

Anexos

Análisis mediante elementos finitos y diseño de cuadro de bicicleta

Analysis by means of finite element method and design of a bicycle frame

Autor/es

Sofía del Río Pallarés

Director/es

Jesús Cuartero Salafranca

Universidad de Zaragoza

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Curso 2020-2021

Índice

<i>Anexo I. Tipos de bicicletas.....</i>	3
<i>Anexo II. Análisis por zonas</i>	10
<i>II.I. Zona dirección [4].....</i>	10
<i>II.II. Zona pedalier.....</i>	15
1. Pedalier con caja de pedalier con rosca (BSA)	15
2. Pedalier con caja de pedalier sin rosca	17
<i>II.III. Zona ruedas traseras.....</i>	21
<i>II.IV. Zona sillín.....</i>	24
<i>II.V. Resumen dimensionado</i>	26
<i>Anexo III. Geometría del modelo</i>	27
<i>Anexo IV. Molde para fabricación</i>	34
<i>Anexo V. Ensayos del cuadro.....</i>	38
<i>V.I. Características de una falsa horquilla</i>	38
I. Método de ensayo	38
II. Método de simulación.....	38
<i>V.II. Ensayo de choque - Caída de una masa</i>	41
I. Método de ensayo	41
II. Método de simulación.....	43
<i>V.III. Ensayo de choque - Caída de cuadro.....</i>	44
I. Método de ensayo	44
II. Método de simulación.....	45
<i>Anexo VI. Criterio de fallo de Tsai Wu</i>	48
<i>Anexo VII. Proceso iterativo de diseño</i>	50
<i>VII.I. Cumplimiento de la normativa</i>	50
1. Ensayo 1: Ensayo de choque: Caída de una masa.....	50
2. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro	52
3. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 1 capa.....	56
4. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 2 capas	58
5. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 3 capas	59
6. Ensayo 1: Ensayo de choque: Caída de una masa. Refuerzos de 3 capas.....	64
<i>VII.II. Optimización de la cantidad de material</i>	66
7. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 1 capa.....	67
8. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 2 capas	69

9.	Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 3 capas	70
10.	Ensayo 1: Ensayo de choque: Caída de una masa. Refuerzos de 3 capas.....	75
	<i>Bibliografía</i>	78
	<i>Índice de figuras</i>	81
	<i>Índice de tablas</i>	84

Anexo I. Tipos de bicicletas

Con la evolución de la bicicleta a lo largo de los años se han desarrollado distintos tipos que se adaptan a las necesidades surgidas de su uso como medio de transporte. Entre los principales tipos se encuentran los siguientes [1]:

Bicicleta de ciudad (fixie o bicicleta de una velocidad)

Una de las bicicletas más comunes para su uso por ciudad es la denominada fixie o bicicleta de una velocidad. Son económicas y funcionan a la perfección en terrenos planos. “Fixie” proviene de “fixed gear”, es decir, piñón fijo, dado que el piñón trasero está fijo en la rueda [Figura 1].



Figura 1. Bicicleta de ciudad [1].

Bicicleta de montaña (MTB) o bicicleta todoterreno (BTT)

Constituyen una de las categorías con mayor variedad en cuanto a modelos de bicicleta. Las características de cada modelo varían adaptándose al tipo de terreno [Figura 2]. Uno de sus puntos fuertes se sitúa en la suspensión que distingue entre tres subcategorías:

- **Rígidas.** Los modelos de bicicleta de montaña que carecen de suspensión.
- **Hardtails.** Los modelos que solo cuentan con suspensión delantera. En ocasiones también son denominadas rígidas por la constitución de su parte trasera.

- **De doble suspensión o suspensión completa.** Los modelos que cuentan con suspensión delantera y trasera.



Figura 2. Bicicleta de ciclomontañismo o MTB [1].

Bicicleta de carreras (ciclismo en ruta, ciclocrós, carreras sobre pista, triatlón, carreras contrarreloj, carreras critérium, Tour de Francia)

En esta modalidad se incluyen muchas subcategorías en función del tipo de competición al que estén destinadas.

- **Bicicleta de ruta.** Su diseño se adapta a carretera y terrenos planos. Presentan ruedas delgadas y el manubrio se encuentra curvado hacia abajo. Se subdividen en bicicletas de competencia o aerodinámicas, que persiguen alcanzar la máxima velocidad posible; y las de resistencia, que presentan mayor versatilidad en la ruta dado que tienen cambios más fluidos.
- **Bicicleta para triatlón.** Se enfocan en la aerodinámica dotándolas de altas velocidades en línea recta. Están orientadas exclusivamente a la competición [Figura 3].



Figura 3. Bicicleta de triatlón [1].

- **Bicicleta de ciclocross.** Diseñadas para competir en la modalidad de ciclocross. Son similares a las bicicletas de ruta, pero con ruedas más gruesas para aumentar el agarre al terreno [Figura 4] [2]. Su uso está orientado a terrenos destapados, vías rurales...



Figura 4. Bicicleta de ciclocross [2].

- **Bicicleta de pista.** También denominada bicicletas de *sprint*, son modelos optimizados para ser empleados en velódromos o pista al aire libre. Los neumáticos son estrechos y se inflan a alta presión para disminuir la resistencia a rodadura. También existen modelos diseñados exclusivamente para carreras a contrarreloj.
- **Bicicleta carreras Critérium, para el Tour de Francia...** En esta categoría se engloban todas las modalidades de bicicleta desarrolladas exclusivamente para su uso en competiciones de alto rendimiento.

Bicicleta de turismo (touring)

Son sencillas y cómodas de usar, se adaptan a distintos terrenos permitiendo su uso en recorridos turísticos de larga duración. Presentan un elevado peso por lo que no alcanzan elevadas velocidades [Figura 5]. Para recorridos cortos con mayor velocidad las bicicletas más adecuadas se denominan gravel.



Figura 5. Bicicleta para turismo [1].

Bicicleta plegable

La principal característica de estos modelos es que pueden ser almacenadas en espacios reducidos dado que se pliegan pudiendo ser guardadas y transportadas con facilidad. Sus características son limitadas dado que se orientan a trayectos cortos y de poca exigencia, se plantean para un uso urbano diario [Figura 6].



Figura 6. Bicicleta plegable [1].

Bicicleta híbrida

También denominadas bicicletas de confort o fitness dado que permiten montar con una postura más erguida [Figura 7]. Son un tipo de bicicleta recreacional empleada para mantenerse en forma sin exigir elevadas velocidades. En esta modalidad se incluyen también las bicicletas de trekking.



Figura 7. Bicicleta híbrida [1].

Bicicleta de paseo

Son los modelos más sencillos dado que están pensadas para paseos de cortas distancias en vías pavimentadas [Figura 8]. No responden a altas exigencias de velocidad ni resistencia.



Figura 8. Bicicleta de paseo [1].

Bicicleta doble o tandem

Las bicicletas tandem están diseñadas para ser usadas por dos personas de forma simultánea [Figura 9] [3]. En la actualidad presentan diseños especializados que adaptan la geometría tratando de disminuir el peso. Existen modelos diversos modelos de tipo híbrido, de ruta e incluso de montaña que se adaptan a distintas funciones.



Figura 9. Bicicleta doble o tandem [3].

Bicicleta BMX

Presentan ruedas pequeñas, marcos compactos y un único cambio disminuyendo el pedaleo al mínimo. Están orientadas meramente a fines recreativos. Se dividen en BMX de salto, BMX de carrera y BMX de freestyle [Figura 10].



Figura 10. Bicicleta BMX [1].

Bicicleta eléctrica o pedelec

Este tipo de bicicletas ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos años desarrollando modelos de bicicleta eléctrica para distintas funciones como ruta o montaña, pero sin duda el modelo más extendido es el orientado a su uso urbano [Figura 11].



Figura 11. Bicicleta eléctrica [1].

Anexo II. Análisis por zonas

Para asegurar la funcionalidad de la geometría del cuadro propuesta, se lleva a cabo un análisis de las zonas en las que deben ajustar otras piezas fabricadas de forma seriada con dimensiones estándar.

II.I. Zona dirección [4]

Consiste en uno de los elementos de la bicicleta más importantes en términos de seguridad. De forma habitual, se denomina dirección de la bicicleta al conjunto formado por el manillar, la potencia, la horquilla, etc. Sin embargo, la dirección se centra en los componentes alojados en la caja de dirección que permiten la unión entre el tubo de la horquilla al manillar mediante la potencia.

Existe una gran variedad de tipos de direcciones:

- **Sistema roscado (threaded)** [Figura 12]. El tubo de la horquilla presenta rosca para ajustar con las tuercas de la dirección.



Figura 12. Dirección roscada (threaded) [4].

- **Sistema embutido (threadless).** El tubo de la horquilla es liso y la potencia va por fuera. Este sistema ofrece mayor rigidez, menos mantenimiento y mayor variedad de opciones a la hora de montar la horquilla y la potencia. Existen diversos tipos en función de la posición del cojinete de rodamientos:

- **Convencional (ahead tradicional)** [Figura 13]. Cada vez se utilizan menos dado que sobresalen estéticamente de la pipa de dirección.

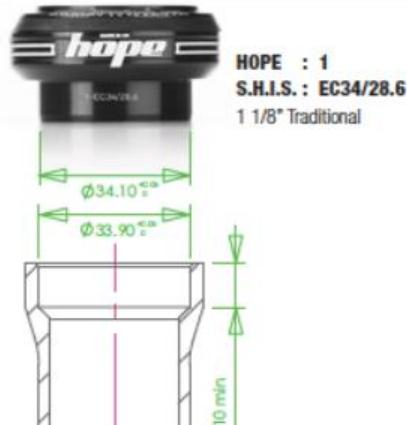


Figura 13. Dirección embutida convencional [4].

- **Semiintegrada (ahead semiintegrada)** [Figura 14]. Las cazoletas no sobrepasan el diámetro exterior de la pipa de dirección.



Figura 14. Dirección embutida semiintegrada [4].

- **Integrada (ahead integrada)** [Figura 15]. En este tipo los rodamientos se alojan directamente en el interior de la pipa de dirección sin presencia de cazoletas.



Figura 15. Dirección embutida integrada [4].

- Además, existen otros tipos con geometrías más complejas como el **tupared o cónico**; o diseños de fabricantes como **Lefty**, en el que la horquilla presenta una geometría peculiar.

En cuanto a las medidas estándar de la dirección, las más comunes son:

- 1" (25,4 mm).
- 1" 1/8 (28,6 mm).
- 1" 1/4 (31,8 mm).

Para identificar el juego de dirección correcto se emplea el sistema de identificación de estándares SHIS (*Standarized Headset Identification System*) [5]. El sistema de identificación cuenta con dos códigos: uno asociado a la parte superior y el otro a la inferior. Cada uno de los códigos consiste en:

- Dos letras que identifican el tipo de juego de dirección:
 - *EC External Cup* - Juego de dirección externo.
 - *ZS Zero-Stack* - Juego de dirección semiintegrado.
 - *IS Integrated System* - Juego de dirección integrado.
- Un número que indica el diámetro interno del tubo de dirección del cuadro.
- Un número que indica el diámetro interno del cojinete de rodamientos (o diámetro externo del tubo de la horquilla).

Existen juegos de dirección con diferentes estándares en su parte superior e inferior, para las cuales se combina la nomenclatura expuesta.

Para la geometría propuesta se diseñará un sistema de dirección embutido (threadless) con tubo de horquilla liso y potencia externa. El tipo de dirección será semiintegrado (ahead set) de 1" 1/8 (28,3 mm). Con lo cual la nomenclatura que deberá presentar el juego de dirección que se acople al cuadro será un juego de dirección con estándar superior **ZS44/28,6** e inferior **ZS44/30**; es decir, un juego de dirección semiintegrado, para un tubo o pipa de dirección de 44 mm y un diámetro interno de 28,6 mm en la parte superior y 30 mm en la inferior.

Existen estándares comercializados que cumplen con las especificaciones descritas; como, por ejemplo, el modelo **Juego dirección 1" 1/8 semiintegrado ZS44/28.6 ZS44/30 Negro** de Decathlon [Figura 16] [6]:



Figura 16. Juego dirección semiintegrado ZS44/28.6 ZS44/30 Decathlon [6].

O bien, el modelo de **Dirección semiintegrada FIRST 1"1/8** de Bikeshop [7]:



Figura 17. Juego dirección semiintegrado ZS44/28.6 ZS44/30 Bikeshop [7].

Con lo cual el **diámetro interno de la pipa de dirección del cuadro deberá ser de 44 mm** (43,95 mm dado que se trata de un sistema de dirección embutido y debe ajustar con el juego de dirección estándar de 44,10 mm).

Por si fuese necesario el uso adicional de un casquillo para la instalación de la dirección, se comprueba que existen modelos comercializados adecuados a las dimensiones de diseño impuestas. Se encuentra que existen diversos modelos con un diámetro exterior de 44 mm que podrían emplearse en la instalación de la dirección como es el caso del modelo **Sourcing map Liso metal plateado casquillo buje de 4440 Cojinete Manguito Autolubricante 50mm x 44mm x 40mm (Largo x diámetro externo x diámetro interno)** disponible en **Amazon** [Figura 18] [8].



Figura 18. Sourcing map liso metal plateado casquillo buje de 4440 Cojinete Manguito Autolubricante 50mm x 44mm x 40mm, Amazon [8].

II.II. Zona pedalier

El pedalier es el conjunto formado por el eje, rodamientos y el resto de las piezas implicadas en la transformación del movimiento de pedaleo en un giro que mueve la transmisión. A continuación, se analiza la zona del pedalier para definir la caja de pedalier del cuadro [9]–[11].

La configuración del pedalier varía en función del sistema incorporado en cada caso. De forma similar a la zona de potencia, existen ejes pedalier con rosca y sin ella:

1. Pedalier con caja de pedalier con rosca (BSA)

En función del ancho de la caja y el tipo de rosca se clasifican en:

- **BSC (British Standard Cycle/BSA/Estándar inglés).** Es el más común. Presenta dos medidas para el ancho: 68 o 73 mm; un diámetro interior de 1,37" (34,8 ≈ 35 mm) y un paso de rosca de 24 hilos por pulgada, 1,06 mm por hilo y roscado en sentido antihorario en el lado derecho.
- **Estándar italiano (ITA).** Presenta una anchura de caja de 70 mm, un diámetro interior de 36 mm con un paso de rosca de 24 hilos por pulgada, 1,06 mm por hilo y roscado horario en ambos lados.
- **Estándar francés.** Presenta una anchura de caja de 68 mm, un diámetro interior de 35 mm y 1 mm por hilo de paso de rosca.
- **Estándar suizo.** Es idéntico al estándar francés, salvo que en este caso el roscado es antihorario en el lado derecho.

