuerza para llegar hasta el final del recorrido de la rueda. La fuerza que hay que ejercer para comprimir el muelle no es la misma al principio del recorrido que a mitad o al final, cuanto más comprimido esté el resorte más resistencia ejercerá para seguir comprimiéndose. Con los valores de carrera y recorrido que se han obtenidos para la suspensión, se calcula un ratio de acción media de 1:2; es decir, por cada milímetro que se contrae el amortiguador, la rueda se moverá dos milímetros. Como este valor tiene que ir descendiendo de manera que se vaya contrayendo el muelle, se aproxima un ratio inicial de 1:2.5 y conforme se comprime el resorte va descendiendo hasta llegar a valores de ratio 1:1.5.

Lo primero que hay que calcular es si se ha introducido el valor de longitud libre inicial adecuadamente. Para ello se hará el estudio del SAG, que consiste en introducir un prehundimiento inicial para luego en meter una fuerza de valor el peso del ciclista y como resultado se tiene que obtener una reducción de la longitud del resorte entre un 20 y un 35 % de la carrera total de éste. Si esto no se consigue habrá que aumentar o reducir el valor de la constante elástica dependiendo de si se comprime en exceso o en defecto, respectivamente.

Se supone un ciclista de un peso de 80 kg, a esto hay que sumarle el peso del equipamiento (ropa, casco, mochila...) por lo que se suponen 87 kg. Para que sea más exacta la fuerza introducida, la herramienta para insertar nuevas cargas externas permite introducir los componentes del vector.

Aplicada una fuerza de 870 N en la dirección del sillín y conociendo la geometría del cuadro, se pueden calcular las componentes de esta fuerza respecto a los ejes x e y del resorte aplicando funciones trigonométricas.

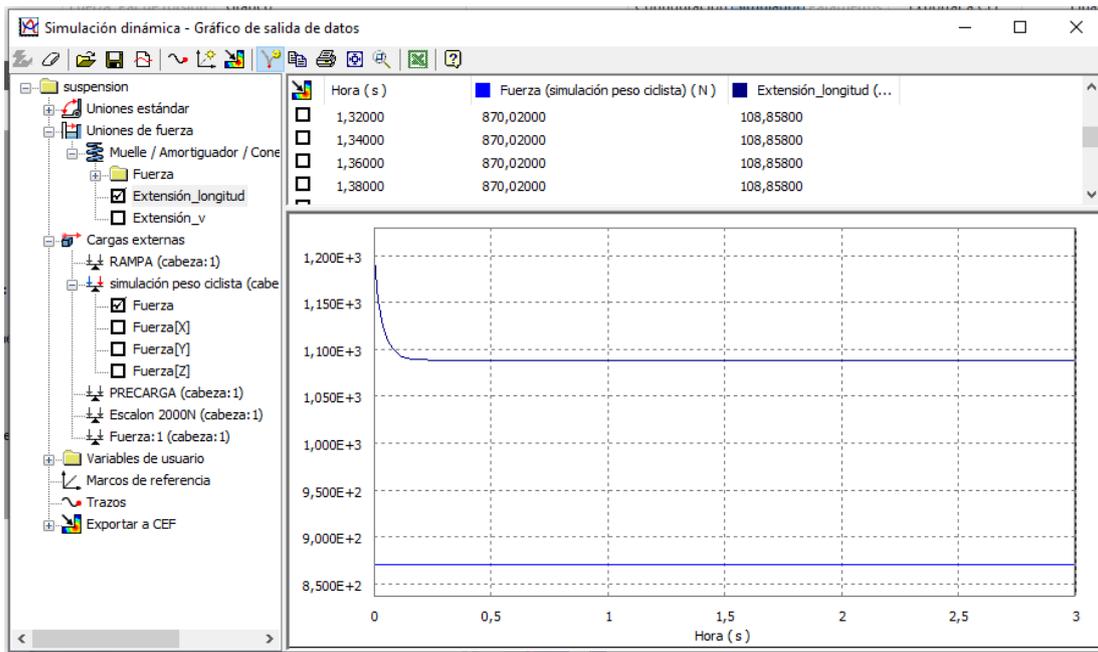
Ilustración 72. Descomposición de la fuerza en vectores



En la esquina inferior izquierda de la imagen se muestra los ejes que se tiene como sistema de referencia. Este es el valor que se introduce para hacer el estudio del SAG.

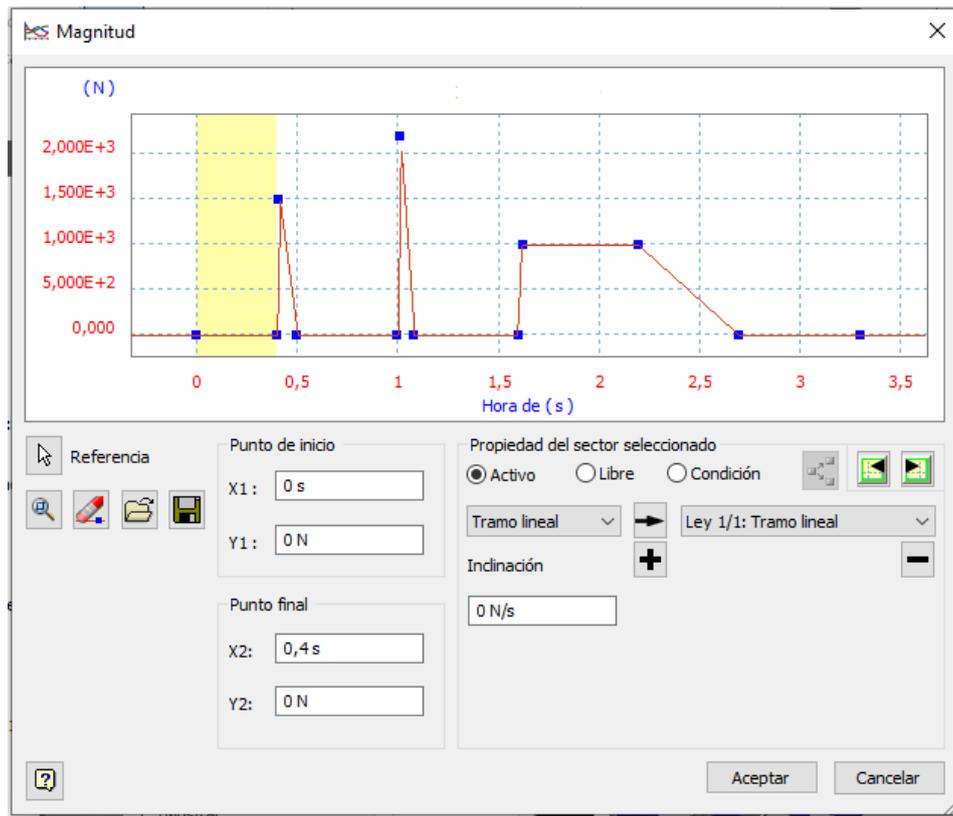
Una vez hecha la simulación, en la gráfica de salida se extraen los datos de la longitud del muelle tras aplicar la fuerza y se observa la gráfica.

Ilustración 73. Longitud del muelle tras aplicar la fuerza del peso



En la gráfica se observa que el muelle, una vez estabilizado, se ha comprimido 11,142 mm. Esta medida corresponde al 22,28% de la compresión total del resorte, por lo que es un valor aceptable de la constante de rigidez. Ahora se harán unas simulaciones aplicando unas fuerzas externas para simular los impactos que podría sufrir al circular por un terreno montañoso.

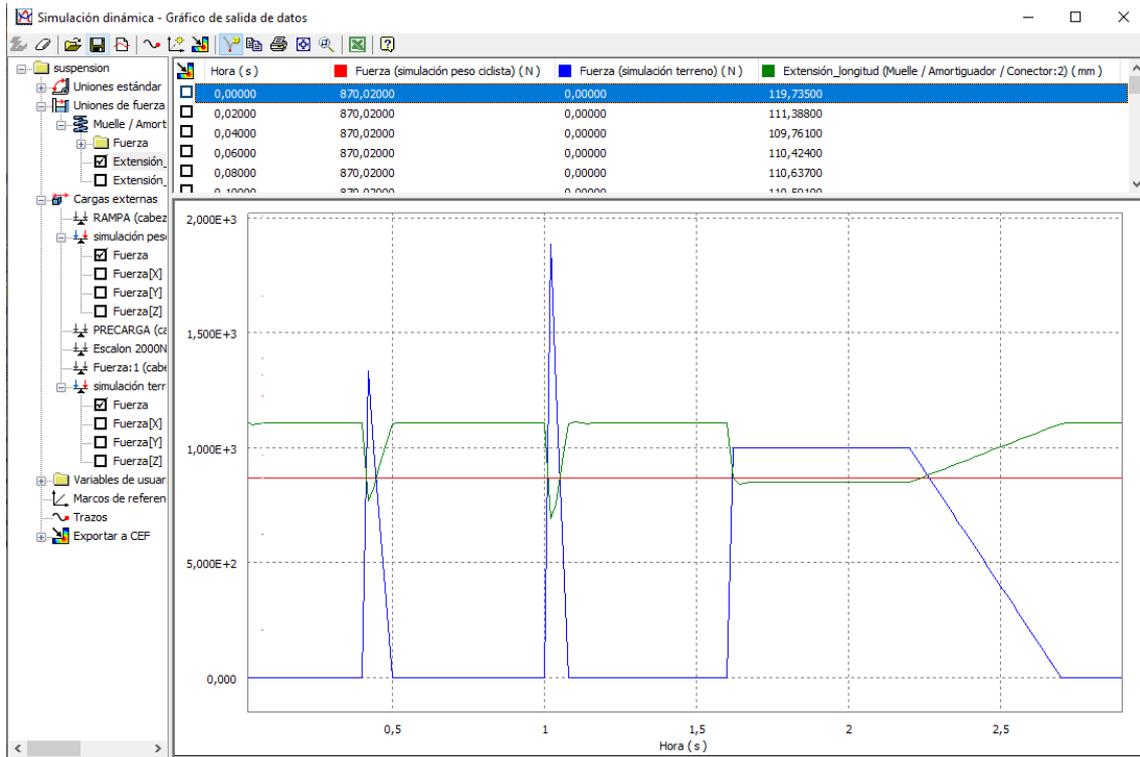
Ilustración 74. Gráfico de entrada de la fuerza introducida



Este gráfico que se muestra es el gráfico de entrada que se ha creado para simular estas fuerzas. Al inicio hay dos fuerzas impulso de valor elevado en dos intervalos de tiempo pequeño que podrían representar el impacto de una rama en las ruedas o una bajada de un escalón, de 1500 y 2200 Newton respectivamente. Por último, una fuerza escalón de 1000 N que se mantiene durante medio segundo y luego se va reduciendo hasta que se elimina, que podría representar una bajada en la que el ciclista tiene que ir de pie en los pedales ejerciendo mayor fuerza en la parte trasera de la bicicleta y reduciendo el peso conforme el terreno se hace plano.

Se realiza la simulación y se comprueba que el comportamiento de la suspensión es bastante bueno, no se producen oscilaciones considerables tras aplicar los picos de fuerza y el muelle vuelve a su longitud inicial centésimas de segundos después de que se termine la fuerza. Para esta simulación también se aplicó de manera constante la fuerza externa perteneciente al peso del ciclista.

Ilustración 75. Comportamiento de la suspensión tras aplicar la fuerza



Se observa que las oscilaciones después de las fuerzas son pequeñas y muy similares al comportamiento de una suspensión real.

4. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN

4.1 NORMATIVA ISO

Tanto para el cálculo como para el diseño se han seguido los requisitos de seguridad y calidad de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). En esta entidad se encuentran las normas de seguridad acerca de las bicicletas. Además, la palabra ISO, proviene de las siglas del inglés International Organization of Standardization, que traducido al español queda como La Organización Internacional de Estandarización, ésta se encarga de establecer un conjunto de normas que permitan la normalización internacional de gran diversidad de productos y sectores.

Al realizar la búsqueda de las normas de bicicleta, se encontraron 45 resultados de norma UNE ('Una Norma Española') sobre los distintos tipos de ciclos. Se encontraron normativas sobre métodos y requisitos de seguridad para bicicletas de niños, bicicletas de paseo, bicicletas de carrera, accesorios de las bicicletas y bicicletas de montaña. A parte de para bicicletas eléctricas, portaequipajes para bicicletas y para remolque de ciclos.

Aunque las bicicletas de montaña son muy polivalentes y muchas personas la utilizan para un uso por la ciudad y paseos, en el análisis se hará desde el lado de la seguridad, aplicando siempre los requisitos que sean más desfavorables, asegurando que si cumple los más restrictivos cumplirá los demás.

Lo primero que hay que asegurarse es que no haya salido una nueva norma que anule la que se estudie en cuestión. En enero de 2015 salió la última versión sobre los requisitos de seguridad de las bicicletas, se dividen en 9 partes según las partes o componentes de la bicicleta. Algunas de estas normas han sido modificadas, siendo la última modificación actualizada el 16 de diciembre de 2015. Este nuevo modo de clasificación pone las mismas normas para los principales tipos de bicicleta, pero expone diferentes valores para los distintos tipos. A continuación, se citan las partes de la norma:

- UNE-EN ISO 4210-1 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 1: Términos y definiciones. (2014-10-22)

- UNE-EN ISO 4210-2 2015 V2 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 2: Requisitos para bicicletas de paseo, para adultos jóvenes, de montaña y de carreras. (2015-12-16)
- EN ISO 4210-3 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 3: Métodos de ensayo comunes. (2014-12-10)
- EN ISO 4210-4 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 4: Métodos de ensayo de frenado. (2014-12-17)
- EN ISO 4210-5 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 5: Métodos de ensayo de la dirección. (2015-09-16)
- EN ISO 4210-6 2015 V2 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 6: Métodos de ensayo del cuadro y la horquilla. (2015-12-16)
- EN ISO 4210-7 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 7: Métodos de ensayo para ruedas y llantas. (2015-01-14)
- EN ISO 4210-8 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 8: Métodos de ensayo para los pedales y el sistema de transmisión. (205-01-14)
- EN ISO 4210-9 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 9: Métodos de ensayo para los sillines y las tijas. (2015-01-14)

Para este trabajo, las partes que interesan de la norma son la 2 y la 6. La parte 2 ha sido tenida en cuenta a la hora del diseño, y la parte 6 es la que explica los ensayos a los que tiene que estar sometido el producto para verificar su correcto funcionamiento. Todas las bicicletas deben cumplir estas normas antes de salir al mercado.

En este apartado se explicarán los principales métodos de ensayo y en qué consiste la fatiga. Los ensayos sería conveniente haberlos podido realizar con alguno de los programas que implementan ensayos más elaborados y análisis a través del método de cálculo por elementos finitos como ANSYS, HYPERMESH, ABAQUS o SolidWorks, pero debido a la crisis sanitaria no se ha podido trabajar en el laboratorio de la universidad y no ha sido posible trabajar con los programas antes mencionados. En la asignatura de 'Ingeniería asistida por Ordenador en Diseño de Máquinas' se iba a haber trabajado con Catia/3D Experience, pero debido a la falta de ordenadores y fallos con el software no ha sido posible. Por lo que se aproximará el estudio

de los ensayos de la mejor manera posible y se implementarán las simulaciones a través de la herramienta de 'Análisis de tensión' que ofrece el software de AutoCad.

Este programa ofrece la posibilidad de trabajar con el método de elementos finitos, que es un método de cálculo muy potente con el que se obtienen aproximaciones de la solución de ecuaciones diferenciales bastante complejas que realizarlas de forma analítica llevaría muchas horas de trabajo.

Para comparar las dos bicicletas se harán algunos ensayos de la norma, con el fin de comprobar cuál tiene mejor capacidad de absorber impactos, además de ser resistente y cumplir con los requisitos de seguridad. Estos son los métodos de ensayo que están incluidos en la parte 6 de la normativa:

- Ensayo de fatiga con una fuerza vertical
- Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo
- Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales
- Ensayo de choque: caída del cuadro
- Ensayo de choque: caída de masa

Estos ensayos han sido creados para garantizar resistencia y durabilidad al producto diseñado. Lo primero, para poder entender dichos ensayos es explicar en qué consiste la fatiga, esto se trata de un concepto de resistencia de materiales.