Además de los estándares existentes en las cajas de pedalier roscadas, existen distintas configuraciones:

- ❖ **Configuraciones antiguas completamente desmontables.**
- ❖ **Pedalier de “cuadradillo” o tradicional.** Se trata de un sistema casi en desuso, aunque todavía está presente en modelos de gama baja y media. El conjunto

eje/rodamientos está integrado en el cartucho estanco del que sobresalen los extremos cuadrangulares. Pueden llevar los rodamientos sellados [Figura 19] o abiertos de tipo enjaulado. El mantenimiento es mucho más sencillo en el caso de los rodamientos sellados, además de tener una instalación más sencilla. Existen dos estándares principales: el ISO (anchura 12,5 mm), empleado por fabricantes europeos y el JIS (anchura 12,63 mm), estándar japonés.



Figura 19. Eje pedalier rosado de cuadradillo con rodamientos sellados [10].

❖ **Sistemas con rodamientos internos montados en cartucho (Isis, Octalink...).**

Derivados del modelo anterior, pero con ciertas variaciones en el diámetro del eje, número de estrías en el extremo... Hay diversos tipos desarrollados por fabricantes como Isis u Octalink [Figura 20].



Figura 20. Tipos de ejes pedalier [9].

❖ **Sistemas con rodamientos externos.** Destaca el modelo Hollow-Tech II de Shimano, el cual siguieron numerosos fabricantes (como BSA, Truvativ, Sram o Campagnolo); introduciendo distintas variaciones (diámetro del eje, forma y número de estrías...).

La característica distintiva de este tipo de pedalier es que el eje y la biela derecha forman una sola pieza y los rodamientos se encuentran en dos cazoletas externas a la caja del pedalier [Figura 21]. Esta distribución aumenta la rigidez del conjunto eje/rodamientos.



Figura 21. Conjunto Hollow-Tech [10].

2. Pedalier con caja de pedalier sin rosca

Este sistema es más común en bicicletas de carrera, montaña y alta gama. Hay distintos tipos en función del montaje de los rodamientos:

- **Montaje directo.** Este sistema presenta los rodamientos encajados en la misma caja del pedalier (cuadro) [Figura 22]. El estándar más común es el BB30 (68 o 73 mm de anchura, 42 mm de diámetro de caja de pedalier y 30 mm de diámetro para el eje pedalier). Posteriormente, surgió el modelo T47 BB Standard con una rosca de 2,54 hilos por pulgada (tpi) y un diámetro de 47 mm que se adapta a cualquier diámetro de eje.

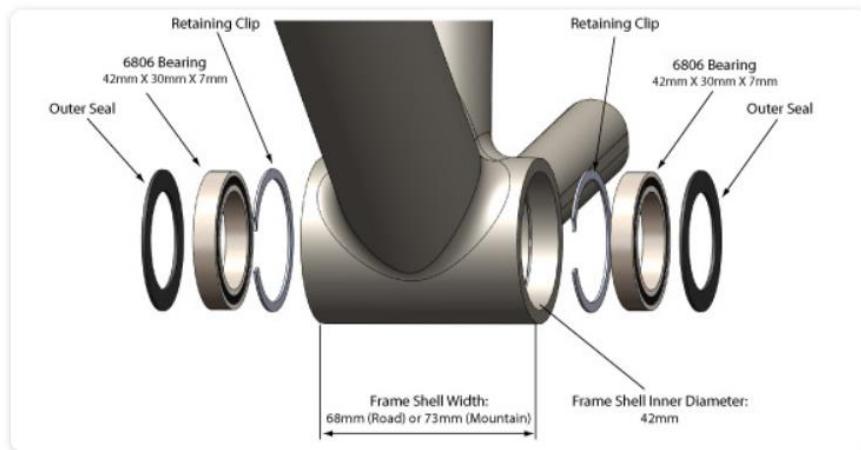


Figura 22. Pedalier de montaje directo [10].

- **Press-Fit.** Los rodamientos van en cazoletas montadas a presión en la caja del pedalier. Dentro de este existen distintos tipos en función de sus características geométricas [Figura 23] Los estándares más comunes son el BB86, el BB89 y el BB92.

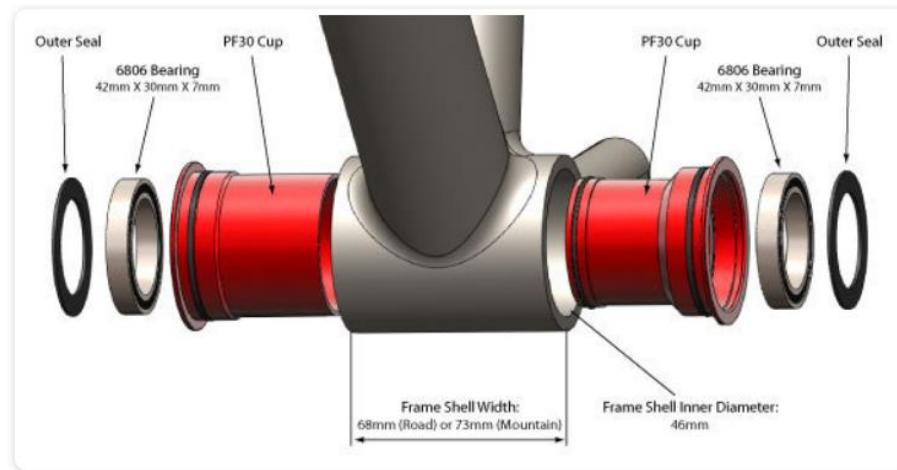


Figura 23. Pedalier con montaje Press-Fit [10].

Una vez analizados los tipos de ejes pedalier existentes, se concluye que el diseño del cuadro se realizará para poder **acoplar un eje de pedalier de tipo Press Fit en una caja de pedalier sin rosca**. Los tipos de ejes pedalier (con sistema Press Fit) más empleados para bicicletas de montaña son el **BB89** (89,5 mm de longitud y 41 mm de diámetro interior) y **BB92** (92 mm de longitud y 41 mm de diámetro interior); en ambos casos, el eje pedalier a colocar es de 24 mm.

Por ello, la caja de pedalier del cuadro presentará una anchura de 91,5 mm y un diámetro interior de 41 mm compatible con un eje de pedalier de 24 mm de diámetro mediante un sistema Press Fit BB92.

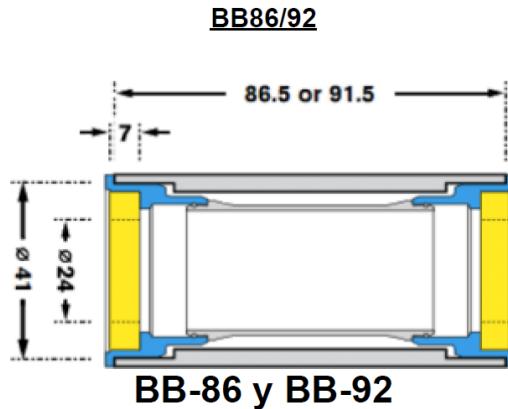


Figura 24. Cotas de caja de pedalier BB 86/92 [10].

El sistema de pedalier descrito se trata de un estándar de fabricación extendida; como el modelo **KCNC BB92 Press Fit Adaptador, negro de Bikester**; para sujeción de un eje de pedalier de 24 mm de diámetro [Figura 25] [12].

KCNC BB92 Press Fit Adaptador, negro



Figura 25. KCNC BB92 Press Fit Adaptador, negro de Bikester [12].

Otra opción que también se adapta a la propuesta de diseño de la caja de pedalier descrita, es el modelo **Pedalier Sram Press Fit GXP MTB BB92 de Todobicis ZGZ** [Figura 26] [13].



Figura 26. Sistema Press Fit [13].

Por si surgiese alguna complicación en la instalación del eje pedalier escogido, se comprueba como existen casquillos que actúan a modo de adaptadores y permiten la adecuación del diámetro interno de la caja de pedalier para facilitar la instalación del eje pedalier escogido. Uno de esos ejemplos es el modelo **Adaptador para eje de pedalier Stronglight PF30 > BB86/89/92** disponible en **Bikeshop** [Figura 27] [14].



Figura 27. Adaptador para eje de pedalier Stronglight PF30 > BB86/89/92, de Bikeshop [14].

II.III. Zona ruedas traseras

A continuación, se estudia la disposición de la zona donde irá acoplada la rueda trasera. Dicha zona se incluye en la geometría y el cálculo, pero se deberá estudiar una solución constructiva para la fabricación del cuadro por su elevada complejidad de ejecución.

En primer lugar, **las ruedas escogidas son de 28"**; presentan un ancho de 21 mm y un diámetro interno del neumático de 622 mm. Como se puede comprobar se trata de una medida estándar con diversos modelos comercializados como; por ejemplo, el modelo **Rueda Bicicleta Polivalente 28" Trasera Doble Pared Negro de Decathlon [Figura 28]** [15].



Figura 28. Rueda Bicicleta Polivalente 28" Trasera Doble Pared Negro, Decathlon [15].

Acorde a esto, las **cubiertas** presentan las siguientes dimensiones: **700 x 38 (38-622)**; es decir, un ancho de 38 mm y un diámetro de 622 mm. Se comprueba como se fabrican cubiertas con dichas características, como el modelo **Cubierta Trekking 1 Speed Aro Rígido 700x38 / ERT0 38-622 BTWIN de Decathlon [Figura 29]** [16].



Figura 29. Cubierta Trekking Aro Rígido 700x38 / ERT0 38-622 BTWIN, Decathlon [16].

Teniendo en cuenta que la bicicleta diseñada **presenta 9 velocidades** se escoge el eje trasero de las ruedas. En la mayoría de las bicicletas el diámetro del eje trasero de las ruedas es de 14 mm. En cuanto a la longitud, existen diversas medidas estándar como son 165, 170, 175, 178 y 180 para hasta 9 piñones; incrementando la longitud con el aumento del número de piñones por encima de dicha cifra [17].

En la rueda trasera se acoplará un eje de 12 mm de diámetro y 148 mm de longitud.

Se comprueba como existen modelos comercializados de dicho tipo de eje, como es el caso del **Eje Pasante Transversal Rueda Trasera Bicicleta Montaña 12 x 148 Boost** de **Decathlon** [Figura 30] [18].



Figura 30. Eje Pasante Transversal Rueda Trasera Bicicleta Montaña 12 x 148 Boost, Decathlon [18].

Este tipo de eje es compatible con un eje para la rueda delantera como el modelo **Eje Pasante Delantero 15 x 110 mm Bicicleta Montaña Manitou** disponible en **Decathlon** [Figura 31] [19].



Figura 31. Eje Pasante Delantero 15x110 mm Bicicleta Montaña Manitou, Decathlon [19].

Para el acople de las ruedas traseras mediante el eje seleccionado, se valora la colocación de punteras y se adapta el diseño de la geometría del cuadro a la posterior colocación de estas. El diseño se adapta a un modelo de puntera como la **Patilla Cambio Bicicleta MTB RR9 Posterior a 2009** disponible en **Decathlon** [Figura 32] [20].

ROCKRIDER



Figura 32. Patilla Cambio Bicicleta MTR RR9 posterior a 2009 [20].

II.IV. Zona sillín

En la zona del sillín es importante adaptar el diámetro del tubo en que se integra la tija para el acoplamiento del sillín. Para el diseño del cuadro se considera un diámetro interno del tubo de 27,2 mm, en el cual se acoplará la tija a la que se añadirá el sillín. Se comprueba como se trata de una medida estándar al contar en el mercado con tijas para el sillín de ese mismo diámetro; por ejemplo, el modelo **Tija de Sillín 27.1 mm Bicicleta Negro** de Decathlon [Figura 33] [21]:



Figura 33. Tija de Sillín 27.2 mm Bicicleta Negro Decathlon [21].

Del mismo modo, se escoge un diámetro externo del cuadro de 32 mm para acoplar una abrazadera de dicha medida. Una de las posibles abrazaderas que se adaptarían al diseño sería el modelo **Abrazadera Sillín 32 mm Plata** de **Decathlon** [Figura 34] [22].



Figura 34. Abrazadera Sillín 32 mm Plata, Decathlon [22].

Se concluye un **diámetro interno del tubo del cuadro en que se inserta la tija de 27,2 mm** y un **diámetro externo donde se colocará la abrazadera de 32 mm.**

De igual modo que en el resto de las zonas estudiadas en el presente anexo, se comprueba como existen casquillos comercializados con las dimensiones del tubo donde se insertará la tija del sillín. Se encuentra disponible el modelo **TOM shim 25,4 / 27,2 mm plata** disponible en **Internet-Bikes** [Figura 35] [23].



Figura 35. *TOM shim 25,4 / 27,2 mm plata, Internet-Bikes [23].*

En caso de realizar la instalación del sillín mediante el empleo de un casquillo, el diámetro donde se insertaría la tija se vería reducido por el grosor del casquillo. Por ello, se estudia la existencia de tijas con un diámetro de 25,4 mm, medida a la que se reduciría el diámetro interno del cuadro con el uso del casquillo escogido. Se comprueba como existen modelos comercializados como es el caso del modelo **Tija sillín bicicleta 25,4 mm diámetro y 300 mm longitud negro**, disponible en **Decathlon** [Figura 36] [24].



Figura 36. *Tija sillín bicicleta 25,4 mm diámetro y 300 mm longitud, Decathlon [24].*

II.V. Resumen dimensionado

Recogiendo las dimensiones especificadas en cada una de las zonas analizadas se obtienen las conclusiones siguientes [Tabla 1]:

Tabla 1. Resumen de dimensiones.

Zona potencia y dirección	\varnothing dirección (mm)	44
	L dirección (mm)	180
	α dirección ($^{\circ}$)	72
Zona caja de pedalier	L caja pedalier (mm)	91,5
	\varnothing caja pedalier (mm)	41
	\varnothing eje pedalier (mm)	24
Zona ruedas	\varnothing eje trasero (mm)	12
	L eje trasero (mm)	148
	\varnothing eje delantero (mm)	15
	L eje delantero (mm)	110
Zona sillín	\varnothing interior tija (mm)	27,2
	\varnothing exterior abrazadera (mm)	32

Con ello, se procede al diseño del cuadro teniendo en cuenta las dimensiones ya fijadas en el presente anexo.

Anexo III. Geometría del modelo

En el presente anexo se describe con mayor detalle el planteamiento de la geometría inicial del modelo obtenido tras analizar las zonas más conflictivas y llevar a cabo la fase de diseño.

La geometría del cuadro se adapta a las necesidades de una bicicleta de trekking talla L [Figura 37].

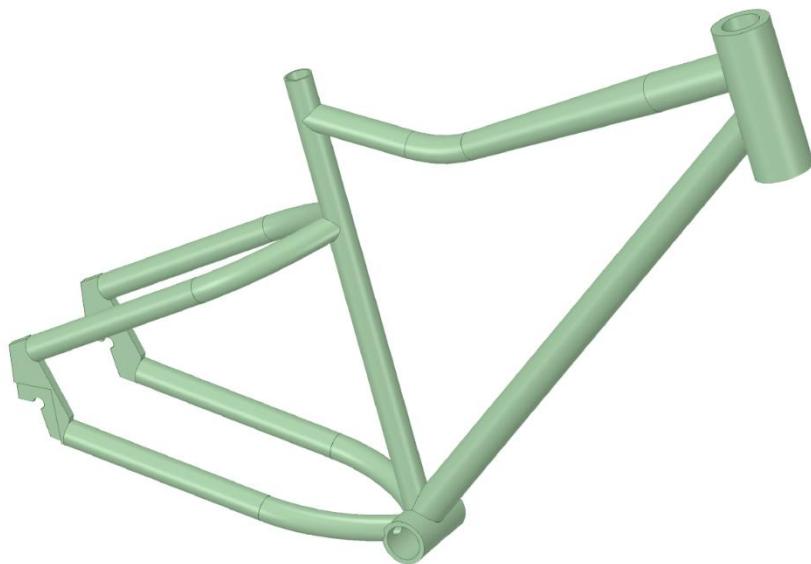


Figura 37. Geometría del cuadro, SpaceClaim ANSYS v19.2.

Las dimensiones más características de dicha talla; consideradas en el proceso de diseño, son las siguientes [Figura 38][Tabla 2-3][25]:

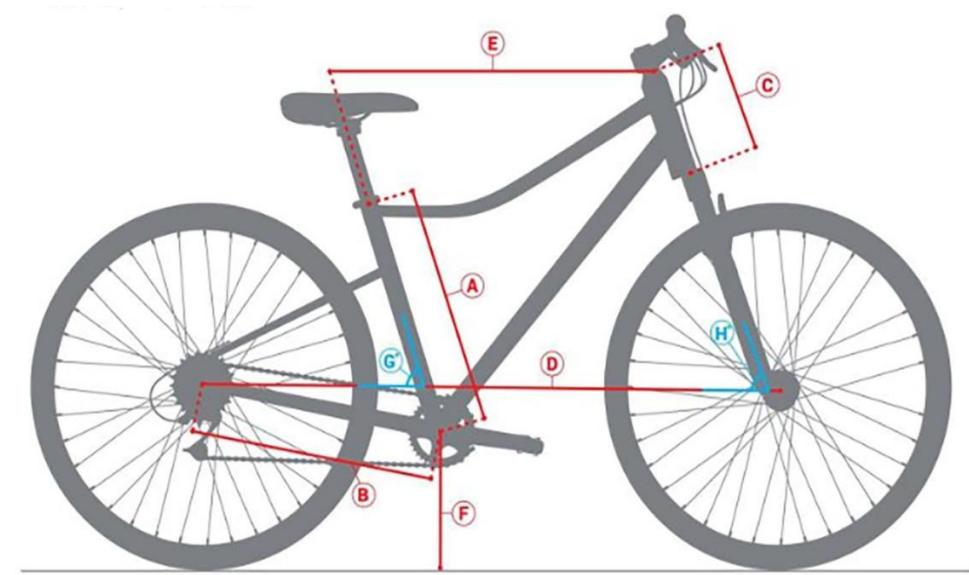


Figura 38. Parámetros de diseño [25].

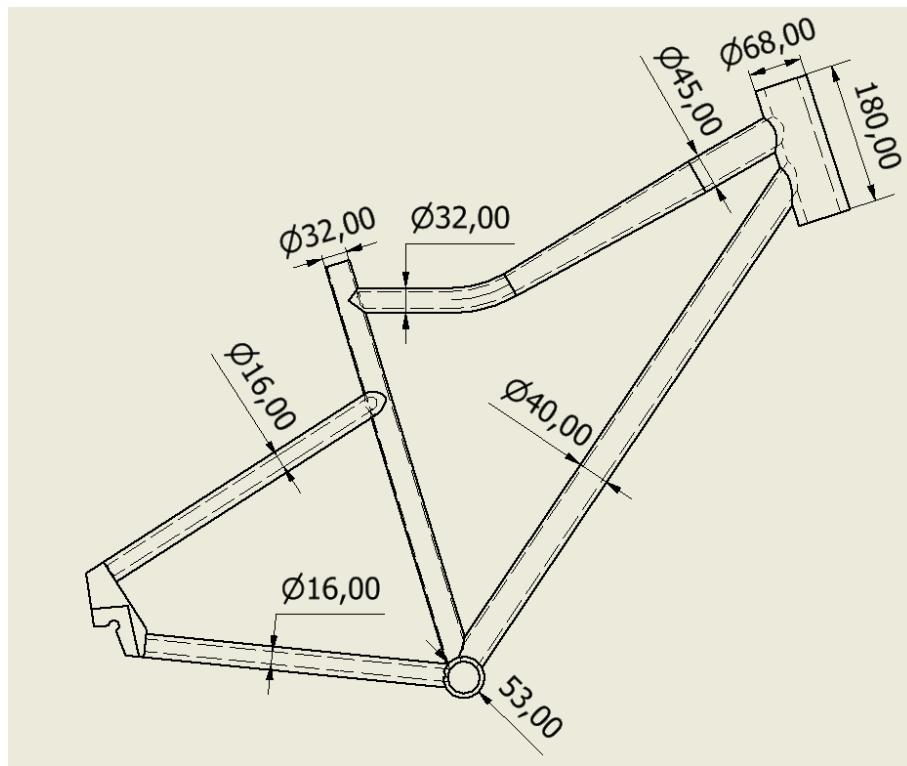
Tabla 2. Parámetros geométricos relevantes en el diseño [1].

L tubo sillín (mm)	<i>A</i>	550
L base(mm)	<i>B</i>	450
H tubo dirección (°)	<i>C</i>	180
d ejes total (mm)	<i>D</i>	1131
L virtual (mm)	<i>E</i>	640
H pedalier (mm)	<i>F</i>	290

Tabla 3. Parámetros angulares relevantes en el diseño [1].

α tubo del sillín (°)	<i>G''</i>	73
α tubo de dirección (°)	<i>H''</i>	72

El resto de las dimensiones se eligen de forma razonada [Tabla 1], considerando qué zonas pueden sufrir mayores solicitudes. Las dimensiones del modelo inicial son las siguientes [Figura 39-40]:

*Figura 39. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.*

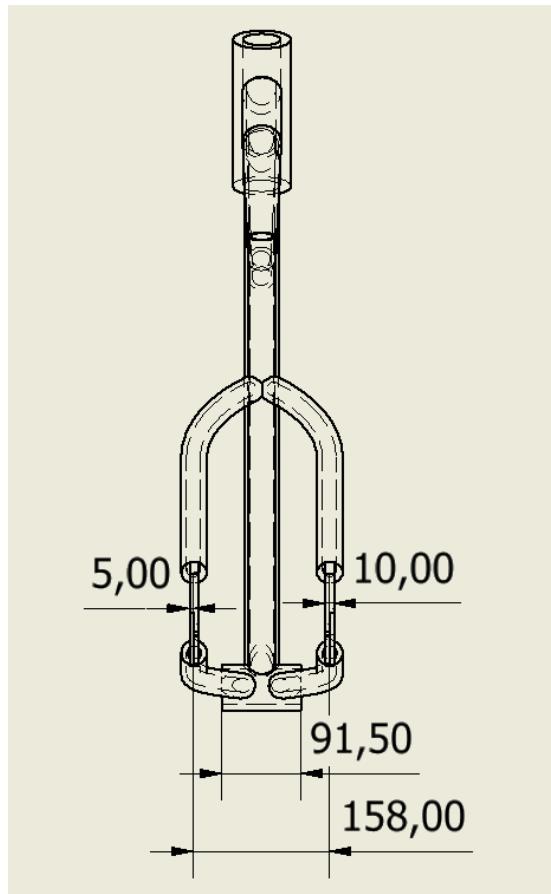


Figura 40. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.

Para poder definir la totalidad de las dimensiones, se realiza un corte, pudiendo así reflejar las dimensiones internas del cuadro en la vista A-A obtenida de dicho corte [Figura 41-42].

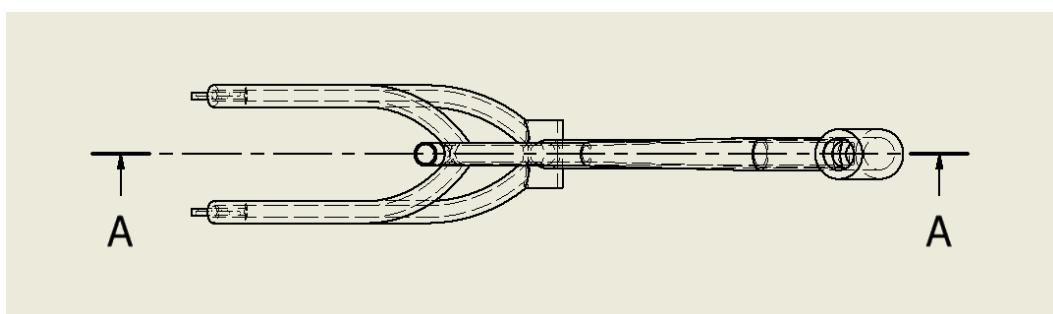


Figura 41. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.

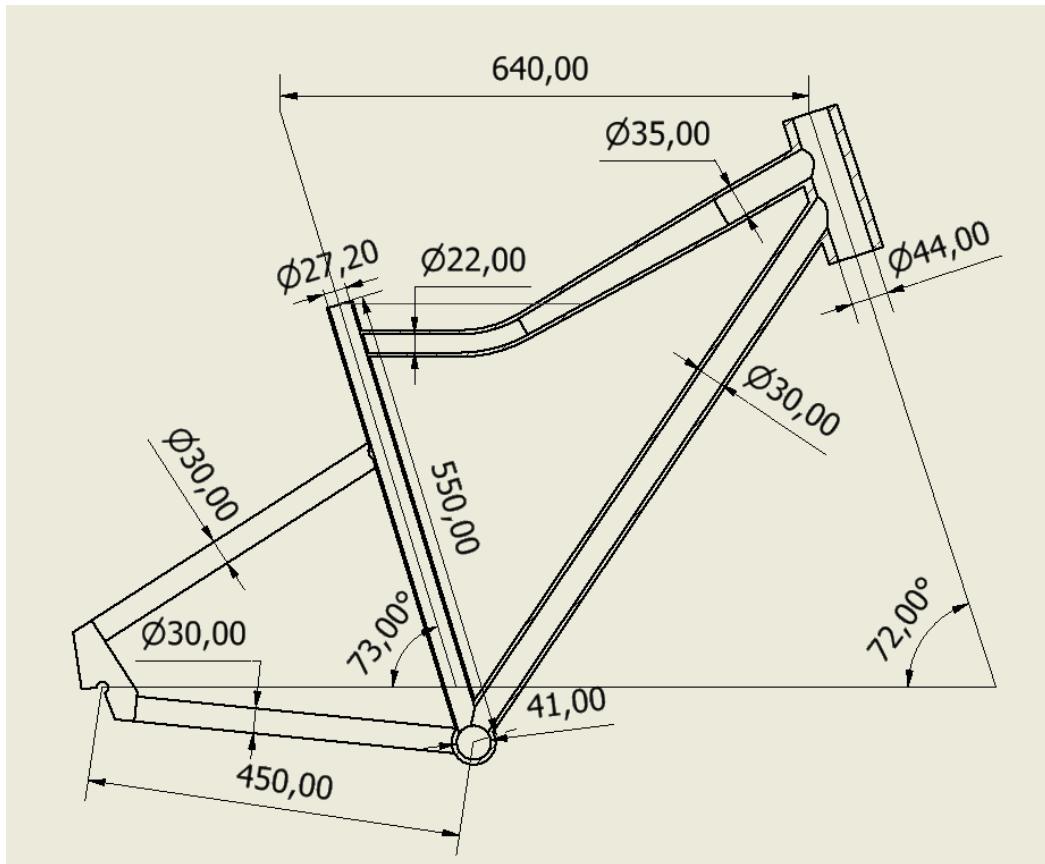


Figura 42. Croquis corte A-A, Autodesk Inventor Professional 2022.

A continuación, se definen las dimensiones de la zona de acople del eje de la rueda trasera mediante vistas de detalle [Figura 43-46].

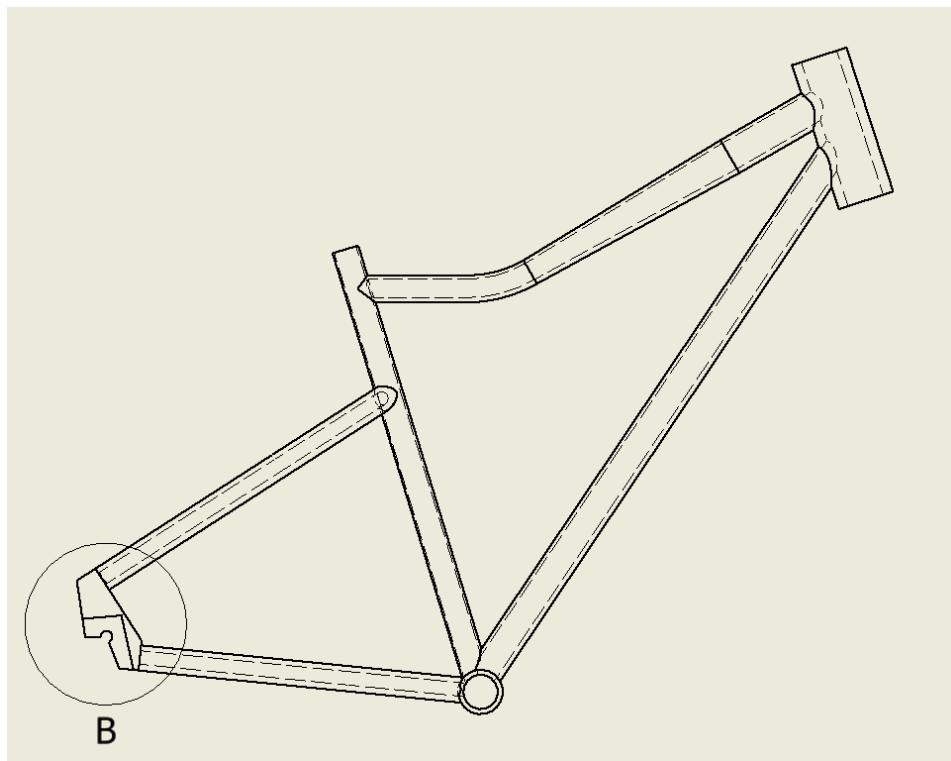


Figura 43. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.