4.2 RESISTENCIA DE MATERIALES. LA FATIGA

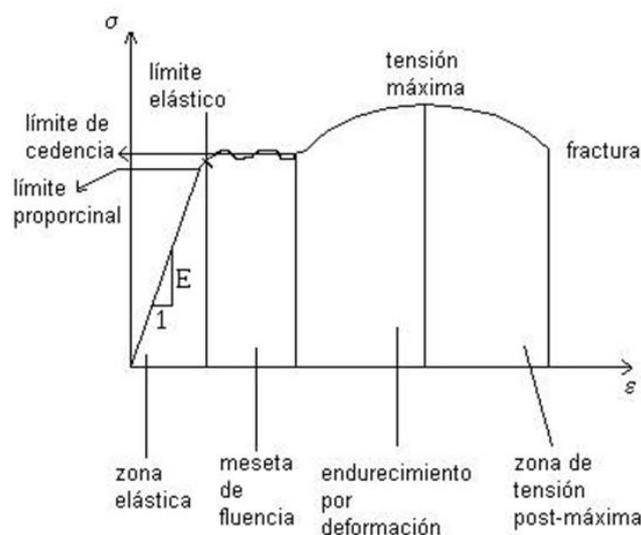
La fatiga es la aplicación cíclica de cargas que considera que bajo este tipo de cargas dinámicas se produce más fácilmente la rotura que con cargas estáticas. Es un proceso de degeneración de un material que se somete a cargas cíclicas de valores inferiores a los que supondrían su rotura por tracción.

En los ensayos de fatiga hay que considerar algunos factores de vital importancia para poder controlar el comportamiento del material, en este caso el aluminio, en estos ensayos. Los

principales factores son el criterio de fallo a fatiga, los ciclos de aplicación de la carga y la curva de vida del material.

Aunque no está del todo demostrado, se afirma que la fractura por fatiga se debe a deformaciones plásticas. Este tipo de deformaciones es en las que el material ya nunca vuelve a estar en su forma inicial al retirar la carga, esto es debido a que el material supera el límite elástico produciéndose cambios termodinámicos que impiden que el material vuelva a tener las propiedades originales. Cuando pasa esto se dice que el material ha sufrido una deformación plástica. En este tipo de deformación no se cumple la Ley de Hooke, que establece una relación entre la fuerza aplicada y, el módulo de Young y la sección transversal de la pieza que se estira.

Ilustración 76. Gráfica tensión - deformación



Fuente: <https://www.monografias.com/trabajos72/diagrama-esfuerzo-deformacion/>

En la gráfica superior se muestra hasta donde llega la zona elástica, que es hasta donde se cumple la ley de Hooke, en esta zona las deformaciones que sufre el cuerpo son temporales, una vez se retira la carga el cuerpo recupera su forma original. Hay materiales que tienen mayor capacidad para sufrir elongaciones grandes y luego volver a su longitud original. Esta gráfica existe para todos los materiales, aunque dependiendo de sus propiedades puede clasificarse como dúctil o frágil, entonces la curva tomará una forma u otra.

En el caso del Aluminio 6061, que es el material que se ha utilizado para modelar los componentes del cuadro, depende de la forma en las que haya sido tratado térmicamente el material tendrá unas propiedades mecánicas distintas. Para el caso de la forma templada T6 la resistencia máxima a tracción es de 310 MPa, con un límite elástico de 275 MPa, llegando a elongaciones de hasta el 10%.

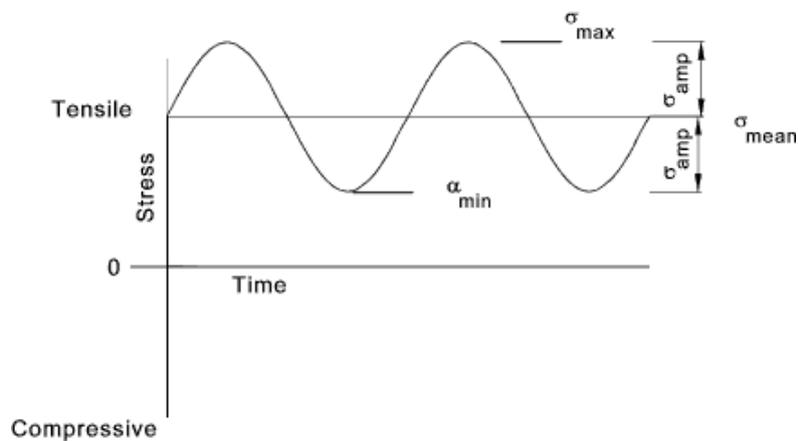
Ilustración 77. Propiedades mecánicas del Aluminio 6061

Coeficiente de Poisson	0.33
Límite elástico a compresión	280 MPa
Límite elástico a tracción	275 MPa
Límite de rotura	310 MPa
Módulo de Young	71 GPa

Los resultados de los análisis de carga a fatiga se muestran mediante contornos que representan los ciclos que es capaz de soportar la estructura antes de que se inicie alguna grieta. El número de ciclos necesarios para que se produzca el fallo por fatiga depende del material y de la fluctuación de las tensiones.

Los ciclos de tensión que se aplican pueden ser muy variados. En algunos puede darse que la tensión media sea nula, son los que se conocen como ciclos de carga invertida, en los que la relación de tensión (R) vale -1. En aquellos que se aplica carga y se elimina, valdrá R=0.

Ilustración 78. Representación de un ciclo de tensión



Fuente: [www.iberisa.com/soporte/fatiga/into.htm](http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm)

- Índice de Reversión: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
- Tensión alterna: $\sigma_a = (1/2) * (\sigma_{max} - \sigma_{min})$

Hay una expresión logarítmica que relaciona los valores de N y $\Delta\sigma$, a través de esta fórmula matemática se representa la gráfica S-N mostrada anteriormente. Las constantes a y m serán unos valores conocidos característicos de cada material.

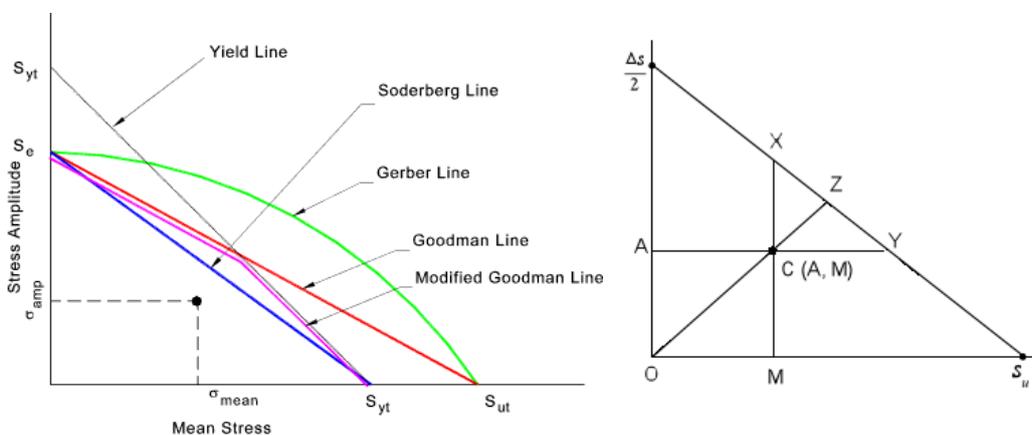
$$\log N = \log a + m \log \Delta\sigma$$

Los resultados experimentales demuestran que la tensión media aplicada en los ciclos de carga tiene especial importancia a la hora de calcular la resistencia a fatiga.

Cuando se aplica un ciclo de carga de tensión media nula, hay que utilizar alguno de los tres métodos de corrección para poder definir correctamente las propiedades de fatiga del material. Los métodos de Goodman, Gerber o Soderberg establecen los fenómenos que deben ocurrir para que se produzca el fallo. El criterio de Gerber es el más exacto y el de Soderberg el más restrictivo.

El factor de seguridad a fatiga (FSF) deduce si la estructura fallará debido a las cargas cíclicas. Gracias al este factor y haciendo uso del diagrama de Goodman se obtienen los ciclos más desfavorables para una pieza en concreto. Este criterio utiliza la tensión última del material y la máxima tensión alterna.

Ilustración 79. Curvas de los distintos métodos de corrección. Soderberg



Fuente: www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm

En la gráfica superior, el punto C representa la tensión de un ciclo, siendo A la tensión alterna y M su tensión media. Su hace referencia a la tensión última del material, y ΔS_2 es la máxima tensión alterna que aún no consigue dañar el material. Dependiendo del criterio que se utilice se cogerá la curva correspondiente, y para que el estudio resulte seguro hay que verificar que el cociente entre el valor desde el origen hasta el punto de Z de corte con la curva, dividido entre el valor desde el origen hasta el punto C que indica la tensión sea mayor que 1.

El método de Goodman utiliza una ecuación para calcular la tensión alterna corregida, esta fórmula es la siguiente:

$$S_{ca} = \frac{S_u S_a}{S_u - S_{mean}} = \frac{S_a}{1 - \left(\frac{S_{mean}}{S_u}\right)}$$

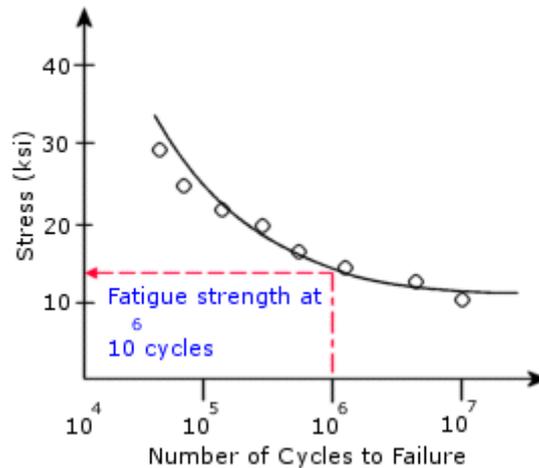
Donde:

- S_u = límite de ruptura a tracción
- S_a = tensión alterna
- S_{mean} = tensión media

Una vez aplicada esta fórmula, si se puede utilizar en la curva S-N para obtener una aproximación de la vida a fatiga del componente.

En los materiales metálicos existe una curva que determina el número de ciclos a aplicar para llegar a la rotura dependiendo del valor de tensión con el que se aplique dicha carga. Existe un valor de tensión por debajo del cual el material no llegará a la rotura independientemente del número de ciclos que se aplique.

Ilustración 80. Curva S-N. Límite de fatiga



Como se aprecia en el gráfico, conforme disminuye el valor de tensión la curva se va haciendo cada vez más plana, hasta que llega a ponerse paralela con el eje de abscisas y ese corresponde al valor del denominado *límite de fatiga*.

Además, para trabajar del lado de la seguridad, y para asegurar cumplir los requisitos de la norma se aplicará un coeficiente de seguridad.

Este factor de seguridad (n) se aplicará a la tensión del límite elástico y lo que hace es reducir el valor de la tensión máxima admisible para el ensayo. Se utiliza como medida de seguridad.

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{adm}}$$

El factor de seguridad deberá ser siempre superior a 1 para hacer efectivo esta reducción en la tensión admisible en el ensayo.

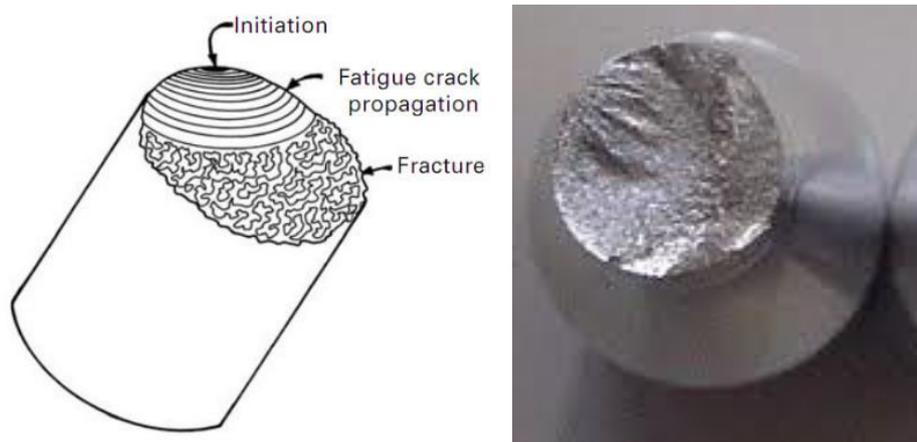
El fallo por fatiga llega a darse tras producirse unas fases previas:

1. Primera fase: iniciación. Empieza a desarrollarse una o más grietas, éstas suelen aparecer en alguna zona de concentración de tensiones, donde haya un visible estrechamiento del material o alguna irregularidad que facilite la aparición de grietas, ya sea rozadura, arañazo, entallas, manipulación del material o algún poro. Esta fase puede llegar a suponer un 90% de la vida de la pieza, siempre y cuando se trate de una pieza sin entalla inicial.

2. Segunda fase: propagación. Una de las grietas comienza a agrandarse por la continuación de la carga aplicada, reduciéndose la sección resistente.
3. Tercera fase: rotura. La sección en la que se encuentra la grieta inicial sigue reduciéndose hasta llegar a una sección pequeña que no es capaz de soportar la carga a la que está sometida, por lo que se produce la rotura por fatiga.

Para producirse el fallo por fatiga tienen que darse, por tanto, algunas condiciones simultáneamente. Debe de haber tensiones que superen el límite de fatiga, variación de la tensión con el tiempo y un número de ciclos de carga lo suficientemente elevado. Este es el aspecto que tiene un material que ha desarrollado un fallo por fatiga.

Ilustración 81. Muestra de una pieza con rotura por fatiga



Fuente: www.bibing.us.es/proyectos/abreproy/4089/fichero/4.pdf

Existen algunos métodos para intentar evitar la rotura por fatiga en los materiales, que pueden ser aplicados a las piezas a la hora de fabricarlos. Algunos de estos factores están relacionados con la superficie del material, sección de la pieza y geometría. Una geometría regular, sin irregularidades visibles, con un buen acabado superficial y endurecimiento superficial favorecerá la vida de la pieza. Un sobredimensionado ayudará a reducir los niveles de tensión.

Una tensión media no nula de tracción es muy perjudicial, ya que favorece el crecimiento de la grieta. Sin embargo, una tensión media de compresión la mejora.

4.3 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS SEGÚN LA NORMA

En este subapartado se compararán los comportamientos que muestran ambos cuadros al aplicar algunos de los ensayos propuestos por la normativa. Aunque el software de Autodesk no permite realizar ensayos de fatiga, se realizaran los ensayos aplicando una fuerza superior a la que se indica para aproximar el comportamiento al que sufriría por someterse a ciclos de carga.

Se explicará el método de realización de los ensayos que vayan a realizarse y posteriormente se mostrarán los resultados obtenidos en ambos cuadros.

Para realizar el análisis habrá que seguir unos pasos para asegurarse su correcta realización:

- Diseñar el modelo y las piezas auxiliares necesarias para el ensayo, y seleccionar el material de las mismas.
- Introducir las restricciones necesarias para que el modelo tenga los grados de libertad necesarios.
- Realizar un mallado del modelo.
- Introducir las cargas externas.
- Realizar el análisis.
- Analizar y comprobar los resultados, es trabajo del ingeniero interpretar y saber si ha sido realizado con éxito, si los resultados se aproximan a lo que se esperaba. Repetir análisis, cambiando restricciones, mallado o cargas en caso de que no se haya obtenido el resultado esperado.

A pesar de tener un programa que sea capaz de realizar los ensayos propuestos por la norma y que éstos se superen con éxito, una vez se fabrica un producto siempre hay que realizar el ensayo en una muestra real para cerciorarse de que cumple con éxito los requisitos de seguridad.

4.3.1 Ensayo de fatiga con una fuerza vertical

Para la realización de este ensayo se modelará una especie de sillín para poder aplicar la fuerza vertical correctamente. Además, tanto para este como para los demás ensayos habrá que introducir en el ensamblaje una horquilla rígida para añadir ahí las restricciones de movimiento.

Para el cuadro de doble suspensión se modela una barra rígida que se situará en el lugar de la suspensión, con el fin de bloquearla.

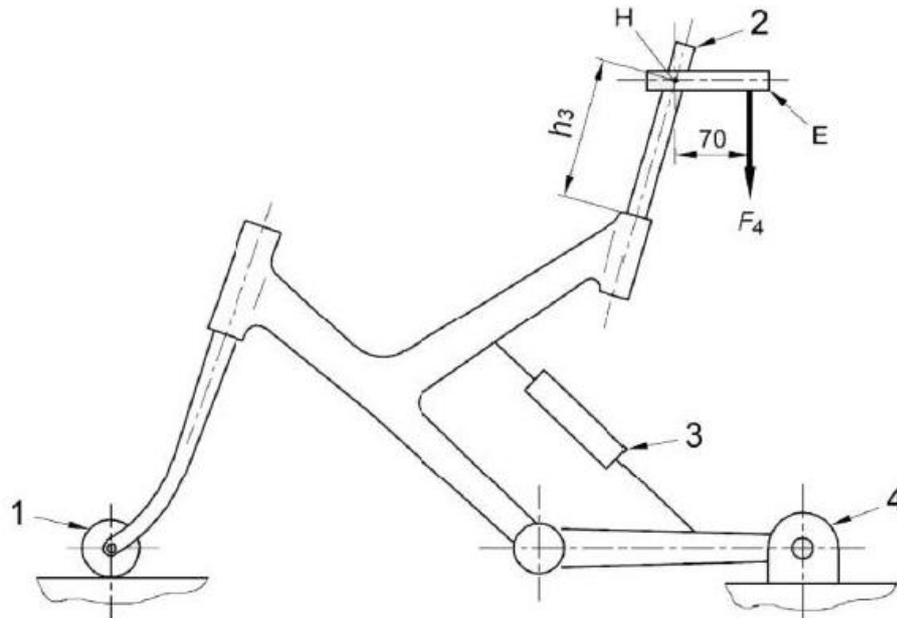
Este será el aspecto que tendrá el cuadro doble para la realización de los ensayos.