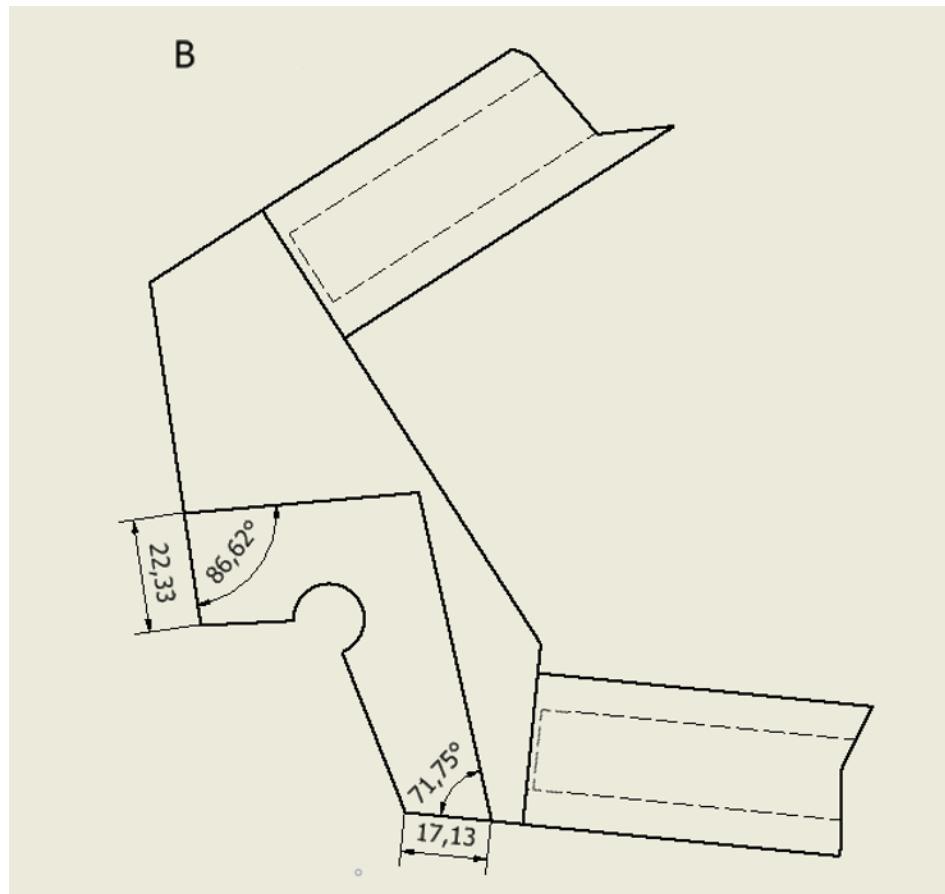


Figura 44. Croquis detalle B-B, Autodesk Inventor Professional 2022.

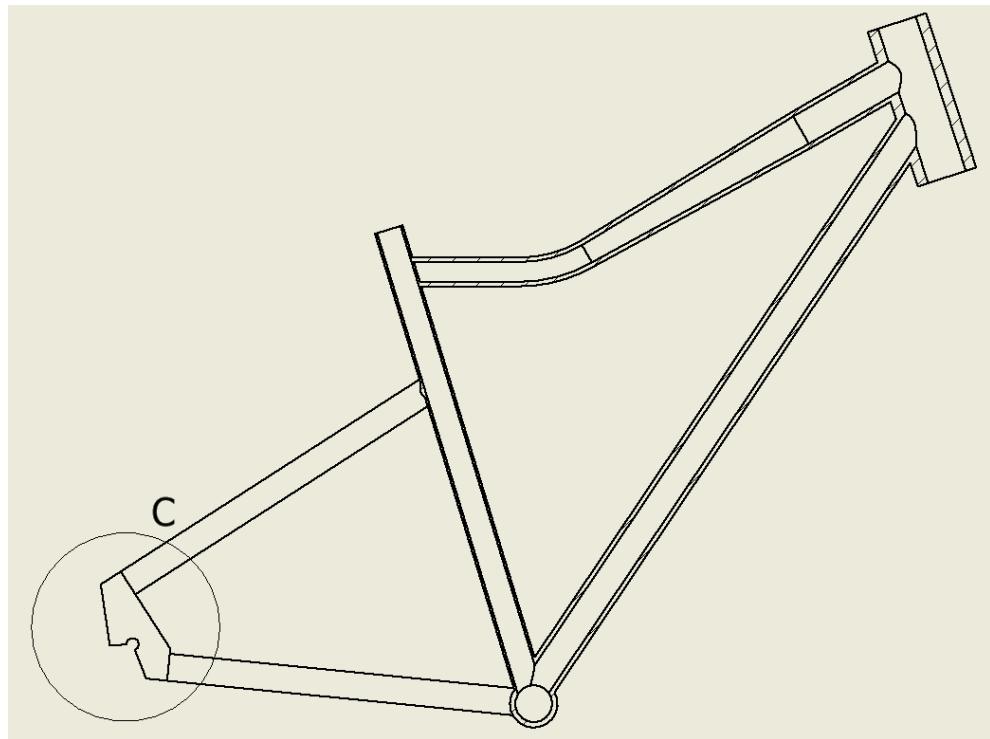


Figura 45. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.

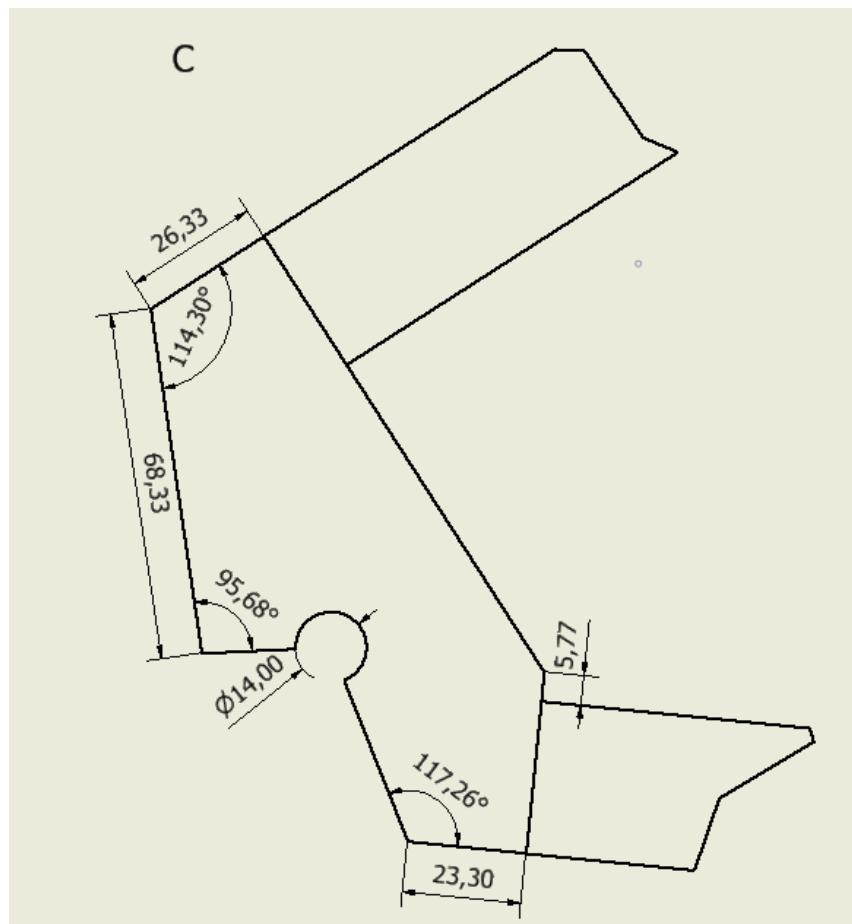


Figura 46. Croquis detalle C-C, Autodesk Inventor Professional 2022.

Por último, se define la longitud y radio de curvatura de las vainas del cuadro que van a la rueda trasera en una vista isométrica del modelo [Figura 47].

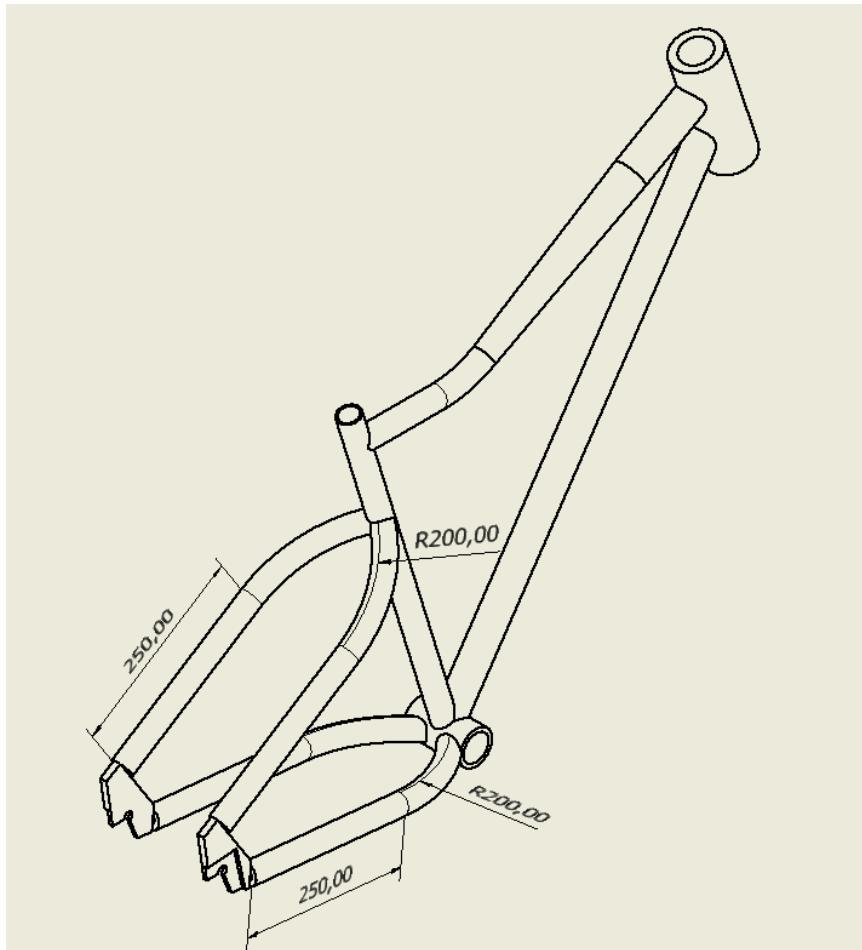


Figura 47. Croquis vista isométrica, Autodesk Inventor Professional 2022.

Anexo IV. Molde para fabricación

De forma análoga al cuadro, se realiza el diseño del molde que sería necesario para la fabricación del cuadro. El molde se basa en el interior del cuadro, dado el proceso de fabricación consiste principalmente en su recubrimiento con braiding de fibra de carbono y resina Epoxy.

La geometría del cuadro define de forma concisa los diámetros interiores de los tubos del cuadro donde deben acoplarse las piezas con medidas estándar escogidas en el **Anexo II. Análisis por zonas** [Figura 48].

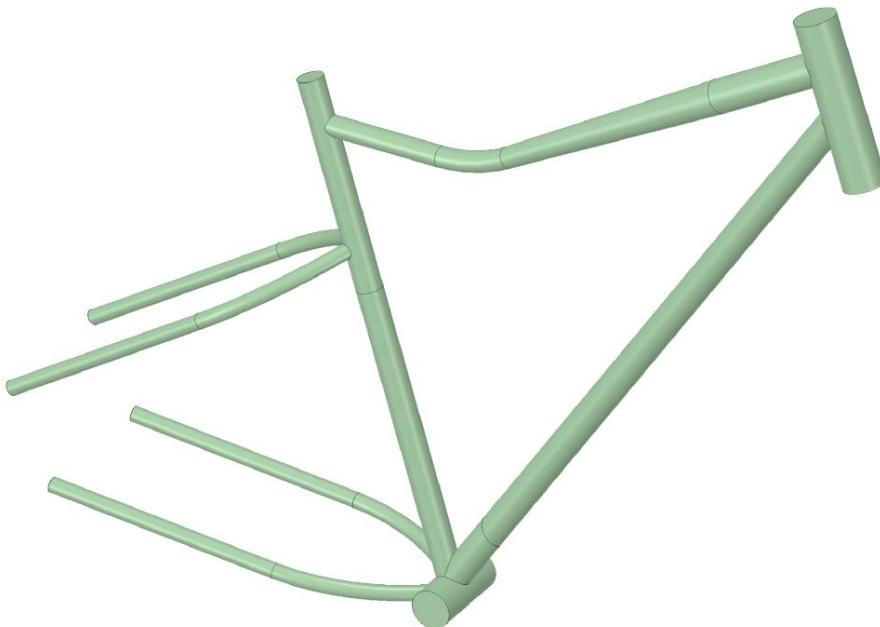


Figura 48. Geometría del molde, SpaceClaim ANSYS v19.2.

A continuación, se describe en detalle la geometría del molde necesario para la fabricación del cuadro de bicicleta [Figura 49-51].

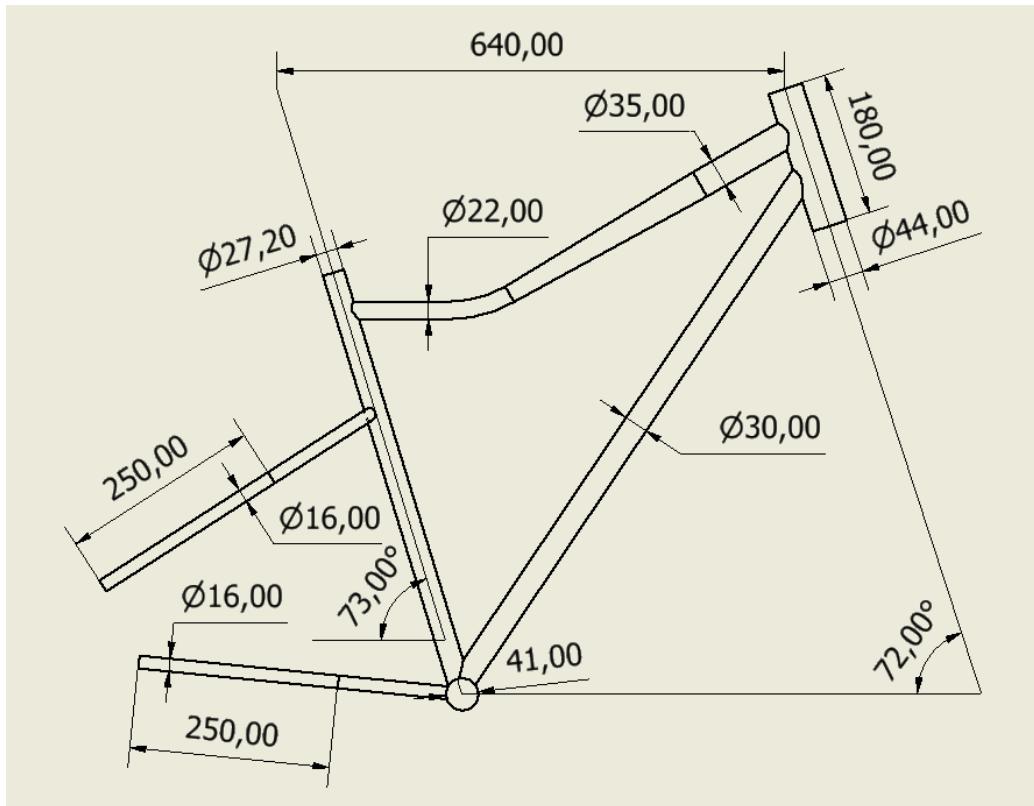


Figura 49. Croquis del molde, Autodesk Inventor Professional 2022.

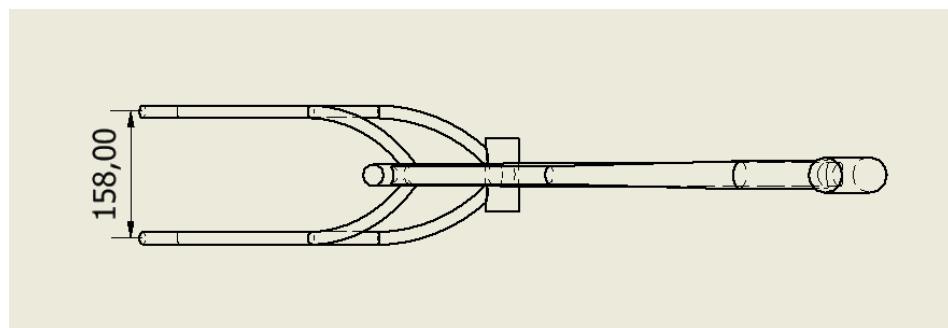


Figura 50. Croquis del molde, Autodesk Inventor Professional 2022.

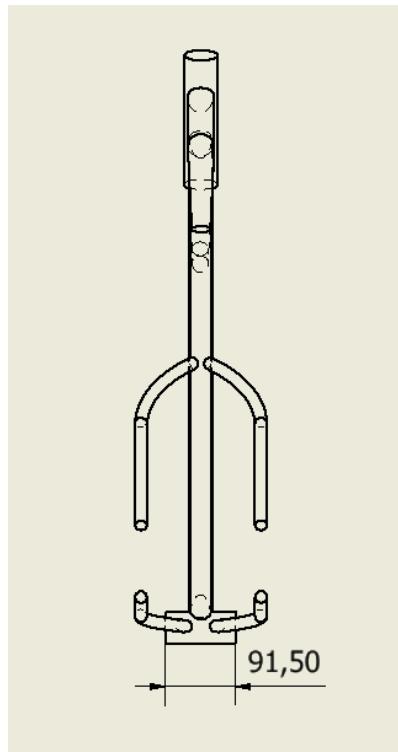


Figura 51. Croquis del molde, Autodesk Inventor Professional 2022.

Por último, se añade una vista en isométrico para acotar las dimensiones de las vainas que sustentan la rueda trasera [Figura 52].

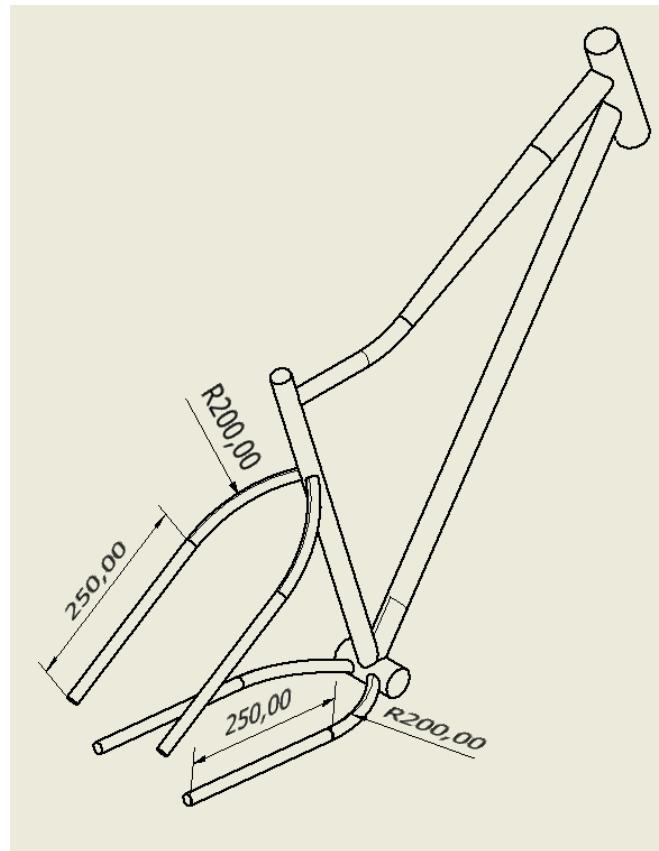


Figura 52. Vista isométrica, Autodesk Inventor Professional 2022.

La totalidad de las dimensiones del molde se recogen en el ***plano que se adjunta al final del documento***, donde se representan las vistas a escala de los croquis expuestos en el presente anexo.

El molde expuesto incluye el cuadro en su totalidad con la excepción de las piezas donde se acopla el eje de la rueda trasera. Dichas piezas serán acopladas de forma posterior a la fabricación del resto del cuadro con piezas en acero fácilmente mecanizable para acoplar las punteras escogidas.

Anexo V. Ensayos del cuadro

En el presente anexo se analizan en mayor profundidad las condiciones de contorno de los ensayos necesarios indicados en la norma española **AENOR UNE-EN ISO 4210-2:2015 Ciclos.**

Requisitos de seguridad para bicicletas [26].

V.I. Características de una falsa horquilla

I. Método de ensayo

En el **Anexo A. Características de una falsa horquilla** de la **Norma UNE-EN ISO 4210-6** se expone como, en el caso de emplear una horquilla falsa, esta debe cumplir ciertos requisitos bajo la aplicación de una fuerza de 1.200 N. Según la normativa, el ratio de la flecha deberá ser menor que 1 y se calculará de la forma siguiente [*Figura 53*]:

$$D_r = \frac{K_2 \times 10000 \times \delta}{L^3}$$

donde

D_r es el ratio de flecha;

K_2 es 709, una constante;

L es la longitud de la horquilla, expresada en milímetros;

δ es la flecha, expresada en milímetros.

Figura 53. Extracto de la Norma UNE-EN ISO 4210-6:2015.

II. Método de simulación

Para la simulación se aplica la fuerza vertical repartida entre los nodos implicados. Al haber 392 nodos implicados en la zona de aplicación de la fuerza:

$$F = 1.200 \text{ N}$$

$$F_{nodo} = \frac{F}{n^o \text{ nodos}} = \frac{1.200 \text{ N}}{392 \text{ nodos}} = 3,061 \frac{\text{N}}{\text{nodo}}$$

Se aplicarán fuerzas de 3,061 N en cada uno de los nodos pertenecientes a las superficies involucradas. Se impone una condición de contorno de empotramiento que impide traslaciones y giros en todas las direcciones en todos los nodos que forman parte de la superficie que se introduce en la dirección del cuadro. Dichas condiciones se imponen en Patran y se exporta el archivo .inp a Abaqus para su cálculo [Figura 54].

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 13 12:52:47 Hora estándar romance 2021

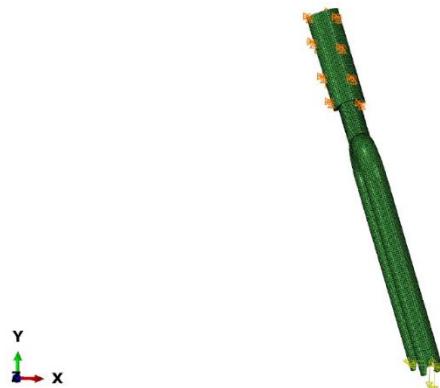


Figura 54. Condiciones de contorno impuestas, Abaqus.

Se comprueba como, al exportar el archivo cambian los sistemas de referencia, por lo que la fuerza perpendicular a la dirección de la horquilla se descompone en tres en el sistema de referencia de Abaqus [Figura 55].

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 13 12:58:21 Hora estándar romance 2021

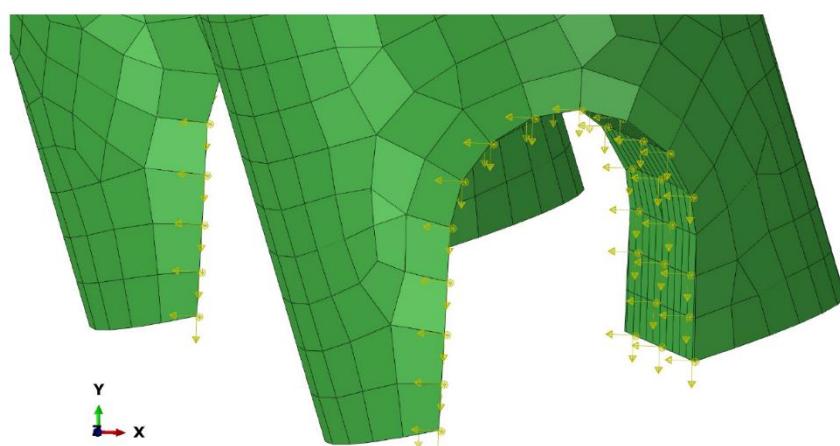


Figura 55. Descomposición de la fuerza perpendicular al eje de la dirección, Abaqus.

Se comprueba como la magnitud de la fuerza aplicada en la dirección perpendicular es la adecuada:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

$$F = \sqrt{2,65071^2 + 1,52915^2 + 0,0717916^2} = 3,061 \text{ N}$$

Una vez establecidas las condiciones de contorno se evalúan los resultados obtenidos. En primer lugar, se comprueba que cumplan los requisitos en desplazamientos establecidos según la normativa [Figura 56]:

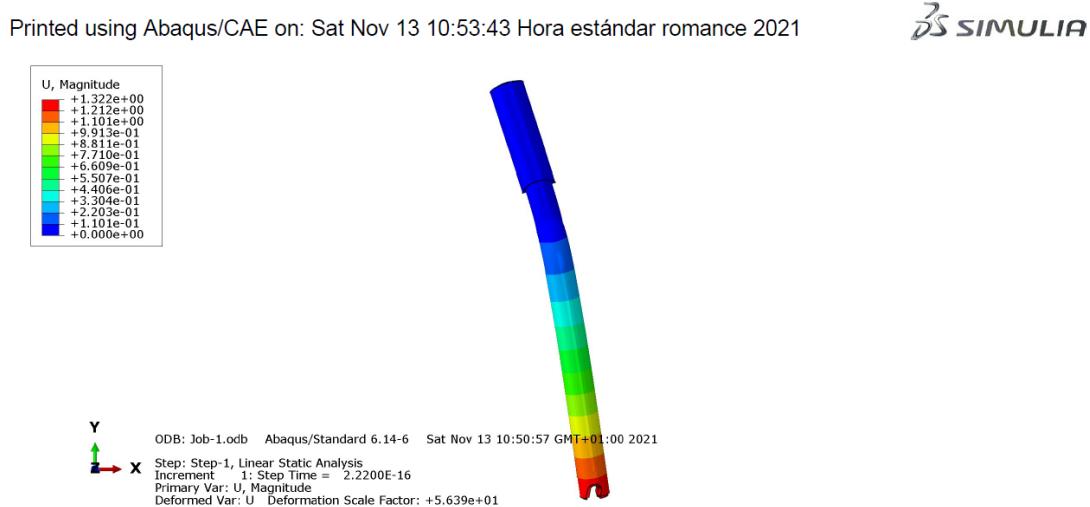


Figura 56. Magnitud de los desplazamientos de la horquilla, Abaqus.

Se comprueba como la horquilla cumple con los requisitos en términos de desplazamiento:

$$D_r = \frac{709 \cdot 10.000 \cdot 1,322}{740^3} = 0,023 < 1$$

Tras ello, se comprueba que el acero no alcanza el régimen plástico analizando la distribución de tensiones de Von Mises [Figura 57]:

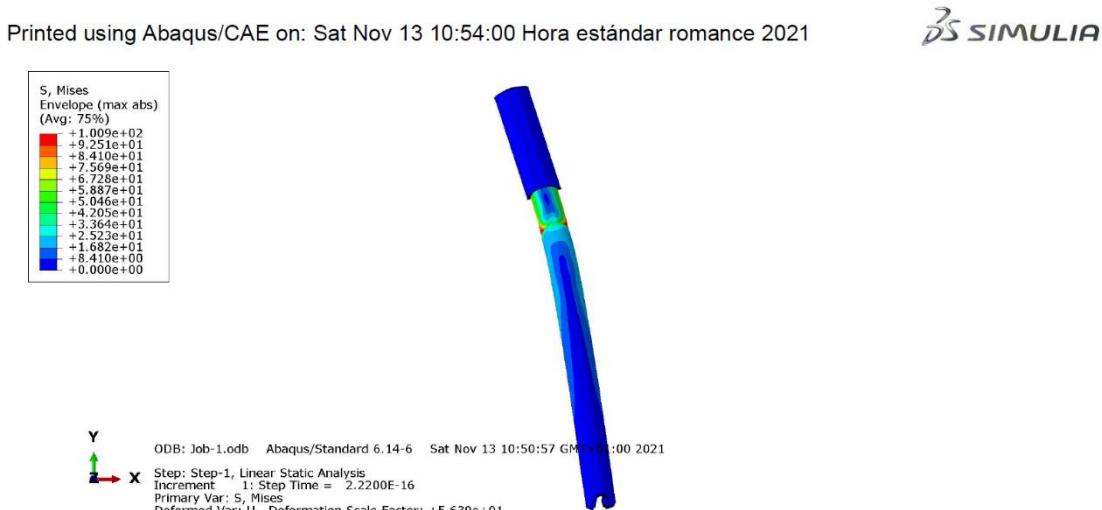


Figura 57. Distribución de tensiones de Von Mises, Abaqus.