Ilustración 82. Cuadro de doble suspensión ensamblado con los elementos auxiliares necesarios para el ensayo



En la siguiente imagen se muestran los requisitos que tiene que tener el cuadro para realizar este ensayo.

Ilustración 83. Método de realización del ensayo de fuerzas verticales



Donde:

- E Extensión horizontal rígida hacia atrás
- H Posición equivalente al centro de la fijación del sillín con la bicicleta
- 1 Rodillo que puede girar libremente
- 2 Barra de acero
- 3 Unidad de suspensión bloqueada o una unión rígida para vainas pivotantes
- 4 Montura pivotante rígida para el punto de fijación del eje trasero

Los valores de las variables deben de ser los siguientes para el caso de las bicicletas de montaña:

- Fuerva $F_4 = 1200 \text{ N}$
- Longitud de la tija $h_3 = 250 \text{ mm}$

Para hacer correctamente el ensayo, se deben realizar los apoyos 1 y 4, tal y como se muestran en la figura superior.

El punto 4 se trata de un punto de rotación. Este punto restringe el movimiento de translación en todas las direcciones, en los ejes x,y,z y el giro en todos los ejes excepto el perpendicular

a la vista que se ofrece, sólo podrá realizar giro respecto al eje y. Esta condición se aplica con la herramienta de 'Restricción de pasador' que se encuentra en el programa.

El punto 1 se trata de una especie de rodillo que permite el desplazamiento en el eje x y el giro respecto al eje y. Se ha modelizado la horquilla de esa manera para que sea más sencillos aplicar estas condiciones de contorno, al poner la cara inferior plana se podrá impedir el movimiento en la dirección normal a la cara con la opción de 'Restricción sin fricción' de Inventor.

Para el mallado se hará un mallado variable, para así ahorrar tiempo en el análisis y no estudiar al detalle las piezas que no lo requieran. Para ello se hace uso de la herramienta de 'control de malla local', con la que se podrá poner mayor número de nodos en las partes críticas.

Ilustración 84. Mallado realizado en el modelo



Resultado para el cuadro doble

Ilustración 85. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales

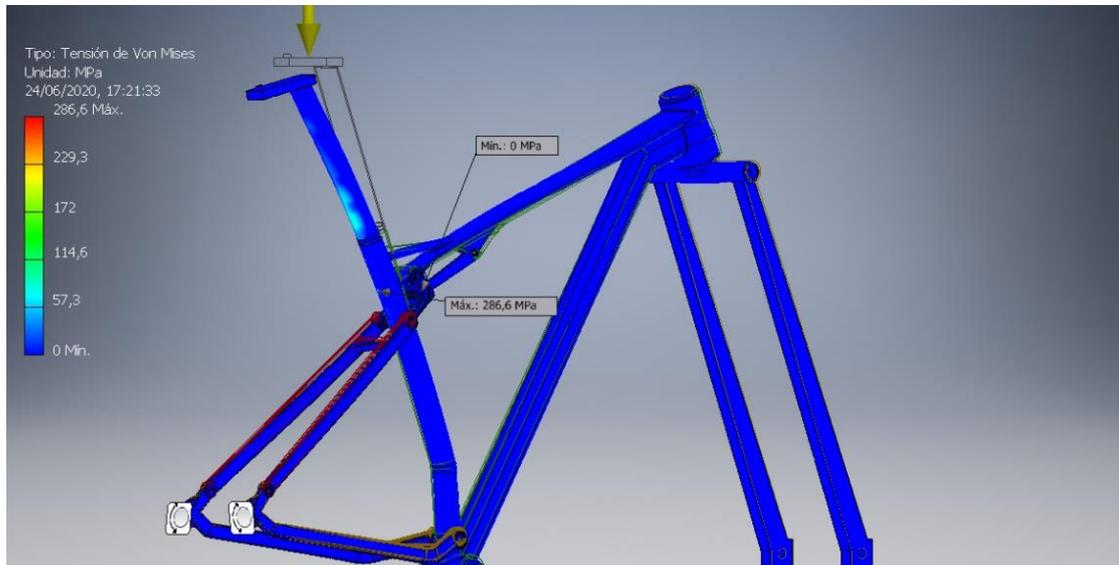


Ilustración 86. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales

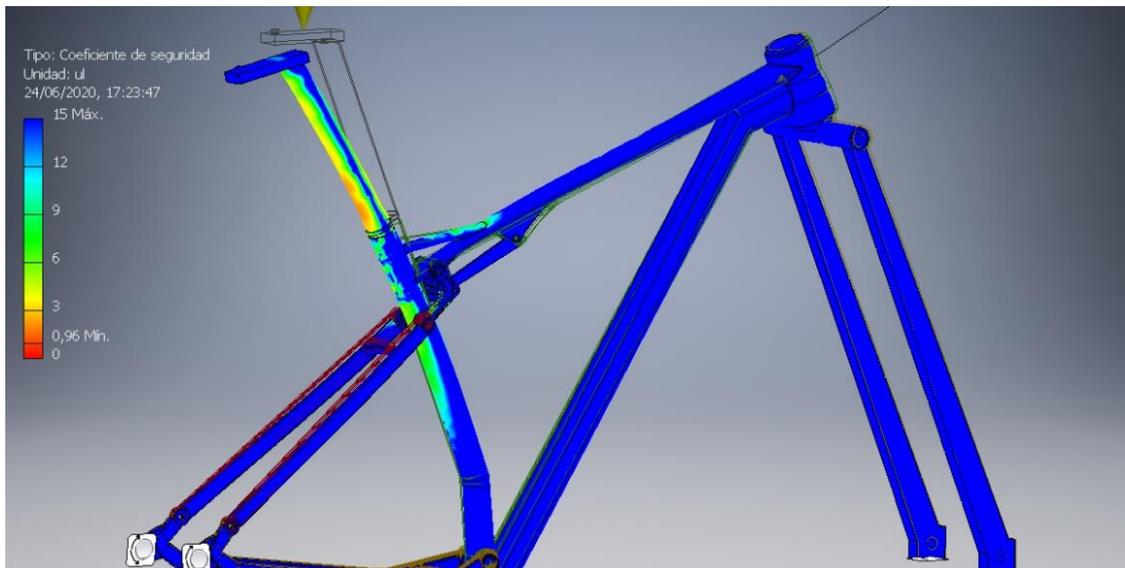


Ilustración 87. Tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales aplicando directamente en los tirantes

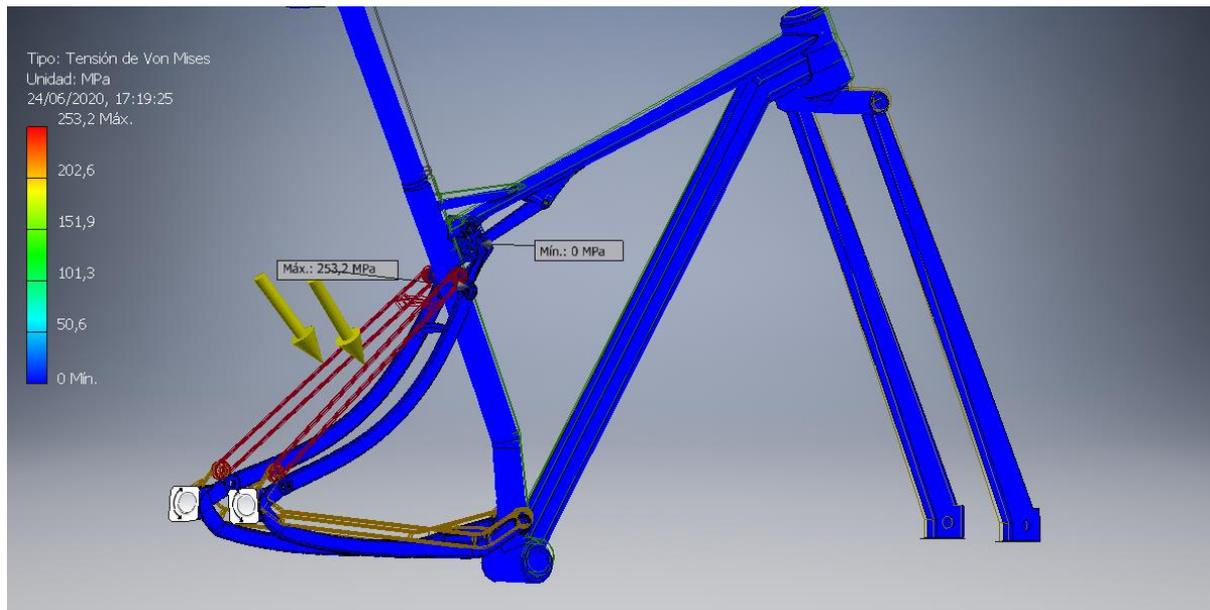


Ilustración 88. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales aplicando directamente en los tirantes



Resultado para el cuadro rígido

Ilustración 89. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales para el cuadro rígido

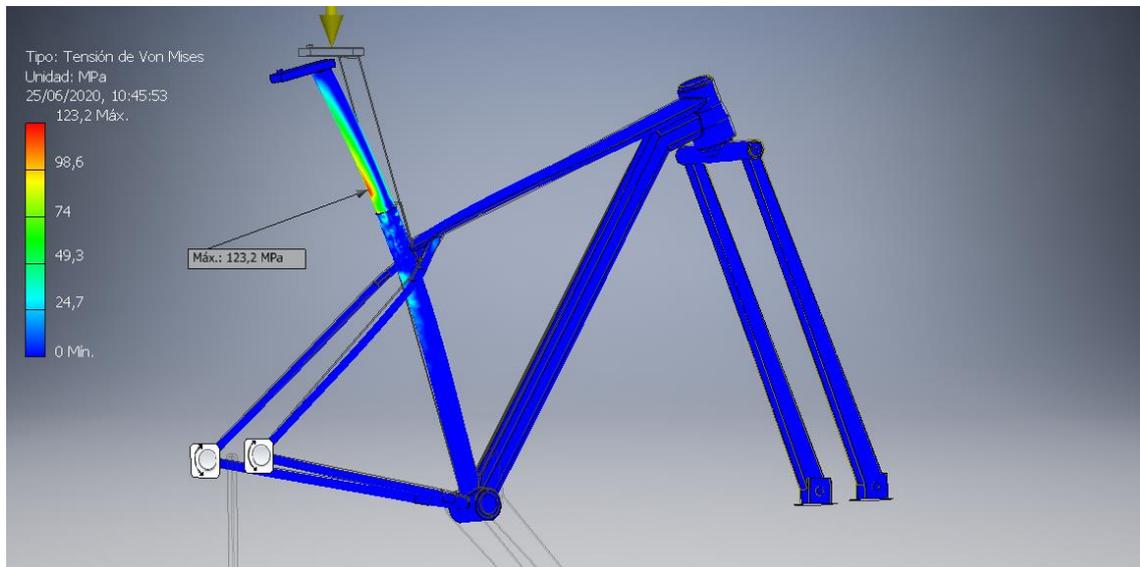


Ilustración 90. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas verticales para el cuadro rígido

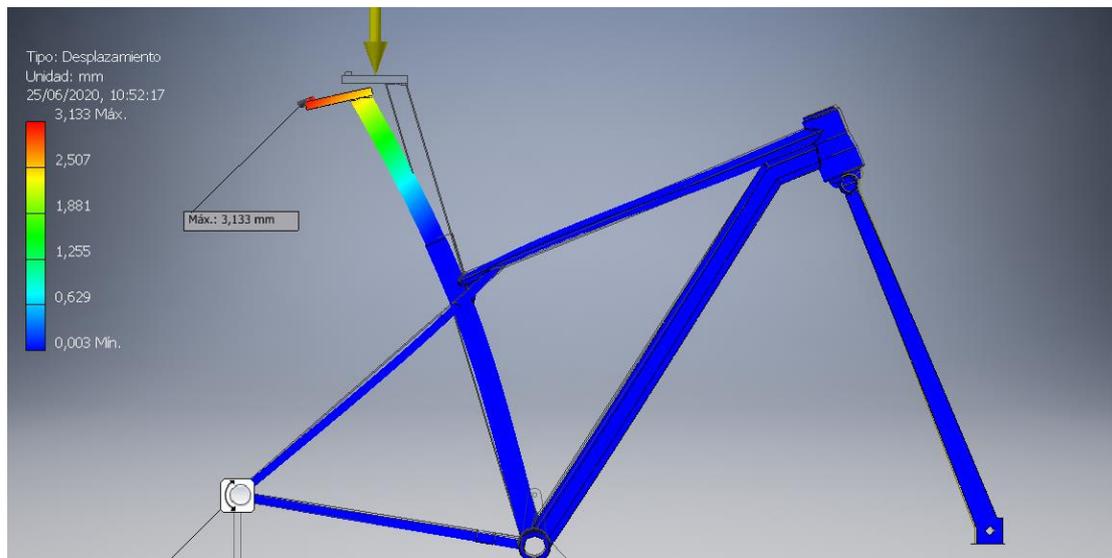


Ilustración 91. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales para el cuadro rígido



Conclusiones ensayo de fuerza verticales

El software de Autodesk Inventor, al realizar las simulaciones, exagera gráficamente los desplazamientos de las barras para que puedan ser visibles.

En el caso del cuadro doble se cumple los requisitos. En las dos primeras figuras, en las que se aplica la carga en el sillín, se dan las tensiones máximas en la tija, llegando a valores de 266 MPa. La tensión máxima de Von Mises que se da en el conjunto del cuadro es menor de 100 MPa, por lo que se aprecia que el coeficiente de seguridad mínimo en el cuadro es mayor de 3.

Como las tensiones máximas se estaban dando en la tija, se pasó a introducir dos nuevas cargas de 600 N en los tirantes del cuadro. Aunque no es equivalente al ensayo de la norma, sirve para demostrar que no se sobrepasa el límite elástico, ya que la tensión máxima se da en la unión entre tirante y pivote, que se trata de un punto de contacto crítico y su valor es de 252,2 MPa, que se trata de un valor elevado, pero aun así se consigue un coeficiente de seguridad superior a 1. Cabe decir que este valor de tensión se vería reducido en la vida real al introducir los rodamientos, ya que aumentaría considerablemente el contacto en la zona de unión entre ambas piezas.

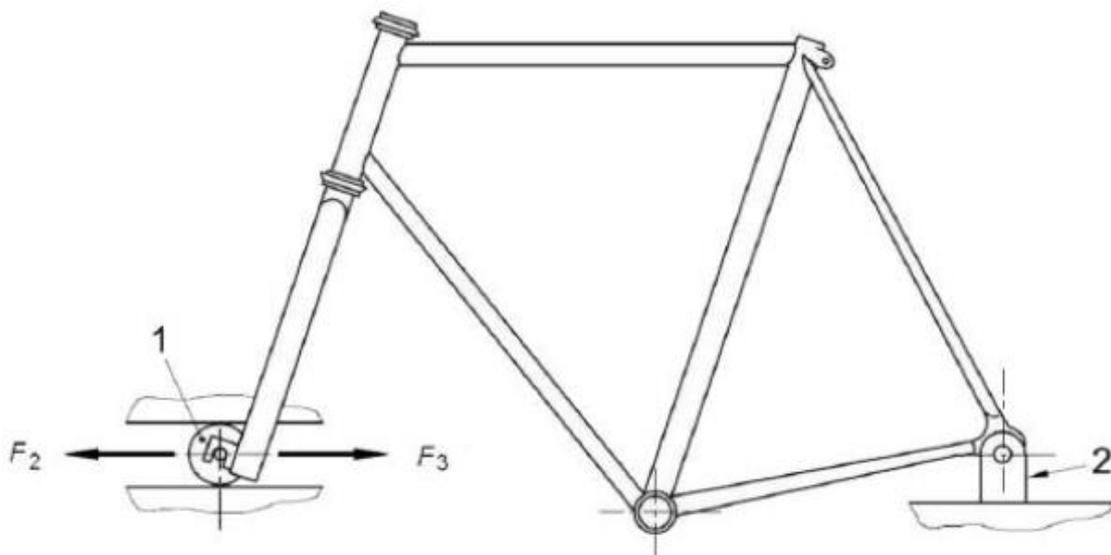
Para el cuadro rígido, la máxima tensión se vuelve a dar en la tija, de valor 123,2 MPa, se puede ver que en el tubo del sillín hay una zona de tensiones elevadas, pero son inferiores a el valor máximo, por lo que cumple los requisitos. La zona de unión de los tirantes con el cuadro es una zona crítica, pero su coeficiente de seguridad es superior a 2,5 por lo que se acepta.