Se comprueba como la tensión máxima alcanzada es menor que el límite elástico del acero por lo que la falsa horquilla sería adecuada para la simulación de los ensayos de choque [27]:

$$\sigma_{VM} = 100,9 \text{ MPa} < \sigma_y = 400 \text{ MPa}$$

Además, las zonas con mayores solicitudes en términos de tensión se encuentran en la bifurcación de las extremidades de la horquilla, zona de concentración de tensiones. Por ello, podrían ser disminuidas con una transición geométrica más suave [Figura 58]:

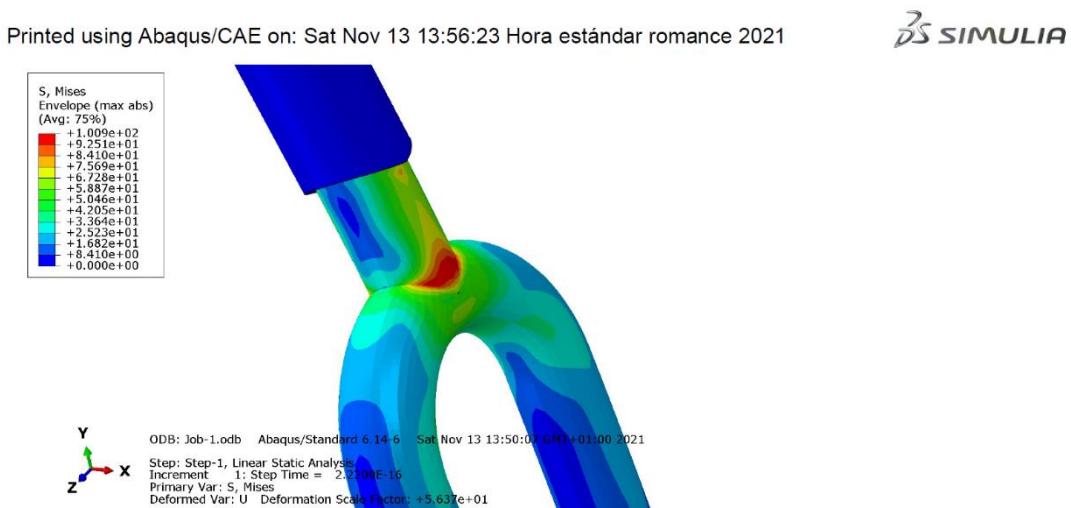


Figura 58. Distribución de tensiones de Von Mises, Abaqus.

Los ensayos necesarios para verificar la validez del diseño del cuadro son los siguientes:

V.II. Ensayo de choque - Caída de una masa

I. Método de ensayo

En primer lugar, se extraen las condiciones de contorno del apartado de la norma referente al ensayo y se adapta la simulación lo máximo posible a lo que sería el ensayo real del cuadro. La norma exige que al ensayar según el método descrito no debe haber fisuras ni roturas visibles en el cuadro.

El primer aspecto a considerar es la necesidad de ensayar el conjunto cuadro-horquilla; por lo cual, en este caso se debe colocar una falsa horquilla. Con ello, los valores de deformación permanente que no se deben sobrepasar son más restrictivos. Para este ensayo, la deformación

permanente medida entre los centros de los ejes de las ruedas no debe exceder los 10 mm (bicicleta de montaña) [26].

Las directrices para el ensayo real en taller requieren la colocación de un rodillo de determinadas características sobre la horquilla. Se sujetó el conjunto cuadro-horquilla o cuadro-barra en posición vertical en un dispositivo de fijación rígido. Tras ello, se coloca un percutor de determinadas características sobre el rodillo, se levanta una altura de 360 mm (en el caso concreto de bicicletas de montaña), y se suelta para que percuta al rodillo o tija de acero en la dirección vertical. Cuando el percutor se detiene se mide de nuevo la distancia entre ejes [Figura 59].

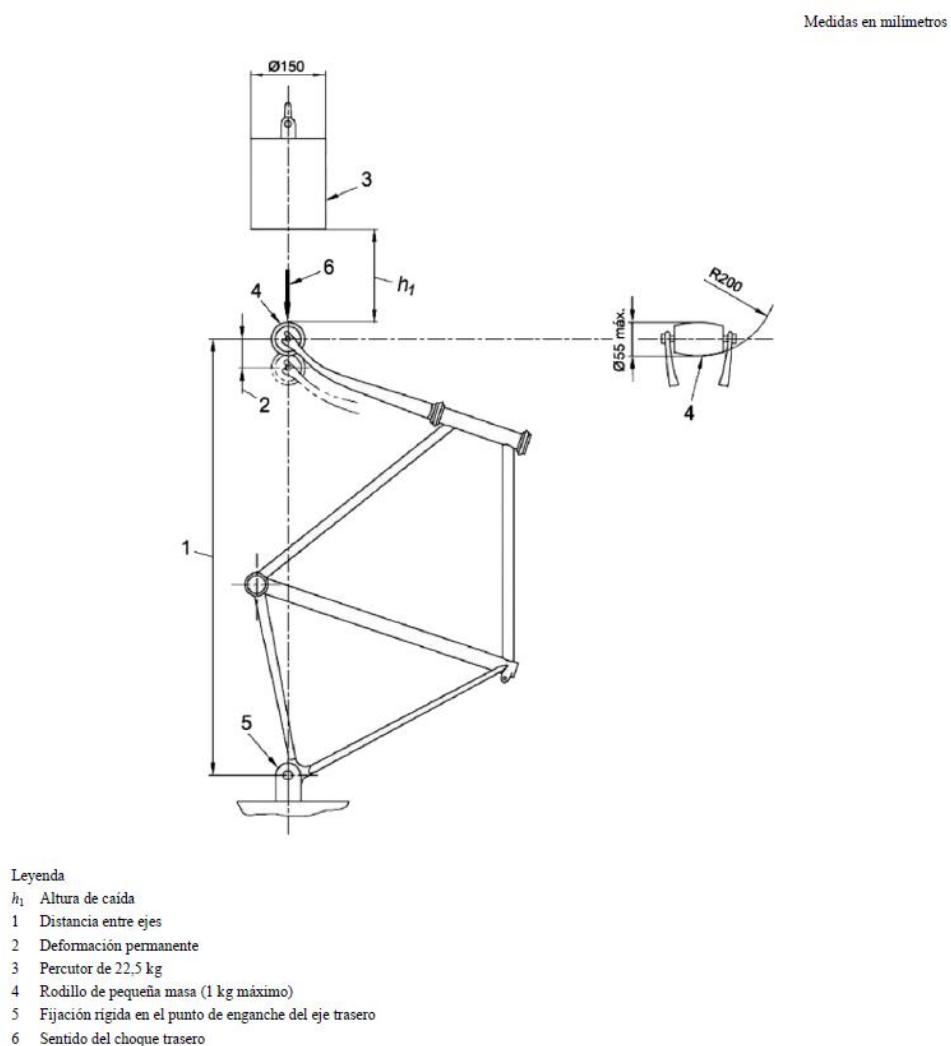


Figura 59. Conjunto cuadro-horquilla, caída de una masa, Norma UNE-EN ISO 4210 [26].

II. Método de simulación

En este caso se replican las condiciones de contorno del ensayo real impidiendo los desplazamientos y giros en todas las direcciones en la zona de acople del eje de la rueda trasera. Además, en el eje de la rueda delantera se bloquean todos los movimientos y giros, a excepción del desplazamiento en la dirección en que se quiere cuantificar la deformación permanente.

A continuación, se modela una falsa horquilla y se aplican en sus extremos las fuerzas equivalentes al impacto del percutor. Para ello, se calcula la fuerza equivalente al efecto del percutor sobre el rodillo a través del **Teorema de Conservación de la Energía Mecánica** (despreciando el efecto del rozamiento del percutor con el aire).

$$E_{C,A} + E_{P,A} = E_{C,B} + E_{P,B}$$

Se considera la hipótesis de que el percutor parte del punto A con velocidad inicial nula.

$$E_{C,A} = 0$$

Además, la deformación permanente se mide cuando el percutor se ha detenido, con lo cual:

$$E_{P,B} = 0$$

Por lo que se concluye:

$$E_{P,A} = E_{C,B}$$

$$m \cdot g \cdot h_A = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$$

$$v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_A}$$

Con lo cual el efecto sería similar al producido por el percutor impactando sobre el rodillo a la siguiente velocidad:

$$v_B = \sqrt{2 \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,36 m} = 2,66 \frac{m}{s}$$

Se conoce la masa del percutor (22,5 kg) dado que es requisito impuesto por la normativa. Tras ello, se procede al cálculo de la fuerza equivalente a dicha energía cinética mediante la **2ª Ley de Newton**:

$$F = m_{percutor} \cdot a$$

$$F = 22,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 220,725 \text{ N}$$

Con lo cual la aplicación de una fuerza de 220,725 N sobre los extremos de la horquilla ejercerá un efecto similar al impacto del percutor sobre la misma con una velocidad de 2,66 m/s.

La fuerza se aplica de forma distribuida sobre los nodos correspondientes a las superficies de contacto entre el rodillo y la horquilla. Consultando la geometría en *Patran*, se contabilizan 392 nodos, con lo cual:

$$F_{nodo} = \frac{F}{n^o \text{ nodos}} = \frac{220,725 \text{ N}}{392 \text{ nodos}} = 0,563 \frac{\text{N}}{\text{nodo}}$$

V.III. *Ensayo de choque - Caída de cuadro*

I. Método de ensayo

La norma exige que al ensayar según el método descrito no haya fisuras ni roturas visibles en el conjunto y no debe haber ninguna separación de ninguna pieza de ningún sistema de suspensión. La deformación permanente medida entre los centros de los ejes de las ruedas debe ser menor a 60 mm (en el caso de realizar el ensayo en una bicicleta de montaña).

El primer aspecto a considerar es la necesidad de ensayar el conjunto cuadro-horquilla; por lo cual, en este caso también se debe colocar una falsa horquilla.

Se monta el conjunto cuadro-horquilla y se impone como condición de contorno el impedimento de todas las traslaciones y los giros de la zona de acople del eje de la rueda trasera, permitiendo únicamente el giro en la dirección del propio eje. Se fija de forma segura una masa M_1 a la tija del sillín con el centro de gravedad a una distancia D (75 mm) a lo largo del eje de la tija. Se fijan masas M_2 y M_3 a la parte superior del tubo del eje de la horquilla y la caja del pedalier respectivamente.

El procedimiento de ensayo comienza midiendo la distancia entre ejes con las tres masas colocadas. Tras ello, se hace girar el conjunto alrededor del eje trasero hasta que la distancia entre el rodillo de pequeña masa y el yunque es de h_2 y se suelta el conjunto para que caiga libremente sobre el yunque. Tras ello, se mide la variación de la distancia entre ejes entre la colocación estática de las tres masas y de forma posterior al impacto del rodillo sobre el yunque [Figura 60].

En el caso de ensayar un cuadro de bicicleta de montaña se emplea una masa M_1 de 30 kg, M_2 de 10 kg y M_3 de 50 kg. La distancia h_2 para el caso de bicicletas de montaña es de 300 mm.

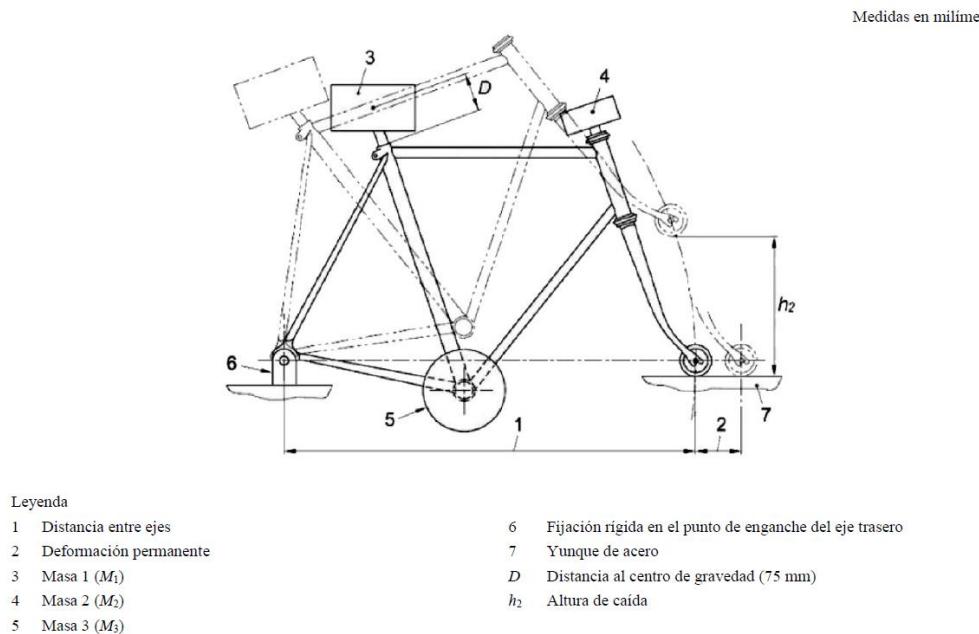


Figura 60. Conjunto cuadro-horquilla, caída de cuadro, Norma UNE-EN ISO 4210 [26].

II. Método de simulación

En este caso se replican las condiciones de contorno del ensayo real sobre la zona de acople del eje de la rueda trasera, impidiendo los desplazamientos y giros en todas las direcciones excepto los giros en la dirección del eje de la rueda trasera.

Se modela una falsa horquilla y se calcula la fuerza equivalente al efecto del impacto a través del **Teorema de Conservación de la Energía Mecánica** (despreciando el efecto del rozamiento del aire).

$$E_{C,A} + E_{P,A} = E_{C,B} + E_{P,B}$$

Se considera la hipótesis de que el cuadro parte del punto A con velocidad inicial nula.

$$E_{C,A} = 0$$

Además, la deformación permanente se mide cuando el movimiento se ha detenido, con lo cual:

$$E_{P,B} = 0$$

Por lo que se concluye:

$$E_{P,A} = E_{C,B}$$

$$m \cdot g \cdot h_A = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$$

$$v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_A}$$

Con lo cual el efecto sería similar al producido por el yunque (“suelo”) impactando sobre el rodillo a la siguiente velocidad:

$$v_B = \sqrt{2 \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,3 m} = 1,98 \frac{m}{s}$$

Para calcular la fuerza equivalente al impacto se estima un peso aproximado del cuadro de 1 kg y una estimación pesimista de la aceleración experimentada por el cuadro por efecto de la gravedad. Conocido el radio de giro (distancia inicial entre ejes):

$$a_t = \alpha \cdot r$$

$$\alpha = \frac{a_t}{r}$$

$$\alpha = \frac{9,81 \frac{m}{s^2}}{1,131 m} = 8,67 s^{-2}$$

Para compensar el efecto de la modificación de la distancia entre ejes con la deformación experimentada por el cuadro tras la colocación de las masas de forma previa al impacto, se emplea una aceleración de 9,81 m/s².

A continuación, se utiliza la **2^a Ley de Newton**:

$$F = m_{bicicleta} \cdot \alpha$$

$$m_{bicicleta} = m_{cuadro} + m_{ensayo} = 1 + 30 + 10 + 50 = 91 kg$$

$$F = 91 kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 892,71 N$$

$$F_{nodo} = \frac{F}{n^o nodos} = \frac{893 N}{392 nodos} = 2,28 \frac{N}{nodo}$$

Con lo cual se aplicará una fuerza de 2,28 N sobre cada uno de los 392 nodos implicados en la zona de impacto.