4.3.2 Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales

En este ensayo no es necesario tener en cuenta el sillín, por lo que se excluye del estudio. Como se aprecia en la figura inferior, las restricciones de movimiento en los apoyos son las mismas que en el ensayo anterior. El punto uno será un punto que se desliza por un pasador, tiene permitido desplazamiento en el eje x y giro respecto al eje y; con respecto al punto 2, se trata de un punto de rotación, cuyo uno grado de libertad permitido es el giro sobre el eje y.

Las condiciones del ensayo son:

Ilustración 92. Método de realización del ensayo de fuerzas horizontales



Donde los valores de las fuerzas son las siguientes:

-Fuerza hacia delante $F_2 = 1200$ N

-Fuerza hacia atrás $F_3 = 600$ N

Se realizarán dos estudios distintos, en el primero se aplicará la fuerza hacia delante de 1200 N, que se dividirá en dos fuerzas de 600 N en cada uno de los lados de la horquilla, y un segundo estudio que se realizará poniendo 300 N en cada una de las partes traseras de la horquilla rígida. No se realiza a la vez ya que se superpondrían las fuerzas, resultando una única fuerza hacia delante de 600 N.

En las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos para los dos estudios en ambos cuadros.

Resultados para el cuadro doble

Ilustración 93. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas horizontales. 1200 N

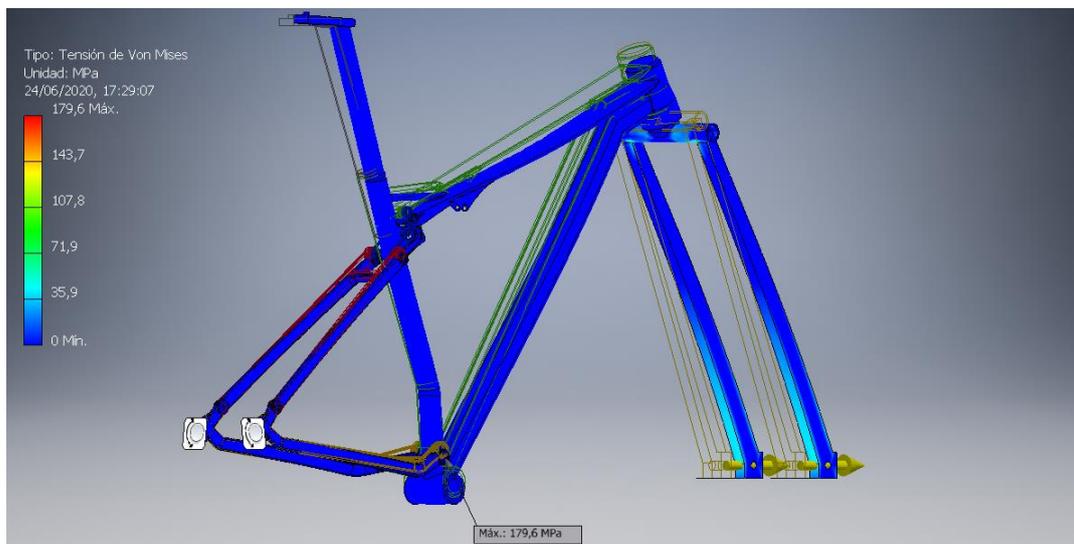


Ilustración 94. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas verticales 1200 N

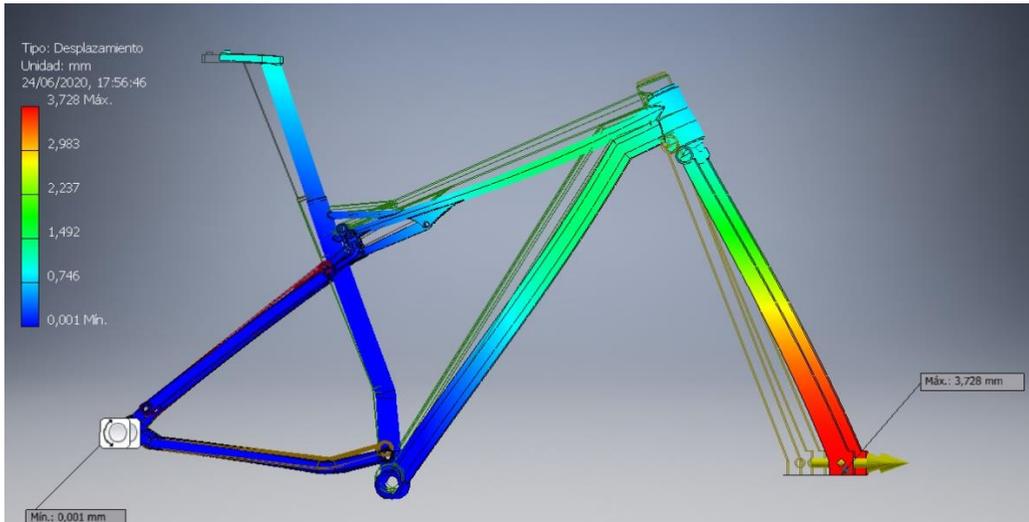


Ilustración 95. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales 1200 N

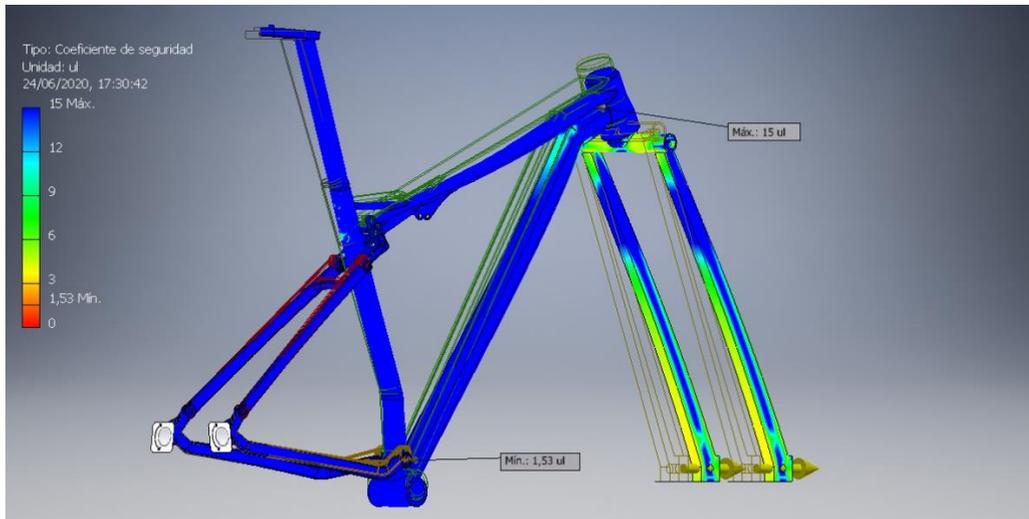


Ilustración 96. Tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales 600 N

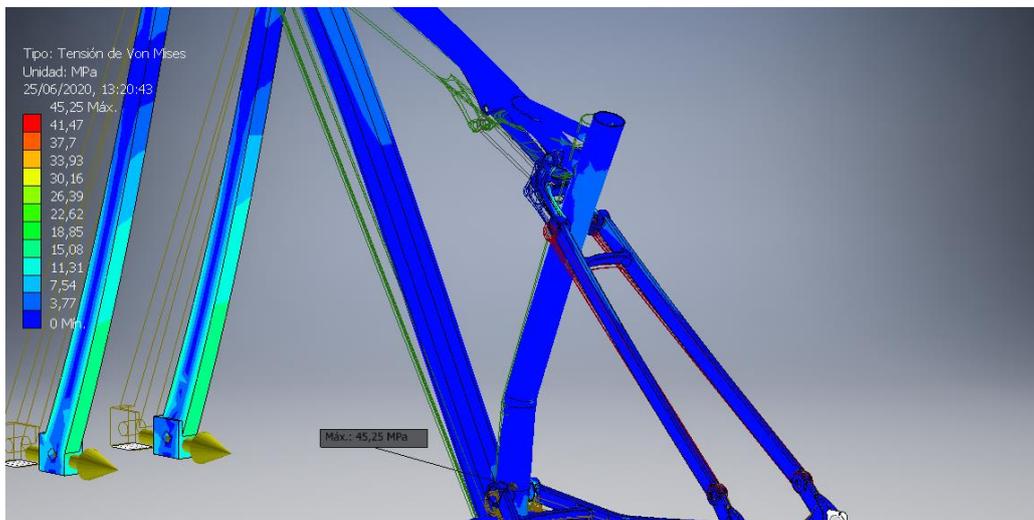


Ilustración 97. Detalle de la tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas verticales 600 N

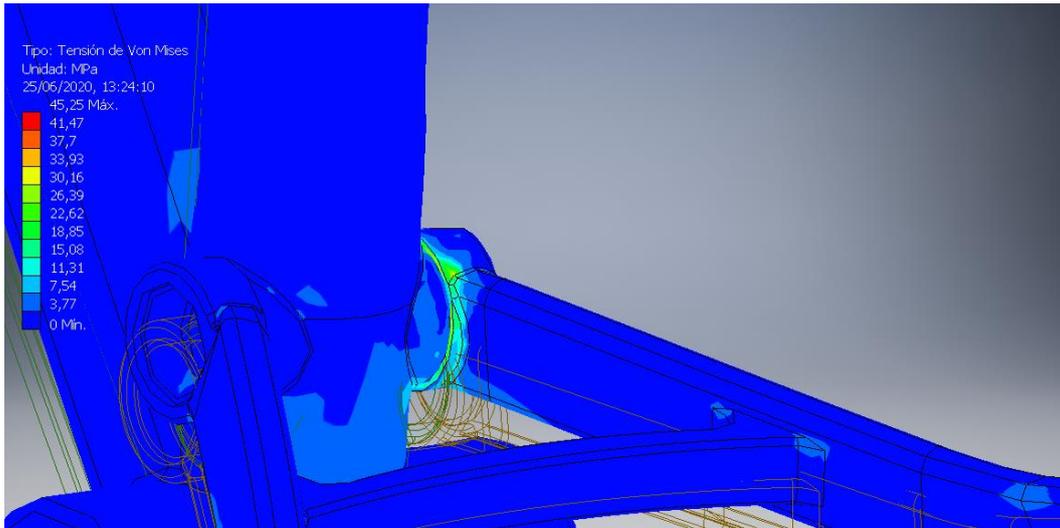
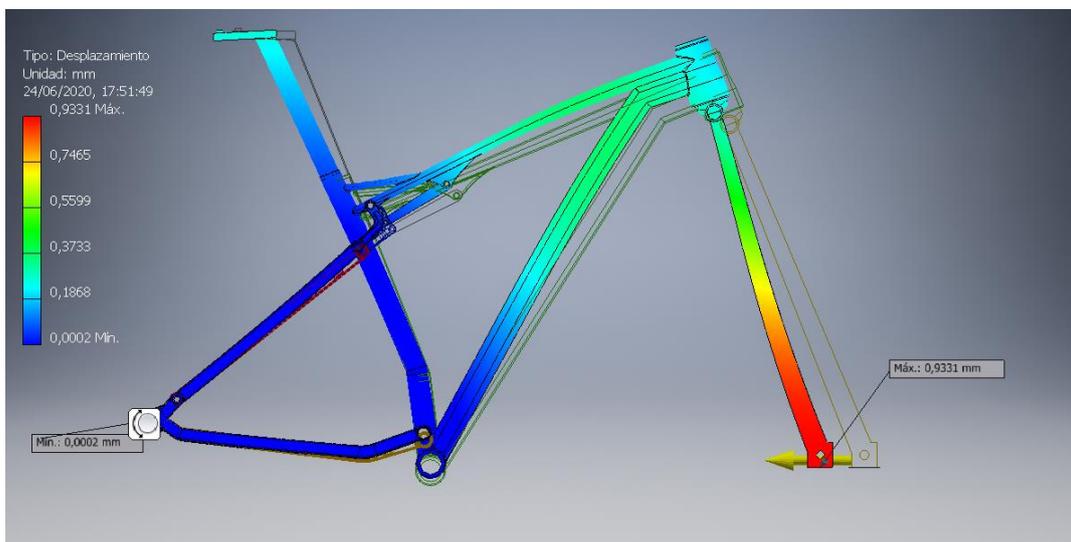


Ilustración 98. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas verticales 600 N



Ilustración 99. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas verticales 600 N



Resultados para el cuadro rígido

Ilustración 100. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas horizontales 1200 N para el cuadro rígido

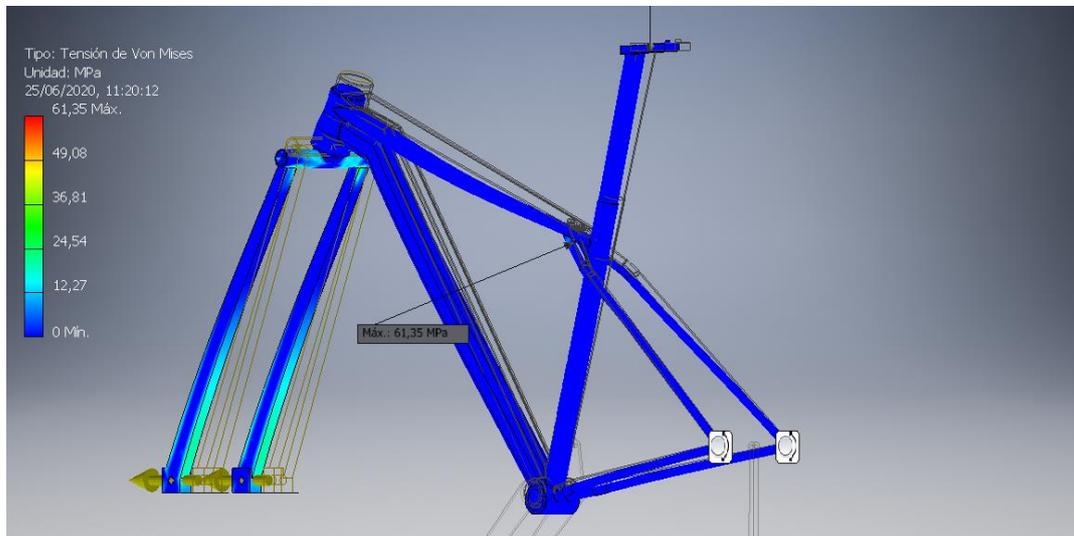


Ilustración 101. Detalle cuadro rígido tensiones de Von Mises

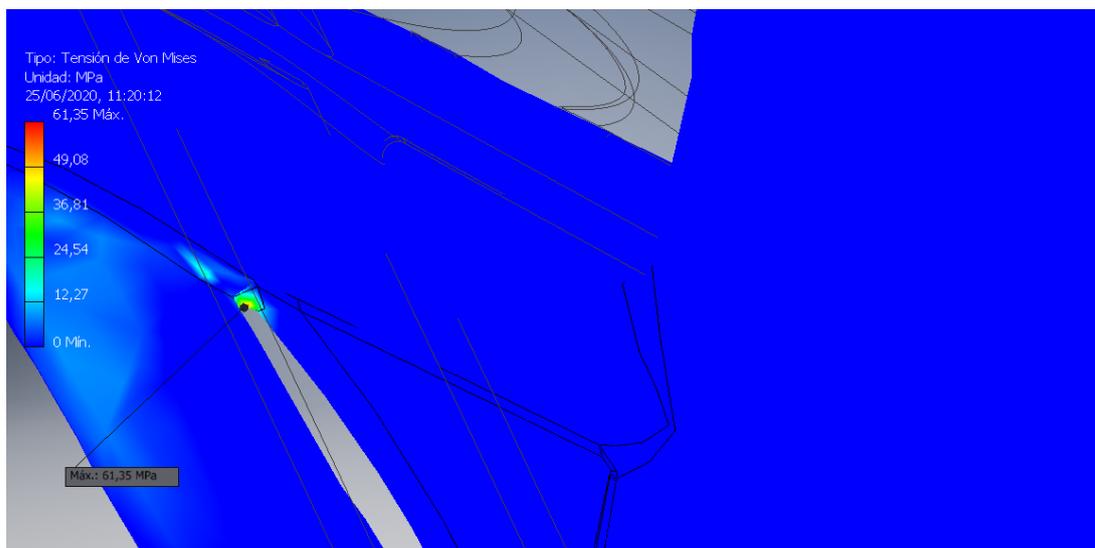


Ilustración 102. Primera tensión principal en el ensayo de fuerzas horizontales 1200 N para el cuadro rígido

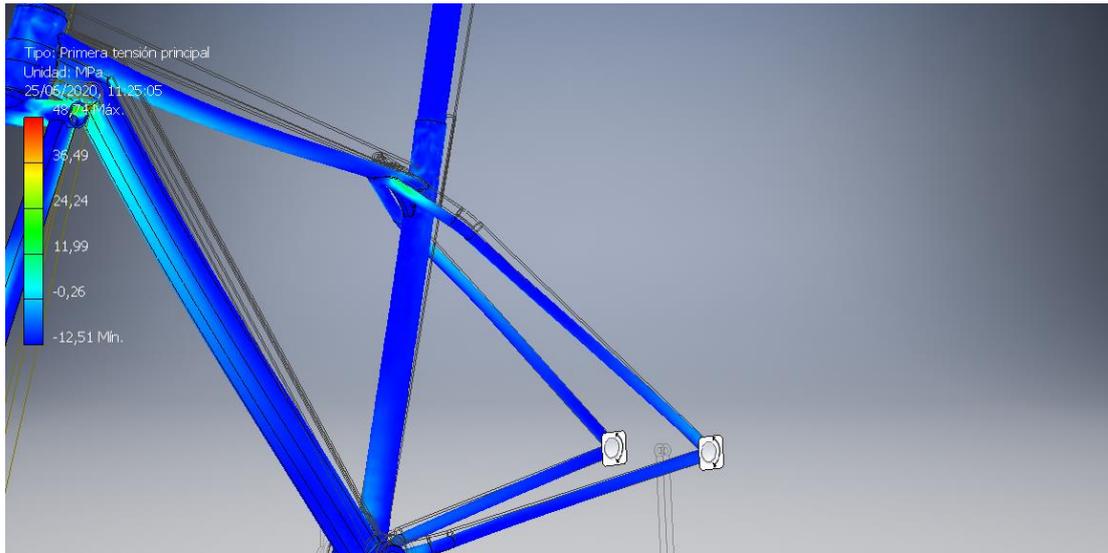


Ilustración 103. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas horizontales 1200 N para el cuadro rígido

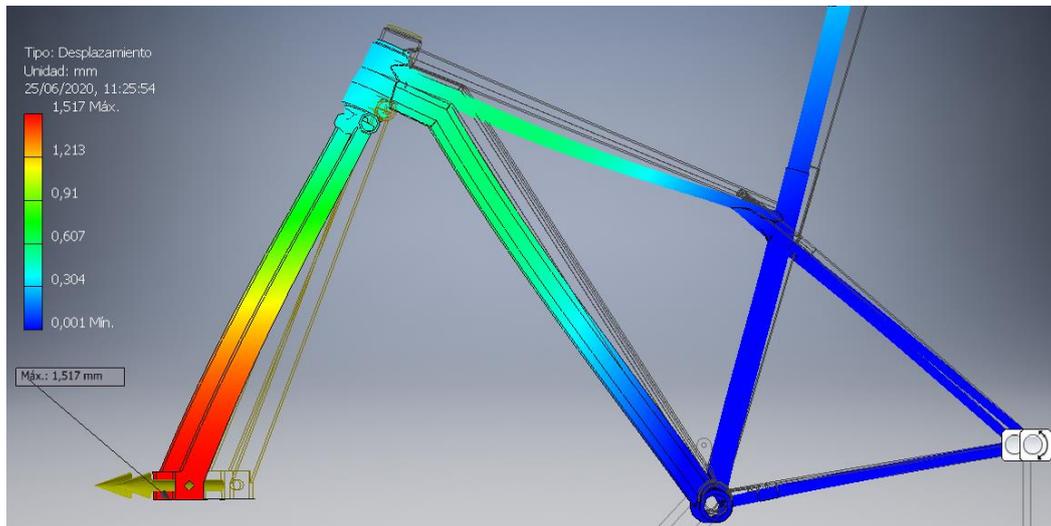
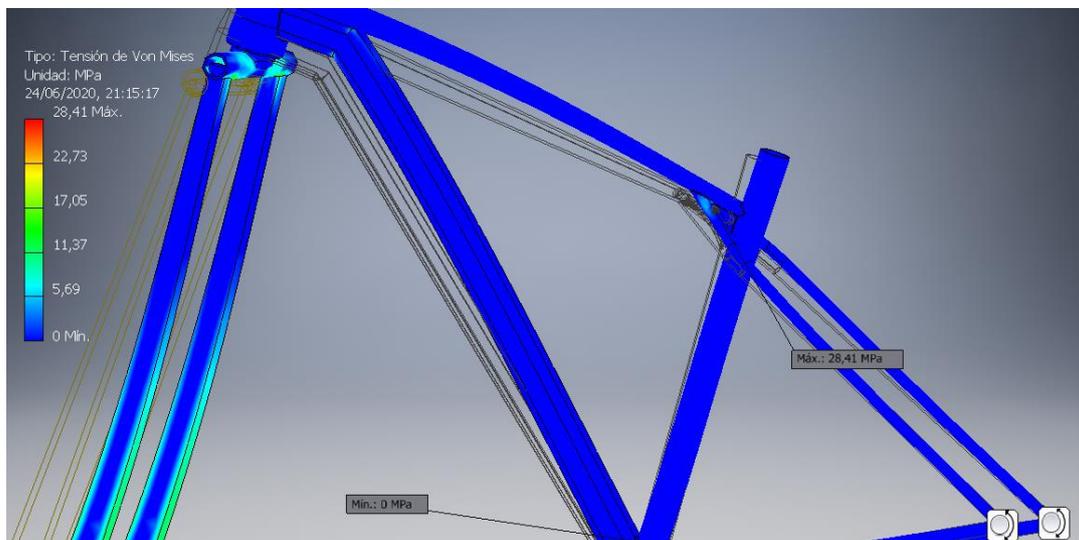


Ilustración 104. Tensión de Von Mises en el ensayo de fuerzas horizontales 600 N para el cuadro rígido



Conclusiones ensayo de fuerzas horizontales

Para el cuadro de doble suspensión, al aplicar la fuerza de 1200 N hacia delante se observa un valor máximo de tensión de Von Mises de 179,6 N y se da en un punto de unión, esta vez entre vainas y cuadro. En este punto falta colocar un rodamiento, que haría que esta tensión se redujese considerablemente. Por lo que el coeficiente de seguridad será superior a 2 en todos los puntos del cuadro

El desplazamiento máximo es algo elevado, pero como se da en la horquilla en ambos casos no es problema, ya que se trata del punto de aplicación de la carga.

En el cuadro rígido sucede algo similar, el desplazamiento máximo se da en la parte inferior de la horquilla. Y el valor máximo de tensión de Von Mises se vuelve a dar en el mismo lugar, pero con un valor inferior, esta vez de 45,25 MPa, esto quiere decir que el coeficiente de seguridad mínimo de 1 se supera con creces. Se ha añadido una foto en la que se aprecia mejor donde se sitúa el punto de tensión máxima en ambos estudios, en el contacto entre vainas y cuadro.

Para el cuadro rígido, la tensión máxima esta vez se da en una soldadura. En la parte inferior del tubo diagonal inferior también se aprecia una variación de tensiones creciente en la dirección del tubo de dirección. Pero se trata de valores de tensión inferiores a 60 MPa, ya que el valor máximo es de 61,35 y se produce en la soldadura, como se muestra en la foto con más detalle.

Para solucionar el problema de tensiones elevadas en las soldaduras, una solución óptima es realizar soldaduras con mayor tamaño en el cordón de soldadura.

Ilustración 105. Soldadura con cordón de soldadura estrecho y ancho



Fuente: www.wngincycles.com en Flickr



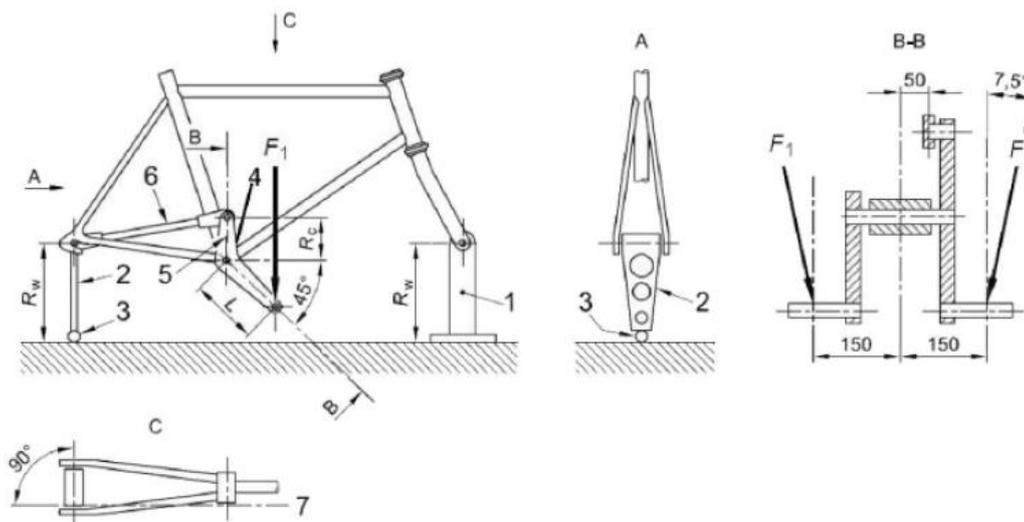
Fuente: Seguridad Industrial y Soldaduras, SA de Facebook

En estas gráficas se muestran como existen soldaduras con diferente tamaño de longitud de pierna, habrá que realizar un estudio para ver cuál es la dimensión correcta para unir cada una de las piezas, para reducir las tensiones que se producen en éstas.

4.3.3 Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo

Para este ensayo será necesario modelar unas piezas adicionales para poder simular en análisis según la norma. La parte 6 de la norma explica el método en que se tiene que hacer este análisis y de qué manera introducir las cargas externas.

Ilustración 106. Método de realización del ensayo de fuerzas de pedaleo



Donde:

R_w	Altura del dispositivo de fijación rígida y unión vertical
R_{C_L}	Longitud del brazo vertical (75 mm)
L	Longitud de la biela (175 mm)
1	Montaje rígido
2	Unión vertical
3	Rótula
4	Montaje adaptador
5	Brazo vertical
6	Tirante
7	Eje del tirante

La magnitud de la fuerza F_1 en ambos pedales, para el caso de bicicletas de montaña, debe de ser de 1200 N.

Para realizar este ensayo primera se aplicara la carga en el pedal derecho y luego en el izquierdo, no se pueden aplicar simultáneamente en esa posición porque quedaría sobre cargado.

Antes de realizar la simulación se tuvieron que crear unos elementos auxiliares similares a los de la gráfica superior para poder hacer el análisis correctamente. Además, hay que tener en cuenta las restricciones de movimiento que tiene cada elemento. El modelo en el que se realizó el análisis quedó de la siguiente manera:

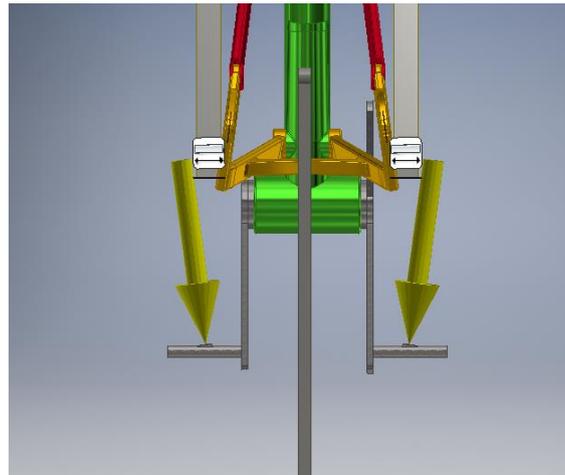
Ilustración 107. Modelo para la realización del ensayo de fuerzas de pedaleo

El montaje rígido que se mostraba en la figura de la norma no ha sido necesario modelarlo porque se ha impuesto una restricción de movimiento sin fricción en la parte inferior de la horquilla, lo que imposibilita el movimiento vertical de la misma, permitiendo únicamente el giro respecto al eje y.

Si ha sido necesario crear una pieza que simulase el apoyo vertical del eje trasero y el tirante que une el brazo vertical del pedal derecho con dicha unión vertical. En la parte inferior de la unión vertical se ha añadido una restricción de pasador, pero esta vez se ha modificado para que restrinja el desplazamiento en los tres ejes pero permita el giro en todos los ejes, para simular el comportamiento de una rotula.

En los pedales se ha añadido una pequeña cuña para que la fuerza pueda estar en la dirección que marca la norma.

Ilustración 108. Disposición de las fuerzas aplicadas para el ensayo de fuerzas de pedaleo



Como este programa no permite realizar análisis aplicando ciclos de carga, se realizará el análisis de forma similar a los anteriores ensayos. Se simulará primera la fuerza en un pedal y luego en otro. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Resultados para el cuadro doble

Ilustración 109. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo

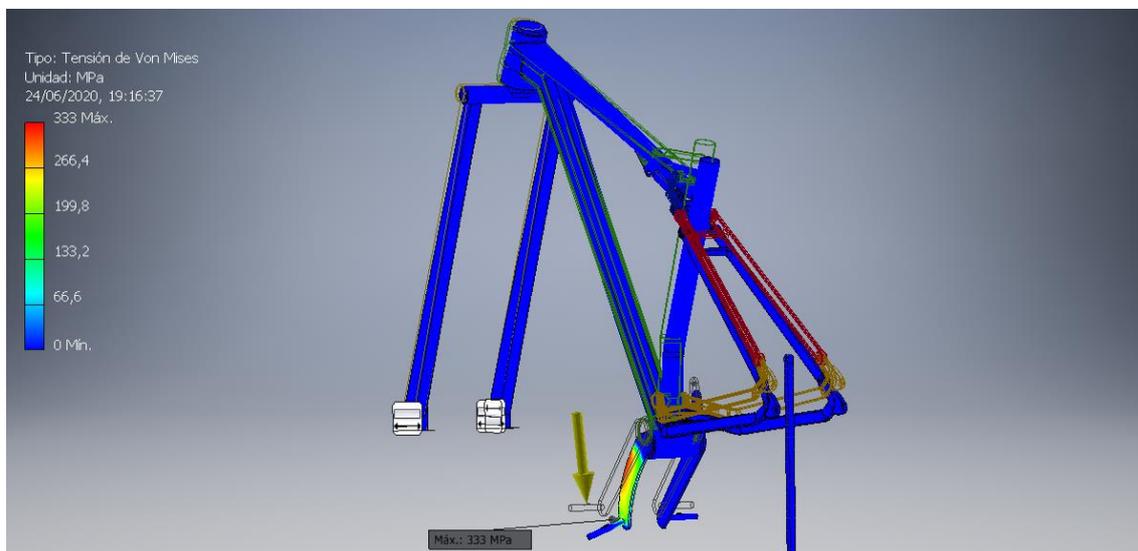
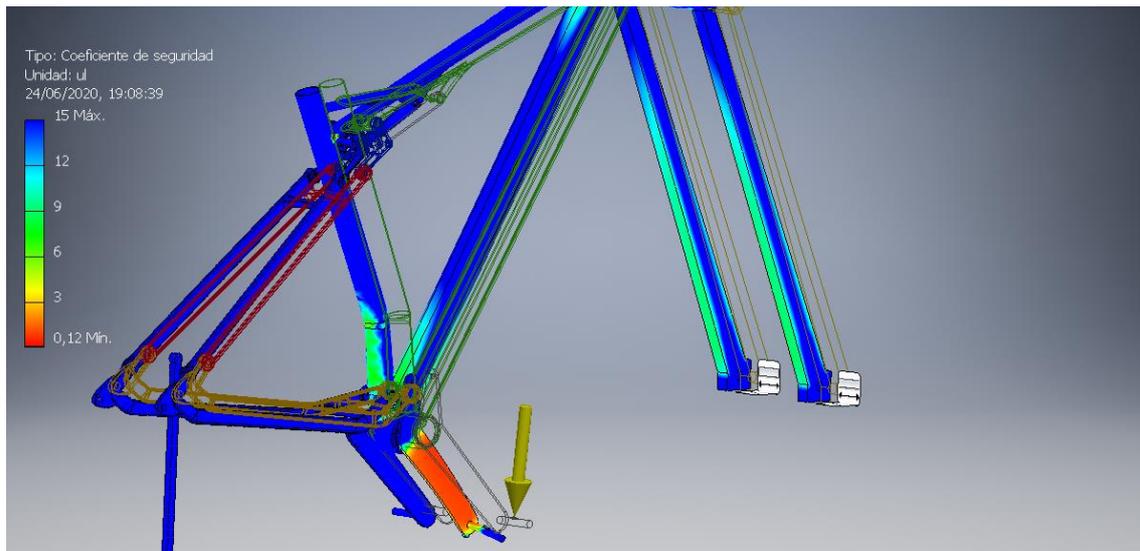


Ilustración 110. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas de pedaleo



Resultados para el cuadro rígido

Ilustración 111. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo para el cuadro rígido