Además, para modelar el efecto del peso añadido sobre cada una de las zonas se aplicarán las fuerzas equivalentes a las masas de forma distribuida sobre los nodos en que se colocaría cada una de las masas:

$$F_1 = F_{tija} = M_1 \cdot a$$

$$F_{tija} = 30 \cdot 9,81 = 294,3 \text{ N}$$

$$F_{nodo,tija} = \frac{F_{tija}}{n^o \text{ nodos}} = \frac{294,3 \text{ N}}{26 \text{ nodos}} = 11,32 \frac{\text{N}}{\text{nodo}}$$

$$F_2 = F_{horquilla} = M_2 \cdot a$$

$$F_{horquilla} = 10 \cdot 9,81 = 9,81 \text{ N}$$

$$F_{nodo,horquilla} = \frac{F_{horquilla}}{n^o \text{ nodos}} = \frac{98,1 \text{ N}}{217 \text{ nodos}} = 0,45 \frac{\text{N}}{\text{nodo}}$$

$$F_3 = F_{pedalier} = M_3 \cdot a$$

$$F_{pedalier} = 50 \cdot 9,81 = 490,5 \text{ N}$$

$$F_{nodo,pedalier} = \frac{F_{pedalier}}{n^o \text{ nodos}} = \frac{490,5 \text{ N}}{289 \text{ nodos}} = 1,70 \frac{\text{N}}{\text{nodo}}$$

Con ello, se calcula el efecto del impacto de la bicicleta con el suelo cuando ésta se encuentra con carga.

Anexo VI. Criterio de fallo de Tsai Wu

En el presente anexo se describe el criterio de fallo de Tsai Wu, empleado para evaluar el comportamiento del braiding de fibra de carbono. Es una extensión del Criterio de Von Mises a una forma cuadrática. La expresión general del Criterio de Tsai Wu en el espacio de tensiones presenta forma de elipse y se rige por la fórmula siguiente que consiste en la suma de un invariante lineal y uno cuadrático [28][29]:

$$F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j + F_i \cdot \sigma_i = 1$$

En el caso de contar con capas ortótropas o transversalmente isotrópicas bajo tensión plana en XY se obtiene la expresión siguiente (F_s =parámetros de resistencia en el espacio de tensión):

$$F_{xs} = F_{ys} = F_s = 0$$

Por lo cual la expresión del Criterio de fallo de Tsai Wu queda de la siguiente forma:

$$F_{xx} \cdot \sigma_x^2 + 2 \cdot F_{xy} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + F_{yy} \cdot \sigma_y^2 + F_{ss} \cdot \sigma_s^2 + F_x \cdot \sigma_x + F_y \cdot \sigma_y = 1$$

La expresión presenta 6 términos independientes, entre los cuales se encuentran términos asociados a la interacción:

$$F_{xy} = F_{xy}^* \cdot \sqrt{F_{xx} \cdot F_{yy}}$$

Como matemáticamente la envolvente elipsoidal de fallo debe mantenerse cerrada debe verificar:

$$-1 < F_{xy}^* < 1$$

Si $\sigma_x \neq 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{xx} \cdot X^2 + F_x \cdot X = 1 \\ F_{xx} \cdot X'^2 - F_x \cdot X' = 1 \end{array} \right.$$

Cuyas raíces son:

$$F_{xx} = \frac{1}{X \cdot X'} \quad F_x = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'}$$

Si $\sigma_y \neq 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{yy} \cdot Y^2 + F_y \cdot Y = 1 \\ F_{yy} \cdot Y'^2 - F_y \cdot Y' = 1 \end{array} \right.$$

Cuyas raíces son:

$$F_{yy} = \frac{1}{Y \cdot Y'} \quad F_y = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'}$$

Si $\sigma_s \neq 0$:

$$F_{ss} = \frac{1}{S^2}$$

Con lo cual resulta la expresión siguiente:

$$\boxed{\frac{\sigma_x^2}{X \cdot X'} + \frac{2 \cdot F_{xy}^* \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}{\sqrt{X \cdot X' \cdot Y \cdot Y'}} + \frac{\sigma_y^2}{Y \cdot Y'} + \frac{\sigma_s^2}{S^2} + \left[\frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \right] \cdot \sigma_x + \left[\frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \right] \cdot \sigma_y = 1}$$

En la cual:

$X = \text{Límite de tensión a tracción}$

$X' = \text{Límite de tensión a compresión}$

$Y = \text{Límite de tensión a tracción 2}$

$Y' = \text{Límite de tensión a compresión 2}$

$S = \text{Límite de esfuerzo cortante}$

Todos los mencionados parámetros pueden ser calculados mediante ensayos uniaxiales de tensión, ensayos uniaxiales de compresión y ensayos de cizalladura pura. Para la resolución del problema es necesario conocer el sexto parámetro independiente que es el *término de interacción*. Este debe determinarse mediante un ensayo de esfuerzo combinado, pero dada la complejidad de dichos ensayos se asignan valores empíricos al término de interacción.

El Criterio de fallo de Tsai Wu es de los más utilizados en el cálculo de fallo de materiales compuestos dada su simplicidad. Existen formulaciones más generales, pero cuanto más general es la formulación, es necesario conocer el valor de un mayor número de constantes.

Anexo VII. Proceso iterativo de diseño

A continuación, se describe cómo, mediante la simulación de los ensayos descritos, se corrige el diseño de la geometría del cuadro, añadiendo mayor número de capas de braiding de fibra de carbono en las zonas en que es necesario.

La geometría final del cuadro se obtiene como resultado de un proceso de iteración en el cual se ha evaluado el comportamiento de este frente a los ensayos cumpliendo con dos hipótesis:

- Verificar el **cumplimiento de los requisitos impuestos en la normativa española vigente** (*Norma UNE-EN ISO 4210*). Además de comprobar los requisitos en desplazamiento impuesto por la normativa, se comprueba el comportamiento de los materiales que componen el cuadro; atendiendo al criterio de Von Mises en el caso del acero y al criterio de fallo de Tsai Wu en el caso del braiding de fibra de carbono.
- Tratar de **optimizar la cantidad de material** empleada, tratando de evitar un elevado peso del cuadro que actuaría negativamente sobre la aerodinámica de la bicicleta.

En primer lugar, se modifica la geometría inicial iterando, mediante sucesivas simulaciones, atendiendo a los requisitos impuestos por la normativa española vigente. Se parte del **diseño inicial** expuesto realizado con **dos capas de braiding de fibra de carbono**.

VII.I. Cumplimiento de la normativa

Para ello, se comienza evaluando los resultados obtenidos con la geometría inicial frente al ensayo 1.

1. Ensayo 1: Ensayo de choque: Caída de una masa

Con las condiciones de contorno descritas previamente se evalúa el comportamiento de la geometría propuesta. En primer lugar, se comprueba si los desplazamientos producidos por el ensayo cumplen con los requisitos impuestos en la normativa. Es decir, se comprueba que el valor de deformación permanente es menor a 10 milímetros [*Figura 61*].

$$U_1 = 0,5488 \text{ mm} < U_{\max} = 10 \text{ mm}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sun Nov 14 12:24:01 Hora estándar romance 2021

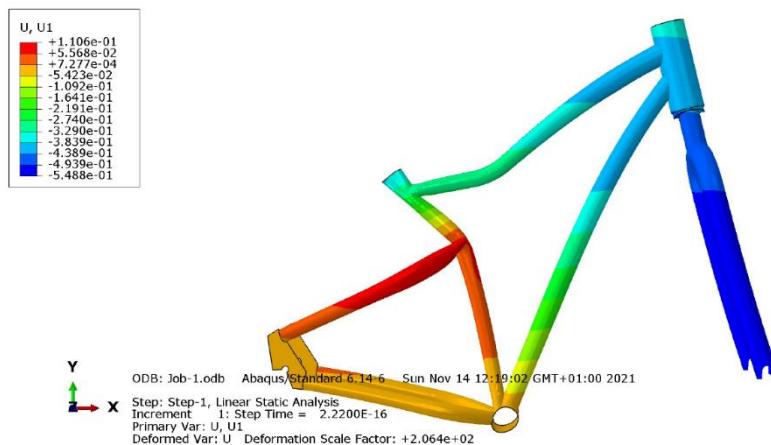


Figura 61. Desplazamientos en dirección X, en mm, Abaqus.

A continuación, se comprueba que las tensiones permitan el comportamiento del acero en su régimen elástico. Se observa como la tensión máxima de Von Mises es menor al límite elástico [Figura 62] [30] [27].

$$\text{Acero: } \sigma_{VM,AC} = 11,78 \text{ MPa} < \sigma_{y,AC} = 400 \text{ MPa}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Nov 18 20:06:28 Hora estándar romance 2021



Figura 62. Distribución de tensiones de Von Mises acero, en MPa, Abaqus.

Por último, se comprueba que el braiding de fibra de carbono trabaja bajo un coeficiente mínimo de seguridad de 2 bajo el criterio de fallo de Tsai Wu [Figura 63].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 0,1189 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{0,1189} = 8,41$$

$$CS_{MÍN} = 8,41 > CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Thu Nov 18 20:17:31 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

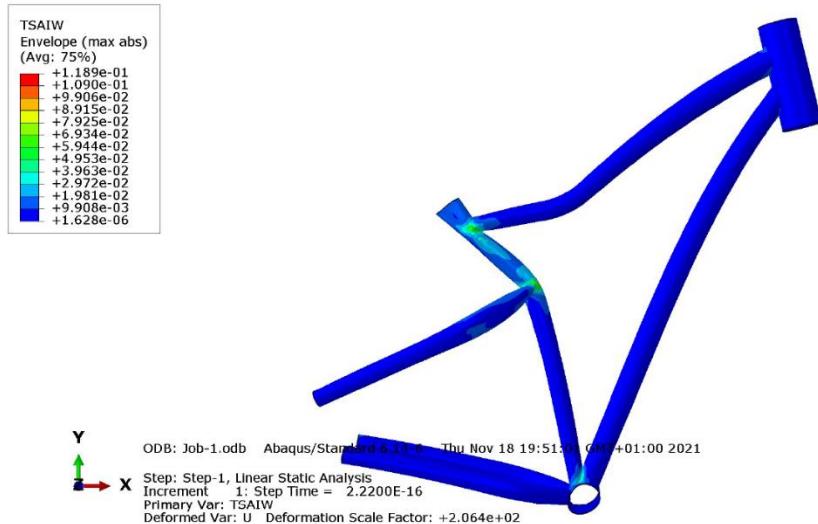


Figura 63. Criterio de fallo de Tsai Wu, Abaqus.

Se comprueba como el diseño inicial cumpliría los requisitos exigidos por la normativa bajo el ensayo 1.

2. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro

A continuación, se comprueba si el cuadro se encuentra bajo los requisitos impuestos por el ensayo 2 de la normativa española. De igual modo, se comienza comprobando los requisitos impuestos para la deformación permanente.

En primer lugar, se colocan las tres masas sobre las zonas indicadas en la norma y se evalúa el efecto de estas sobre el cuadro. Tras ello, se comprueba si los desplazamientos producidos por el ensayo cumplen con los requisitos impuestos en la normativa. Es decir, se comprueba que la variación de la distancia entre ejes es menor a 60 milímetros. Para ello, se realiza la medición de

la distancia mediante *Tools/Query/Distance* en los resultados obtenidos en desplazamiento para cada uno de los Steps [Figura 64-67].

$$\Delta d = d_{Step2} - d_{Step1} < \Delta d_{máx} = 60 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 1.102,60 - 1.098,75 = 3,85 \text{ mm} < \Delta d_{máx} = 60 \text{ mm}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sun Nov 14 13:25:06 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

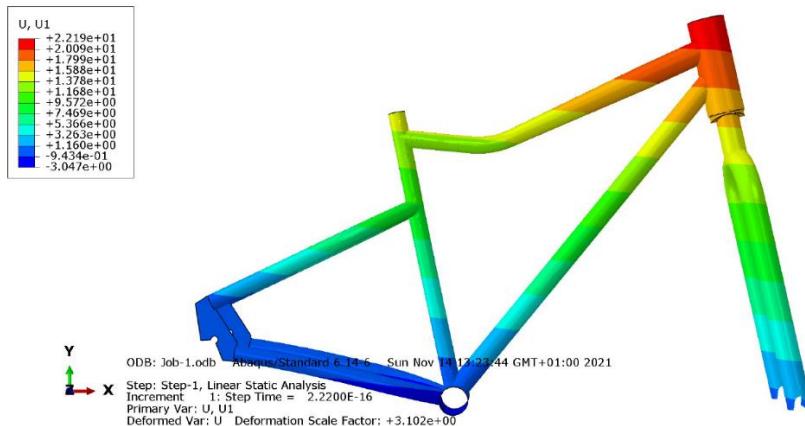


Figura 64. Distribución de desplazamientos en X, Step 1, en mm, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Sun Nov 14 17:58:02 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA



Figura 65. Distribución de desplazamientos en X, Step 2, en mm, Abaqus.

A continuación, se comprueba que el acero trabaja en su régimen elástico mediante la observación de la distribución de tensiones de Von Mises. En este caso, se comprueban únicamente en el Step 2, dado que está sometido a mayores solicitudes [Figura 66].

$$\text{Acero: } \sigma_{VM,AC} = 398,1 \text{ MPa} < \sigma_{y,AC} = 400 \text{ MPa}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 10:33:20 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA



Figura 66. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, acero, en MPa, Abaqus.

Además, se comprueba como los mayores valores de tensión de Von Mises obtenidos aparecen en zonas que actúan como concentradores de tensiones dadas las condiciones impuestas para el contacto [Figura 67].

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 10:41:49 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

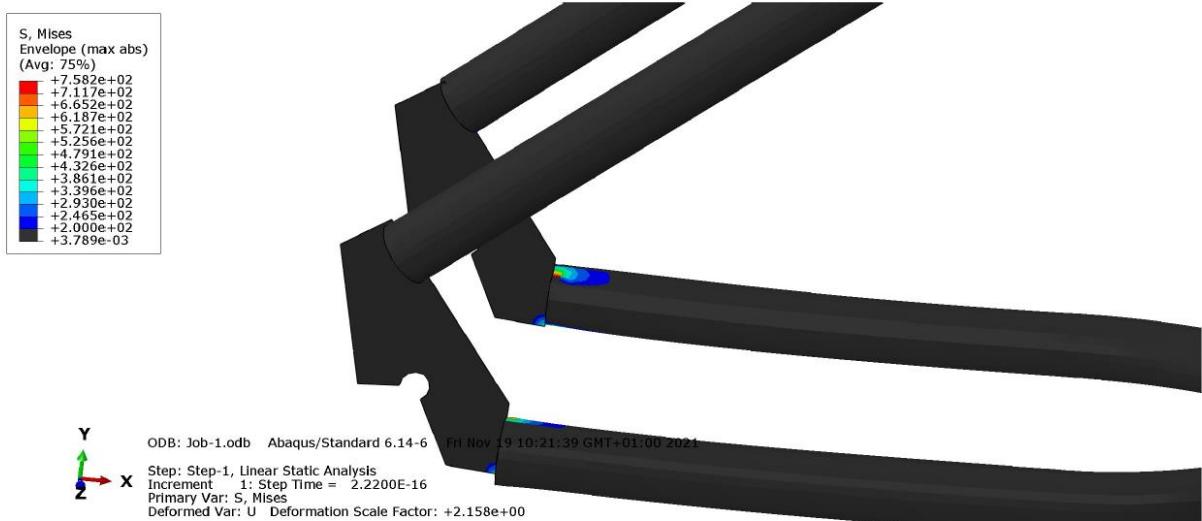


Figura 67. Zona de concentración de tensiones de Von Mises, Step 2, en MPa, Abaqus.