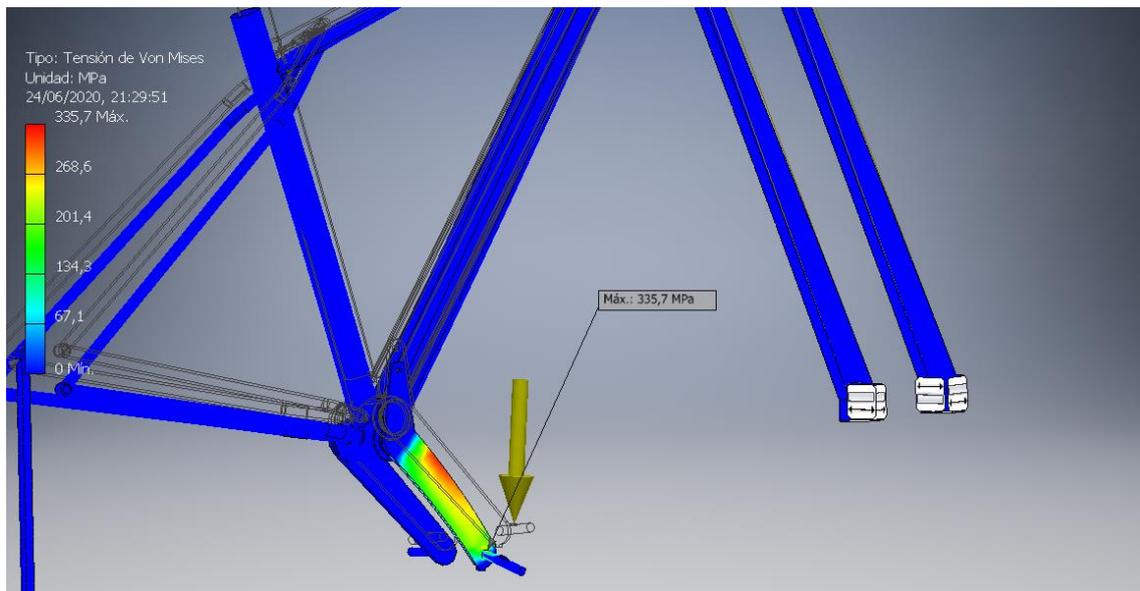
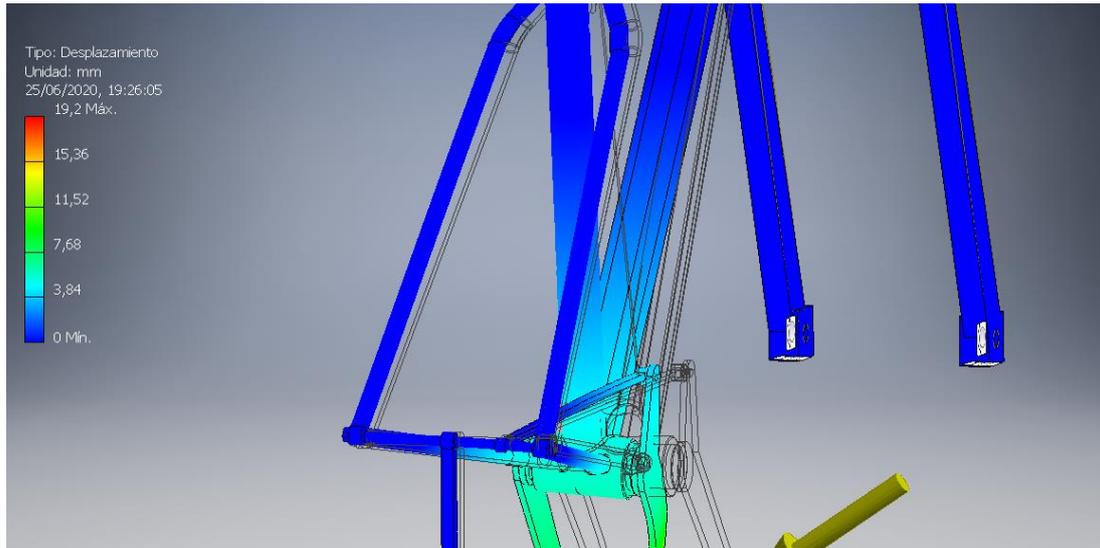


Ilustración 112. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo para el cuadro rígido

A pesar de todas las piezas diseñadas para aplicar este ensayo, se puede observar que los resultados no son los esperados, ya que es el mismo pedal el que absorbe toda la energía impidiendo ver las tensiones que sufre el cuadro. Por lo que se decide trasladar la misma fuerza directamente al cuadro, rediseñando el modelo para que el análisis siga siendo lo que pide la norma.

Al trasladar la fuerza al cuadro se origina un momento de valor la magnitud de la fuerza por la distancia en mm, ya que se introduce dicha magnitud en Nmm en el programa. Hay que tener cuidado con el sentido que se le da a la carga del momento, ya que se obtienen resultados muy distintos. Con la regla de la mano derecha se obtiene el sentido correcto.

$$M = F * d$$

Se vuelven a realizar las simulaciones, esta vez con las cargas desplazadas al tubo pedalier de ambos cuadros.

Resultados para el cuadro doble

Ilustración 113. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas

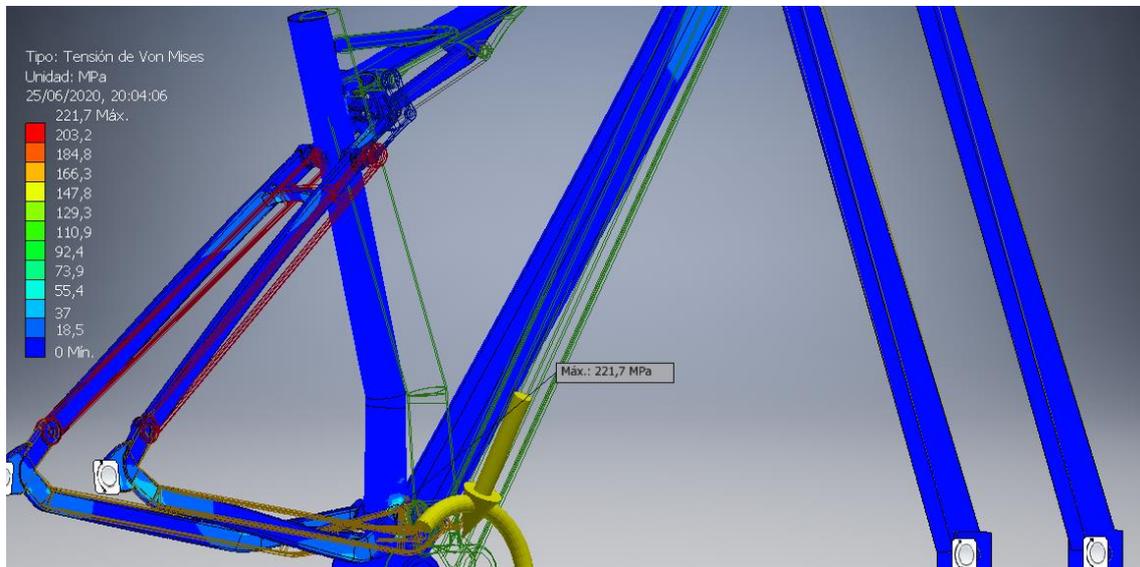


Ilustración 114. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas

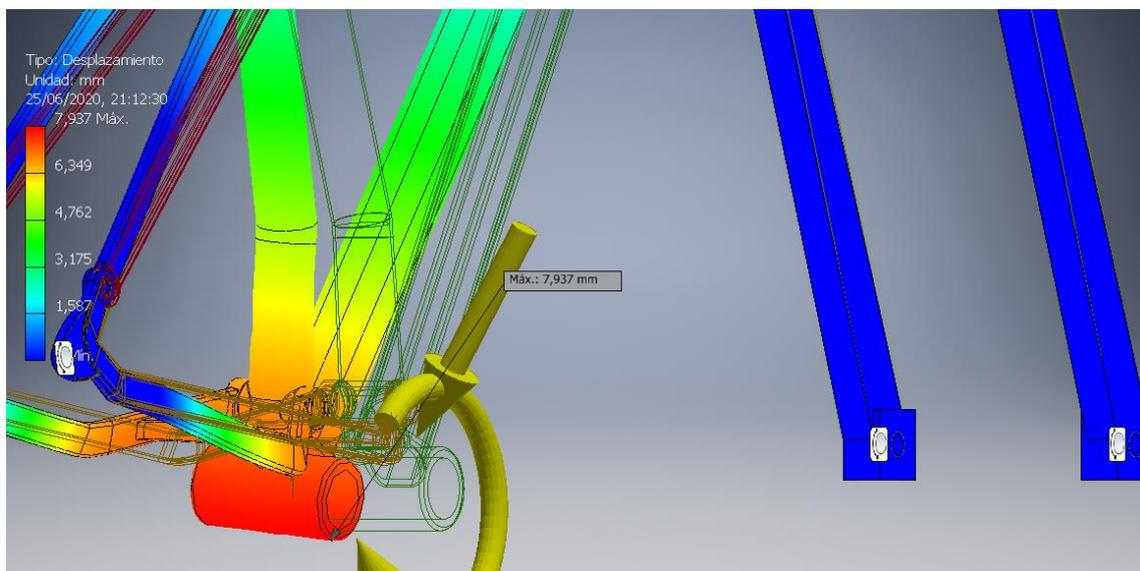


Ilustración 115. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas

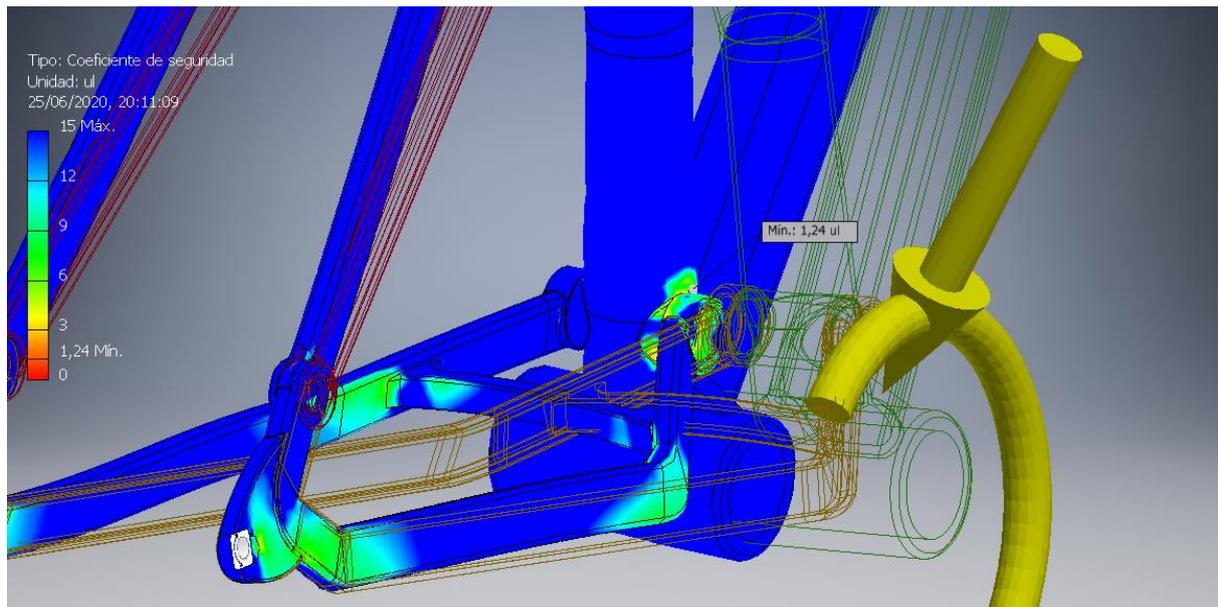
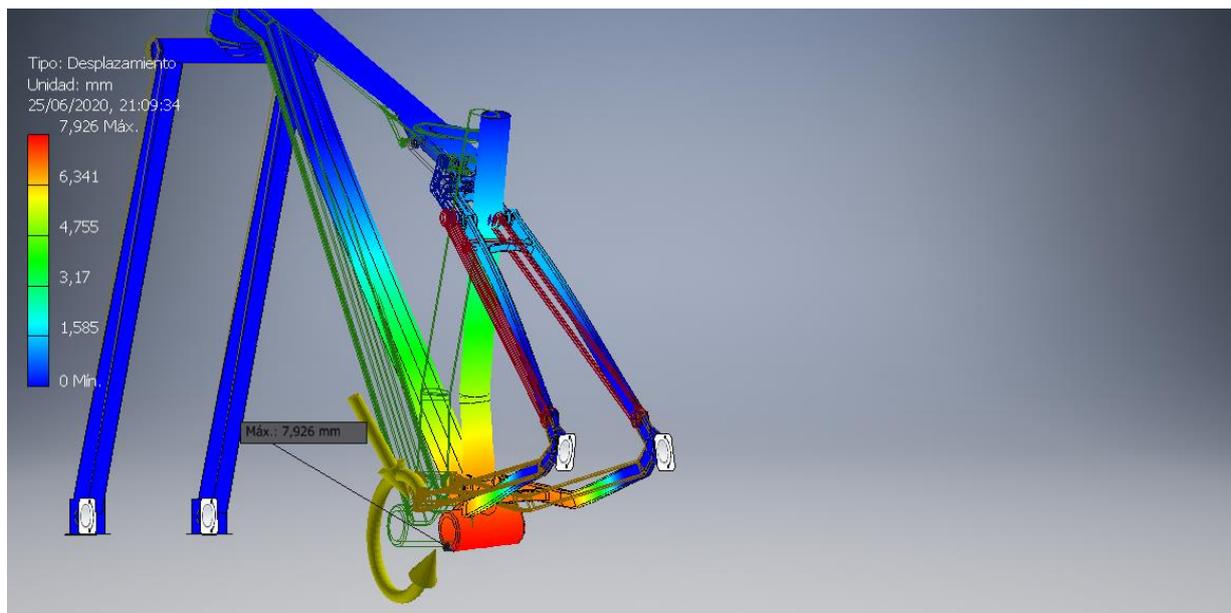


Ilustración 116. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas (pedal izquierdo)



Resultado para el cuadro rígido

Ilustración 117. Tensiones de Von Mises en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas para el cuadro rígido

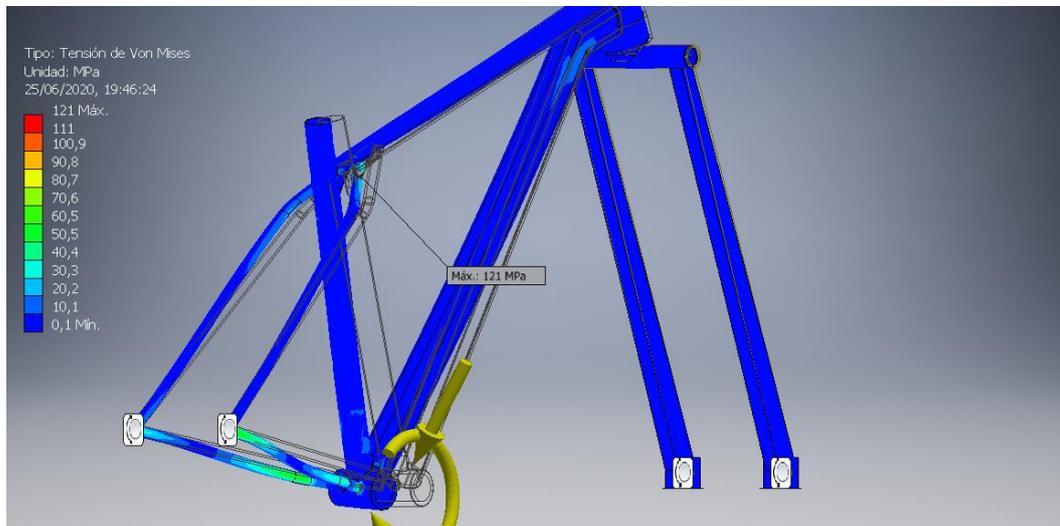


Ilustración 118. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas para el cuadro rígido

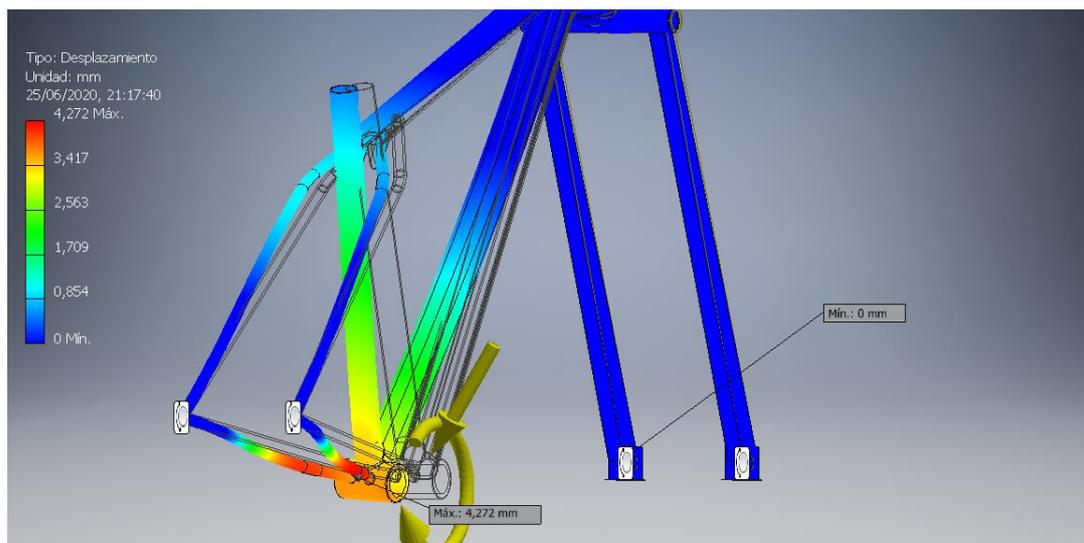
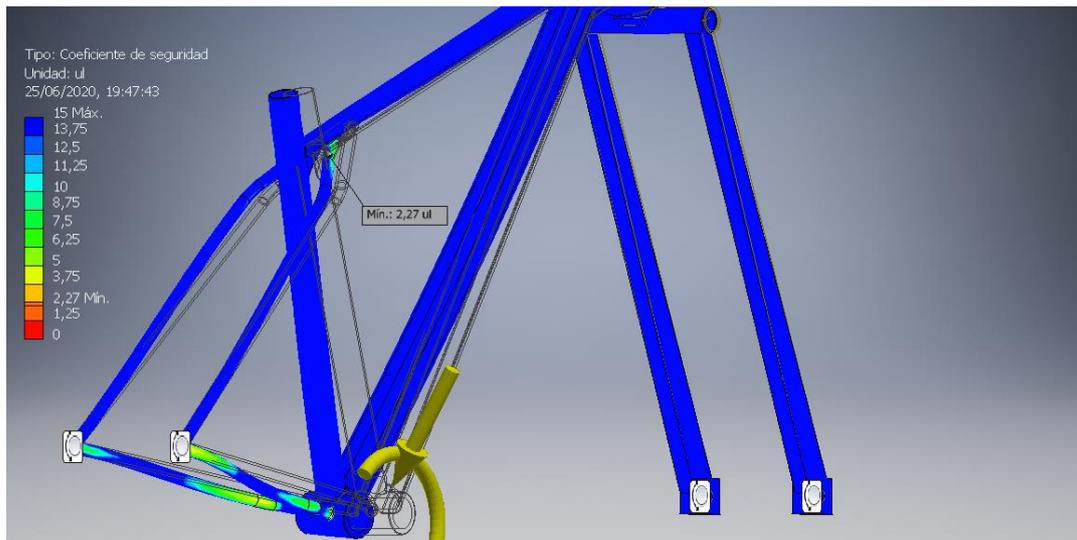


Ilustración 119. Coeficiente de seguridad en el ensayo de fuerzas de pedaleo trasladadas para el cuadro rígido



Conclusiones ensayo de fuerzas de pedaleo

En este segundo estudio, se obtienen unos valores más acordes a lo que se esperaba. En ambos cuadros, la zona que más sufre es la parte trasera de las vainas. Aunque las tensiones máximas se dan, en el cuadro de doble suspensión en el punto de contacto entre vainas y cuadro, y en la bicicleta rígida en la parte de la soldadura entre tirantes y cuadro. Estos picos de tensión máxima ya se han explicado en los anteriores ensayos a qué se deben.

En ambos casos la tensión máxima es inferior al valor de tensión del límite elástico, por lo que el coeficiente de seguridad será en cada caso superior al que está como requisito.

Se puede apreciar en las gráficas de desplazamiento máximo el movimiento que realiza el cuadro al sufrir estas cargas. Este es uno de los principales problemas de las bicicletas de aluminio, y el por qué cambian los ciclistas a bicicletas de carbono. Al realizar la fuerza de pedaleo, el cuadro sufre una flexión que hace que se pierda mucha potencia en la pedalada. El desplazamiento máximo se da en el eje pedalier y es de 7,9 mm en el caso de la bicicleta doble, y de 4,2 mm en el cuadro rígido.

Con estos valores obtenidos se obtiene que el cuadro pasará los ensayos con éxito en la vida real, ya que las tensiones máximas de ambos se dan en zona de soldadura o puntos de

contacto, y en las demás zonas del cuadro los valores de tensión se alejan del valor del límite elástico, por lo que puede someterse a los ciclos de carga sin llegar a producirse rotura.

En este ensayo no hace falta repetir la simulación para el caso de carga en el pedal izquierdo, ya que los resultados que se obtiene son simétricos a los obtenidos cuando se aplica la carga en el pedal derecho, como se aprecia en la figura de desplazamiento del cuadro de doble suspensión, que se ha hecho el ensayo en ambos lados para asegurar dicha hipótesis, esto se debe a que la carga en este caso es también simétrica respecto al plano que divide el cuadro longitudinalmente.

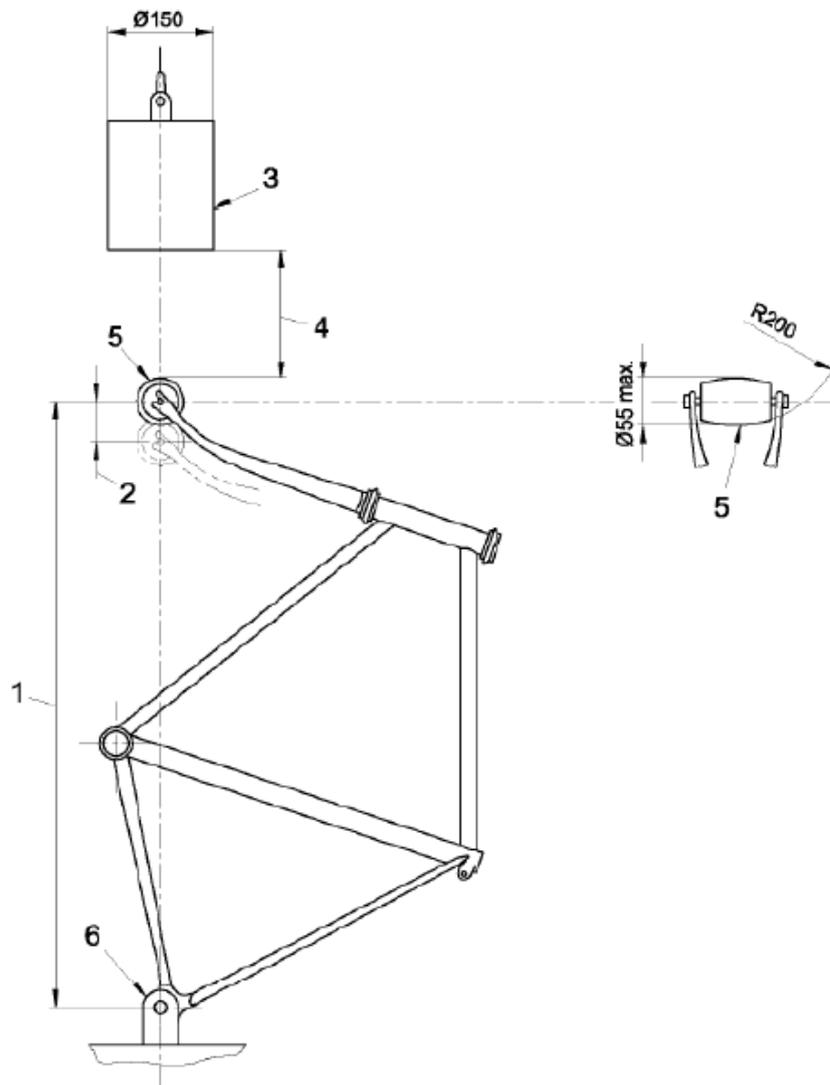
4.3.4 Ensayo de caída de masa

Para la realización de este ensayo, se puede realizar con la horquilla verdadera o utilizar una horquilla maciza de acero, si es el caso de diseño del cuadro, como es el caso. Al tratarse de una horquilla que irá dotada de suspensión le daremos la longitud que tendría esta al no estar comprimida al diseño de se realizará de la horquilla para el ensayo.

También se bloqueará la suspensión trasera, pero en este caso sí se le dará una pequeña compresión, que debe de ser la compresión que sufriría la amortiguación al colocarse sobre el sillín un ciclista de 80 kg. Este estudio se realizó al hacer el estudio del SAG.

Según la norma, este es el procedimiento a realizar para efectuar el ensayo.

Ilustración 120. Método de realización del ensayo de caída de masa



Donde:

- 1 Distancia entre ejes
- 2 Deformación permanente
- 3 Percutor de 22,5 kg
- 4 Altura de caída: 360 mm
- 5 Rodillo de pequeña masa (1 kg máx.)
- 6 Fijación rígida en el punto de enganche del eje trasero

Para realizar este ensayo se actuará de una forma distinta a como dicta la norma, pero se obtendrán los resultados necesarios para comprobar los requisitos.

Lo primero que se hará es calcular la energía potencial que tiene la masa instantes antes de golpear el cuadro. Esta energía es la energía mínima que debe absorber el cuadro para poder superar el ensayo.

Para calcular la energía capaz de absorber el cuadro, se aplicará una fuerza en la parte inferior de la horquilla, simulando el choque de la masa. Hay que ir variando esta fuerza hasta conseguir que en la zona más crítica del cuadro se alcance el límite elástico. Una vez conseguido este valor de fuerza, se calculará el desplazamiento que ha sufrido la horquilla en su parte inferior. De este modo se calcula la energía que es capaz de absorber el cuadro haciendo el producto de la fuerza aplicada por el valor del desplazamiento. Este valor de desplazamiento máximo no puede ser mayor de 10 mm para el caso de horquillas de acero, si no el ensayo no tendría validez.

Las sujeciones que lleva el cuadro en los apoyos son los mismos que se utilizaron para el ensayo de fatiga por fuerzas horizontales. En el eje trasero se añade un punto de rotación que simplemente permita el giro respecto al eje y, y en la horquilla se coloca un par prismático que permita únicamente el desplazamiento en la dirección de la fuerza.

La energía que transmite la masa al cuadro será la siguiente:

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 22,5 \cdot 9,81 \cdot 0,360 = 79,461 \text{ J}$$

Resultados para el cuadro doble

Ilustración 121. Tensiones de Von Mises en el ensayo de caída de masa

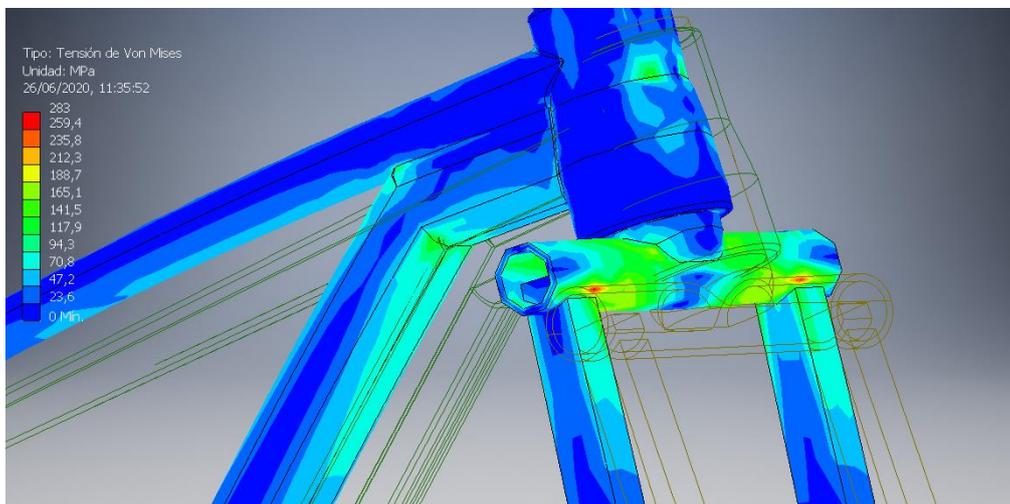
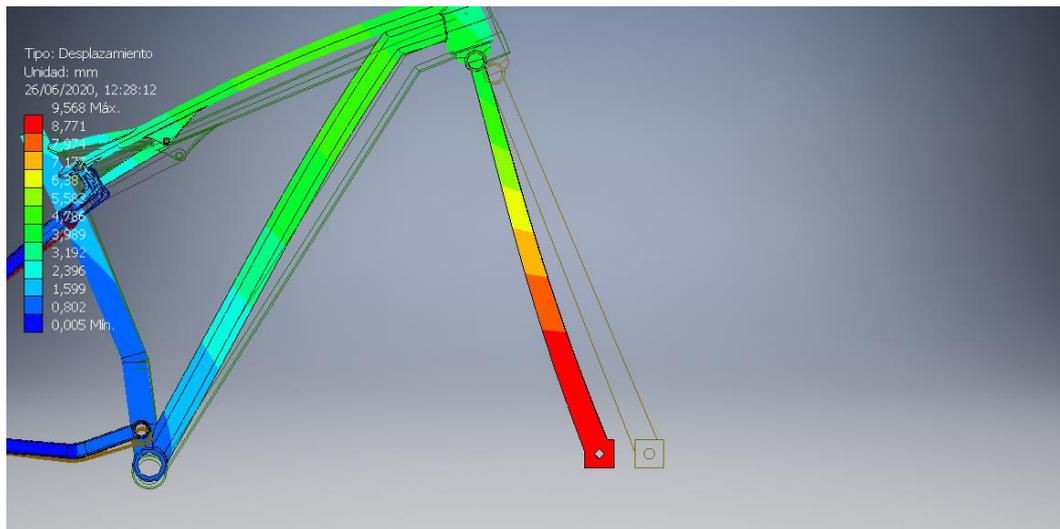


Ilustración 122. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de caída de masa



Resultados para el cuadro rígido

Ilustración 123. Tensiones de Von Mises en el ensayo de caída de masa para el cuadro rígido

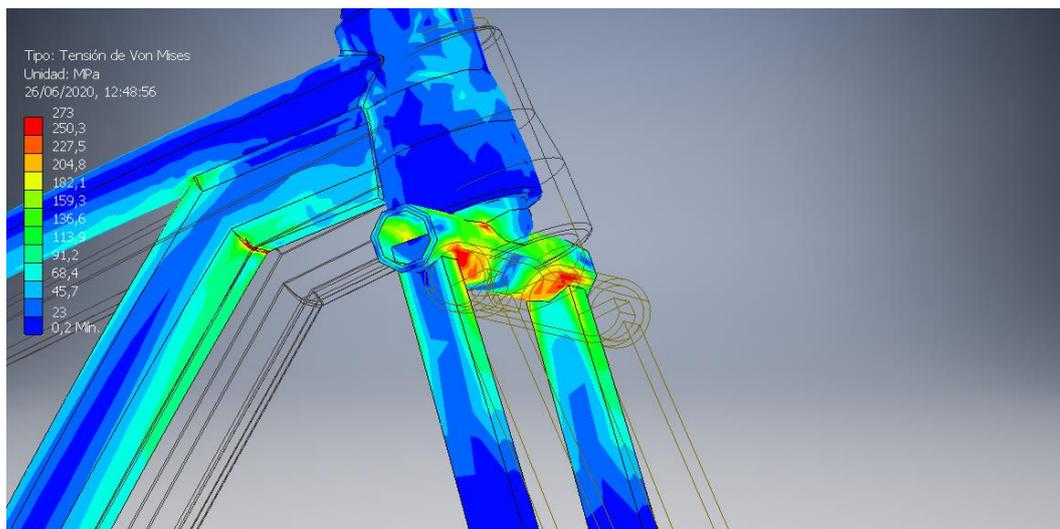
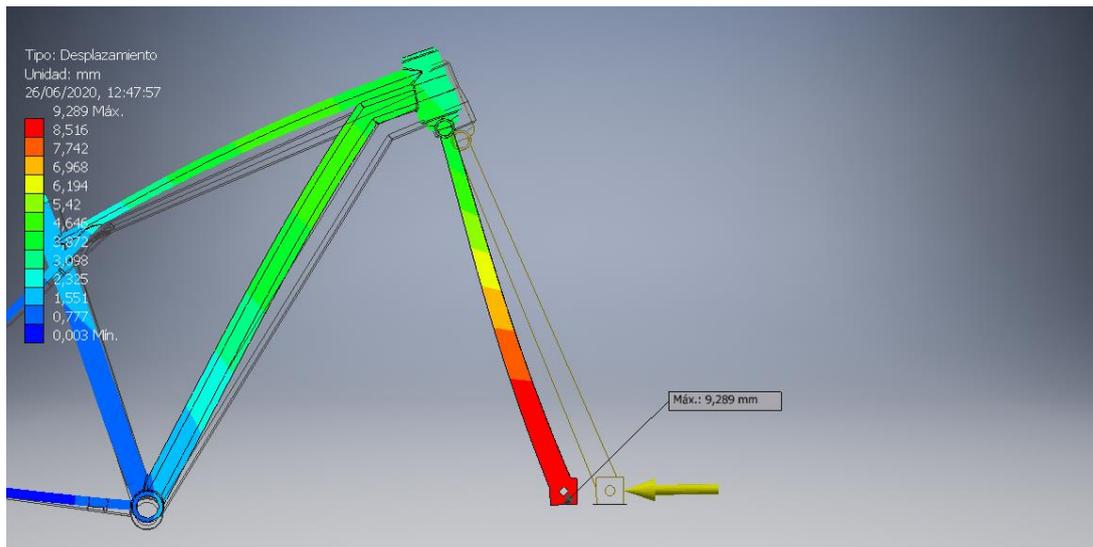


Ilustración 124. Desplazamiento de los elementos en el ensayo de caída de masa para el cuadro rígido



Conclusiones ensayo de choque de masa

La fuerza de impacto cumple el principio de conservación de energía por tratarse la fuerza de caída de la masa de una fuerza conservativa. Por lo que si la energía que es capaz de alcanzar el cuadro antes de plastificar es superior a la energía que sufre el cuadro al chocar la masa contra él, quiere decir que es capaz de superar los requisitos del ensayo.

Para la bicicleta de doble suspensión se ha necesitado una fuerza de 4500 N en cada una de las barras de la horquilla para alcanzar una tensión de 283 MPa en el tubo de dirección. Con esta fuerza se obtiene una deformación máxima en la horquilla de 9,57 mm. Se calcula la energía que ha absorbido el cuadro en esta simulación:

$$E = F \cdot d = (4500 \cdot 2) \cdot (9.57/1000) = 86,13 \text{ J}$$

Para la bicicleta rígida, ha sido necesario aplicar una fuerza de 5000N en cada extensión de la horquilla para llegar a un valor de tensión en el cuadro cercano al límite elástico, en este caso se ha obtenido un valor de 273 MPa. Esta fuerza ha conseguido un desplazamiento en la horquilla de 9,3 mm. Con esto se calcula la energía capaz de absorber el cuadro:

$$E = F \cdot d = (5000 \cdot 2) \cdot (9,3/1000) = 93 \text{ J}$$

En ambos cuadros, se ha obtenido la tensión máxima al aplicar la carga en la zona del tubo de dirección. Tiene sentido al ser ésta la zona que más resistencia ofrece al movimiento de la horquilla.

Se cumple además que la energía capaz de absorber el cuadro es mayor a que sufre por el impacto de la masa que expone la norma. En ambos casos, se trata de un valor cercano a los 79 J que recibe. Pero este valor de energía en la vida real sería menor, ya que tanto el aluminio como las uniones entre los distintos elementos del cuadro ayudarían a reducir esta energía de impacto. Por lo que se concluye que se ha trabajado del lado de la seguridad a la hora de cumplir los requisitos de este ensayo.

4.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

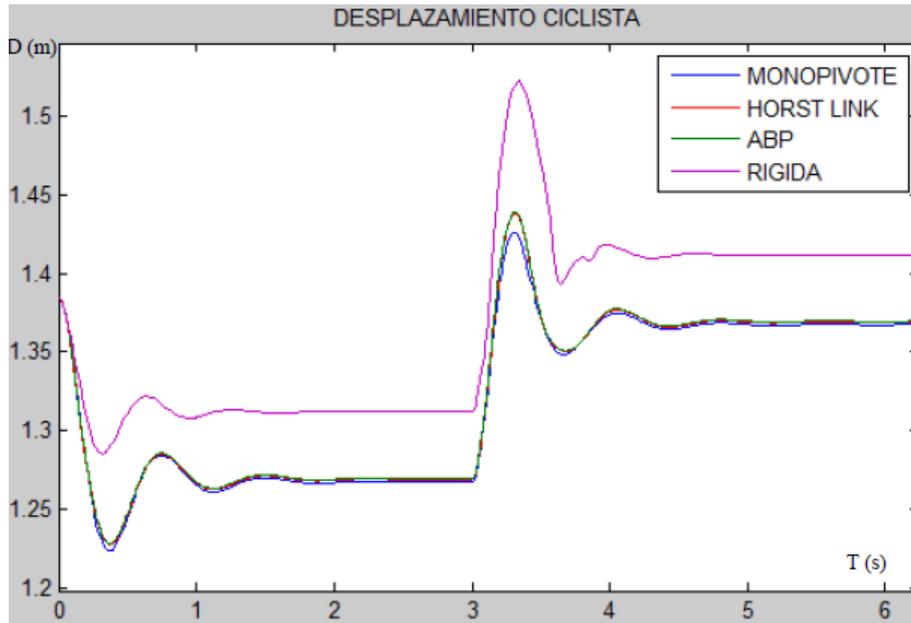
Tras realizar los ensayos propuestos en la normativa se ha podido observar que el cuadro rígido obtiene mejores resultados en los ensayos al presentar valores de tensión máxima menores que el cuadro de doble suspensión. Pero hay que tener en cuenta, que al colocar el sistema de amortiguación al cuadro doble una gran parte de las tensiones serían absorbidas por el muelle.

El comportamiento mecánico de ambos cuadros ha sido muy similar en todos los ensayos. El comportamiento del cuadro supera los requisitos de diseño y ensayo. La vida a fatiga ha sido el único factor que no ha sido posible comprobar, pero con los resultados obtenidos de tensión de Von Mises y de coeficiente de seguridad en los diferentes ensayos se espera que sean superados con éxito.

Ambas bicicletas tienen comportamientos similares en los ensayos, tienen un diseño similar y están fabricadas en el mismo material. Por lo que sería decisión del usuario, decidir si prefiere una bicicleta rígida o una doble. Los aspectos que en los que más difieren estos dos tipos de bicicleta es el peso y el precio.

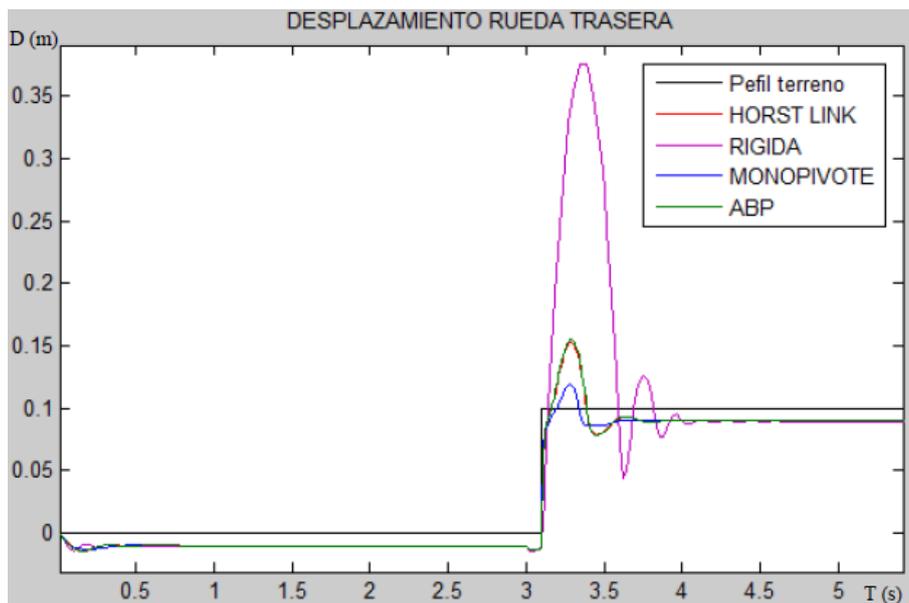
Un compañero de carrera de la Universidad de Almería realizó un trabajo que comparaba el comportamiento cinemático de un cuadro rígido con uno que lleva incorporado el sistema de suspensión Horst Link. A continuación, se muestran dos gráficas que realizó a través de una simulación en el programa de simulación SimMechanics, en las que se comparan el comportamiento de una bicicleta rígida y una doble.

Ilustración 125. Gráfica comparativa del desplazamiento del ciclista tras un impulso escalón



Fuente: Universidad de Almería. Daniel Estévez

Ilustración 126. Gráfica comparativa del desplazamiento de la rueda trasera tras un impulso escalón



Fuente: Universidad de Almería. Daniel Estévez

En estas gráficas se compara el comportamiento que tiene el ciclista y la rueda trasera al sufrir una fuerza escalón que se mantiene. Se aprecia en ambas gráficas, que al no tener la rígida una suspensión que absorba las irregularidades sufre mucho más los impactos que recibe.

Con esto se quiere llegar a que otro aspecto que influye a la hora de elegir entre bicicleta con o sin suspensión trasera es la comodidad que busque el usuario.

Conclusiones

Con este trabajo, se han cumplido los objetivos inicialmente propuestos. Se ha obtenido un diseño de dos cuadros de bicicleta y una suspensión, y se ha analizado el comportamiento de estos. Se ha simulado el comportamiento de la suspensión tras aplicar unas fuerzas externas similares a unas reales, comparando con distintos sistemas de suspensión en el análisis realizado en Working Model.

Se ha realizado un análisis resistente de los cuadros según la norma. Se ha conseguido un cuadro sencillo y con un diseño elegante.

Además, como valoración de interés en la memoria del trabajo y mientras se realizaba el diseño, se ha explicado el funcionamiento de las herramientas de los programas de Working Model 2D Professional y Autodesk Inventor Professional 2019. Con estos se han obtenido una predicción del comportamiento que muestran los amortiguadores y las tensiones que sufren los cuadros.

Este trabajo ha consistido en una simplificación, en el que no se han tenido en cuenta los elementos de anclaje que debe llevar un cuadro de bicicleta que sale al mercado, pero esto queda fuera del alcance de este trabajo. Tras completar el alcance de este trabajo, a continuación, se exponen algunos trabajos que pueden ser desarrollados en el futuro para complementar y ampliar este trabajo:

- Realizar ensayos experimentales en un laboratorio adecuado mediante sensores de movimiento y vibración para validar los resultados obtenidos.

- Seguir con el proceso iterativo de diseño y cálculo de los modelos, y fabricación de un modelo previamente realizado los estudios resistentes.
- Estudiar el comportamiento interno de la suspensión, centrándose en el movimiento relativo entre sus elementos, y analizar en situaciones de absorción de impactos y aceleración producida por el pedaleo.

5. PRESUPUESTO

Para la realización del trabajo de final de grado se han empleado un total de 360 horas. Este número total de horas puede dividirse en tres partes: el diseño 3D de los cuadros y la suspensión; análisis dinámico de la suspensión y análisis mediante el método de elementos finitos de ambos cuadros; y redacción de la memoria. Cada una de estas partes tiene una dificultad y elaboración distinta, por lo que en el presupuesto se contemplará esta división según la dificultad y horas dedicadas a cada una de las partes mencionadas.

Además de la mano de obra, otro aspecto a tener en cuenta para la realización del presupuesto es la licencia de los programas y herramientas utilizados en la elaboración del presente trabajo. Como la licencia de los programas suele amortizarse en 4 años, se realiza una estimación de las horas que sería usado el programa en un año de trabajo y las horas que se ha utilizado el programa en este trabajo. Se supone que para amortizar alguno de estos programas necesita 8000 horas, que serían el tiempo equivalente a 200 semanas con trabajo de 8 horas diaria durante 5 días de la semana.

En el presupuesto se realiza un desglose de las partes realizadas, en el que se indica las horas empleadas en el desarrollo de cada una de ellas.

El número total de horas dedicadas el diseño y análisis del modelo es la primera a tener en cuenta. Se dedicaron 250 horas en esta parte. Para la redacción de la memoria, para la búsqueda de contenido e información, y para la selección y edición de las figuras se dedicaron un total 95 horas. Y, por último, las horas dedicadas por un Ingeniero senior para la revisión final del trabajo y las horas dedicadas explicando y resolviendo dudas al proyectista han sido de 15 horas, que han ayudado el tutor del trabajo, Fernando Viadero Rueda, y otros dos profesores, uno del departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica, Valentín Gómez Jáuregui, y otro del departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, Pablo García Fernández.

Para la realización del presupuesto se ha utilizado el programa Excel, que está dentro del paquete de Microsoft Office. A continuación, se muestran los cálculos para la realización del presupuesto en las siguientes gráficas:

Concepto	Cantidad (horas)	Precio (€/hora)	Total (€)
Redacción de la memoria	125	12	1500
Diseño y análisis de los modelos	220	25	5500
Trabajo	15	40	600
Total (€)			7600

Concepto	Amortización (horas)	Cantidad (horas)	Precio licencia (€)	Total (€)
Microsoft Office 2019	2000	135	80	5,4
Autodesk Inventor 2019	8000	180	8400	189
Working Model 2D Professional	6000	30	4000	20
Total (€)				214,4

TOTAL MANO DE OBRA (€)	7470
TOTAL LICENCIAS (€)	214,4
TOTAL SIN IVA (€)	7684,4
IVA (%)	0,21
TOTAL REALIZACIÓN TRABAJO (€)	9298,124

El coste total para la elaboración del trabajo asciende a nueve mil doscientos noventa y ocho euros con 12 céntimos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Historia del mtb. <https://esmtb.com/historia-gary-fisher/> (Noviembre 2017)
- [2] Cebzas, D. (Junio 2019) <https://www.ciclosfer.com/sector-bicicleta-2018>
- [3] Montes Martos, J.M; Gómez Cuevas, F.; Cintas Físico, J (2014) Libro de “Ciencia e Ingeniería de los materiales”
- [4] <https://blog.terranea.es/partes-bicicleta/>
- [5] Estévez Fernández, D. (2012). Modelado y simulación dinámica de bicicletas de montaña. J. López Martínez (dir.). Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Almería
- [6] “Aluminio y sus aleaciones. Estructuras y propiedades de las aleaciones.” Por Dr. Ing. Ernesto Gustavo Maffia (2013)
- [7] Wikipedia (2015). Bicicleta de montaña.
https://es.wikipedia.org/wiki/Bicicleta_de_monta%C3%B1a.
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=LGyhrY5dym4> “Ajuste de la suspensión de la bicicleta; El SAG”. Mundo Mammoth
- [9] C. Piedrabuena, "El primer cuadro de bicicleta impreso en 3D", Solobici, 11 Febrero 2014. [En línea]. Disponible en: <https://solobici.es/el-primer-cuadro-de-titanio-impreso-en-3d/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [10] Ignacio P. (2018) “MTB de doble suspensión vs rígida”
<https://www.brujulabike.com/mejor-una-mtb-doble-suspension-una-rigida/>

[11] Apuntes de clase de 'Dinámica de máquinas y mecanismos' por D. Fernando Viadero Rueda. Departamento de ingeniería estructural y mecánica

[12] Ayuda de Inventor 2019 <https://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2019/ESP/>

[13] <https://tuvalum.com/blog/diferentes-tipos-de-mountain-bike/>

[14] García Gómez, R. (2019) "DISEÑO Y ANÁLISIS TENSIONAL, DE DEFORMACIONES Y FUNCIONAL DE UN CUADRO DE BICICLETA DE "BikeTrial"". Proyecto de fin de grado Universidad de Cantabria

[15] Apuntes de clase de Ingeniería Gráfica con D. Fernando Fadón sobre AutoDesk Inventor diseño 3D

[16] UNE-EN 14766:2006. Bicicletas de montaña. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo

[17] Escacena Ventura, J. M. "Caracterización de las propiedades mecánicas del aluminio. Fatiga." <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4089/fichero/4.pdf>

[18] <https://tuvalum.com/blog/guia-materiales-cuadros-bicicleta/>

[19] <https://www.mountainbike.es/bici-facil/repara-y-ajusta/articulo/los-sistemas-de-suspension-trasera>

[20] Análisis de fatiga en máquinas, Aviles R. (2015), Thomson, Madrid

[21] <https://www.canyon.com/es-es/mountain-bikes/trail-bikes/>

[22] (2017) "Cómo soldar aluminio. Tipos de soldadura que puedes utilizar, recomendaciones." <https://soldadora.online/guia/soldar-aluminio/>

[23] M. Á. Galán, "Revoluciones del MTB. Los sistemas de suspensión", MTB PRO magazine, 29 Febrero 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.mtbpro.es/afondo/revoluciones-del-mtb-ii-los-sistemas-de-suspensi-n>. [Último acceso: Noviembre 2016].

[24] Diseño de elementos de máquinas, Juvinall, Robert C., 2ª Edición (2013), Limusa Wiley

[25] Osorio San Miguel, Juan Martín (2014). Fatiga en máquinas. Departamento de Mecánica, Universidad de Cantabria.