Por último, se comprueba que el braiding de fibra de carbono trabaja bajo un coeficiente mínimo de seguridad de 2 bajo el criterio de fallo de Tsai Wu. De igual modo que con las tensiones, se comprobará el Step 2 por estar sometido a condiciones más restrictivas [Figura 68-69].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 2,918 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{2,918} = 0,34$$

$$CS_{MÍN} = 0,34 \ll CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 12:59:30 Hora estándar romance 2021

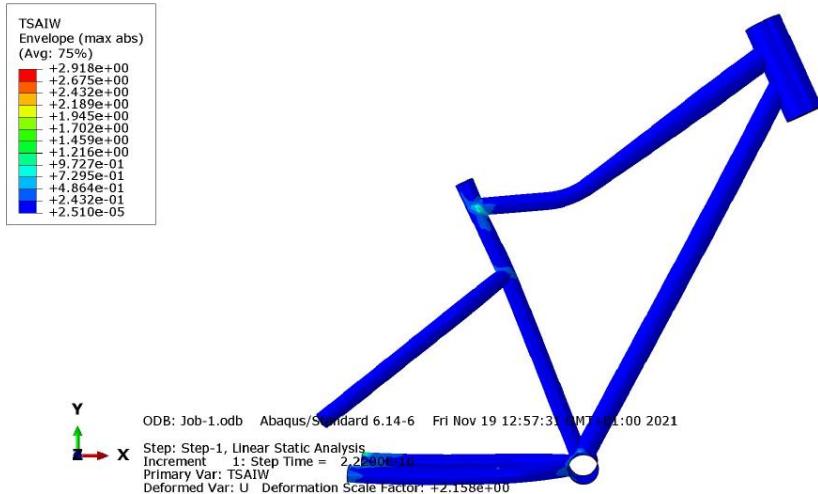


Figura 68. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 10:56:06 Hora estándar romance 2021

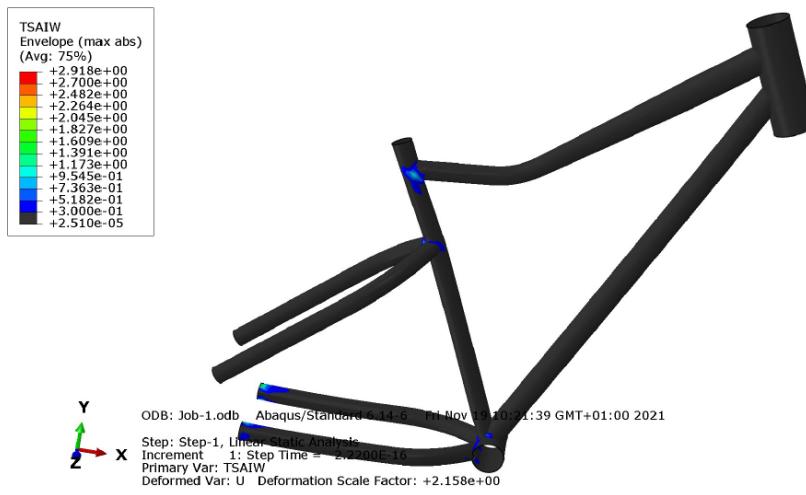


Figura 69. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,3), Step 2, Abaqus.

Se comprueba como el material compuesto experimentaría fallo bajo el criterio de Tsai Wu y como el coeficiente de seguridad no alcanzaría ni siquiera la unidad. Por ello, se estudian las zonas en que esto ocurre y se refuerzan con una capa adicional de fibra de carbono.

Se añade una capa adicional de fibra de carbono en las zonas con mayores solicitudes (indicadas en color naranja) [Figura 70].

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 11:10:24 Hora estándar romance 2021

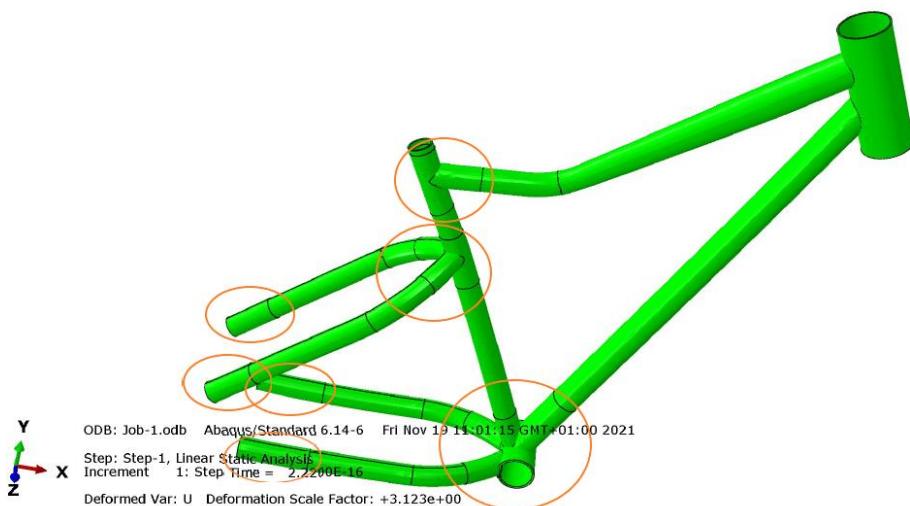


Figura 70. Zonas en que se ubican los refuerzos, Abaqus.

Como el problema se encuentra en el ensayo de caída de cuadro, será el que se evalúe en primer lugar con la nueva geometría.

3. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 1 capa

Se comienza comprobando el criterio de fallo, dado que es el problema del diseño inicial. Para ello, se comprueba que el braiding de fibra de carbono trabaja bajo un coeficiente mínimo de seguridad de 2 bajo el criterio de fallo de Tsai Wu. Se comprueba el Step 2 por estar sometido a condiciones más restrictivas [Figura 71-72].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 1,471 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{1,471} = 0,34$$

$$CS_{MÍN} = 0,68 \ll CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 13:02:36 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA



Figura 71. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 13:03:10 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

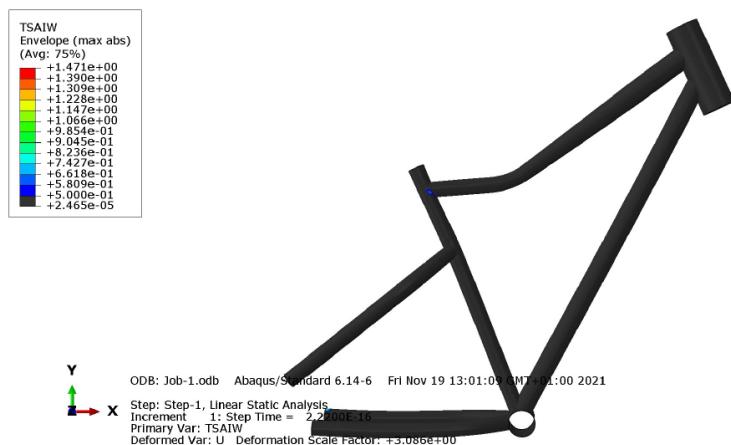


Figura 72. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.

Se comprueba como con los refuerzos aumenta el coeficiente de seguridad bajo el criterio de fallo de Tsai Wu pero no se alcanza el coeficiente de seguridad objetivo de 2, con lo cual se evalúan de nuevo las zonas que lo impiden y se añade una capa adicional de fibra de carbono.

4. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 2 capas

Se comienza comprobando el criterio de fallo, dado que es el problema del diseño inicial. Para ello, se comprueba que el braiding de fibra de carbono trabaja bajo un coeficiente mínimo de seguridad de 2 bajo el criterio de fallo de Tsai Wu. Se comprueba el Step 2 por estar sometido a condiciones más restrictivas [Figura 73-74].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 1,2 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{1,2} = 0,833$$

$$CS_{MÍN} = 0,833 \ll CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 13:08:19 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

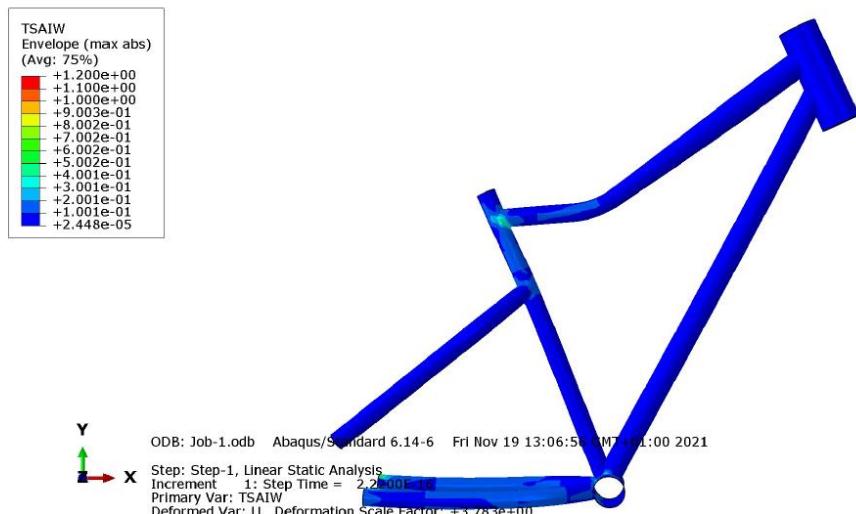


Figura 73. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 13:09:17 Hora estándar romance 2021

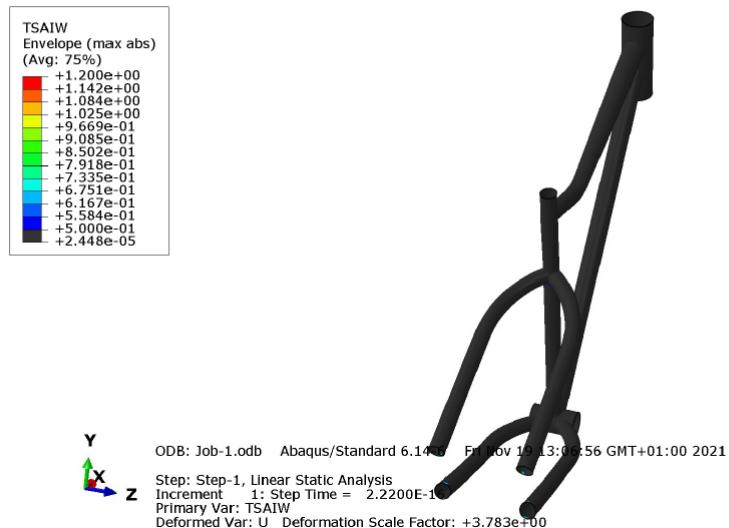


Figura 74. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.

Se observa como el aumento del número de capas de fibra de carbono en los refuerzos pertinentes aumenta el coeficiente de seguridad, pero todavía no alcanzan el valor deseado, por lo que se añade una tercera capa de refuerzo en las zonas en que es necesario.

Se observa como las zonas que todavía no alcanzan el coeficiente de seguridad de 2 se ubican en las 4 vainas que confluyen al eje de la rueda trasera y en la unión de las dos vainas superiores con el tubo donde se inserta la tija del sillín, por lo que serán las zonas por reforzar con una capa adicional.

5. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 3 capas

De igual manera que en los casos anteriores, se comprueba el comportamiento del material compuesto en el Step 2 bajo el criterio de fallo de Tsai Wu [Figura 75-76].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 1,019 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{1,019} = 0,98$$

$$CS_{MÍN} = 0,98 \ll CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 13:14:32 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

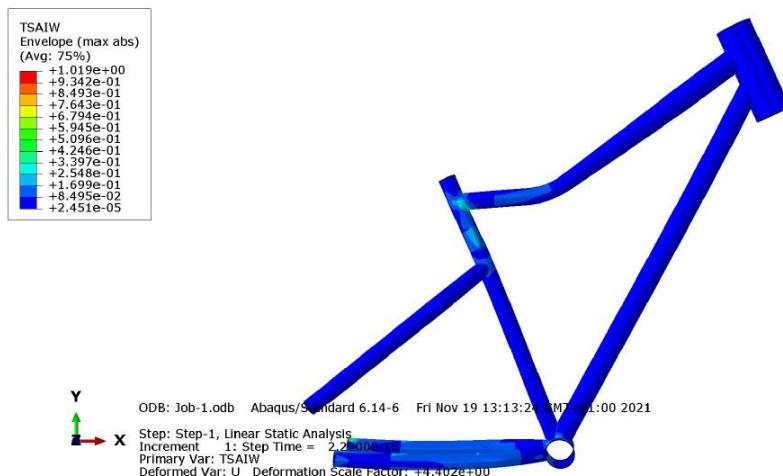


Figura 75. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 13:15:17 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

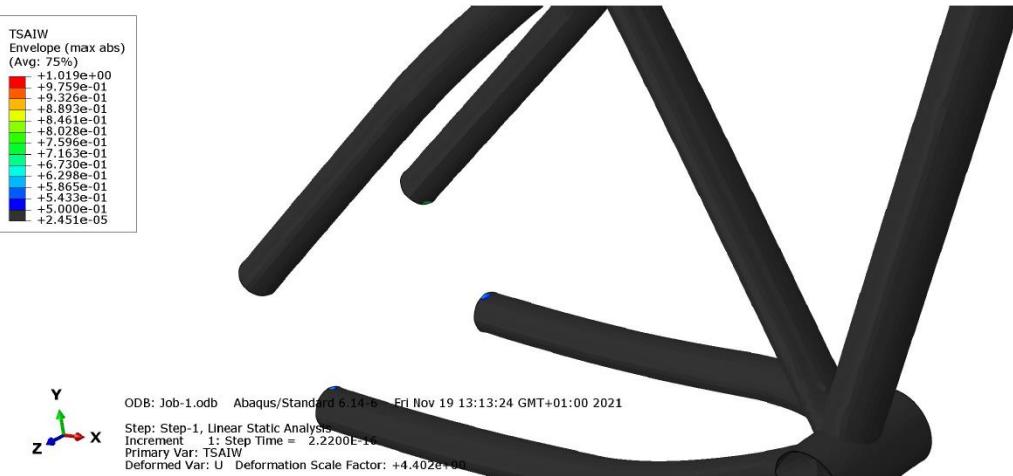


Figura 76. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.

En este caso el incumplimiento del coeficiente de seguridad de 2 se produce **únicamente en los extremos finales de las vainas** que van al eje de la rueda trasera. Se puede comprobar cómo, de eliminar esa parte de la geometría, el material se comportaría de forma adecuada con un coeficiente de seguridad de 2 bajo el criterio de fallo de Tsai Wu [Figura 77].

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 13:15:55 Hora estándar romance 2021

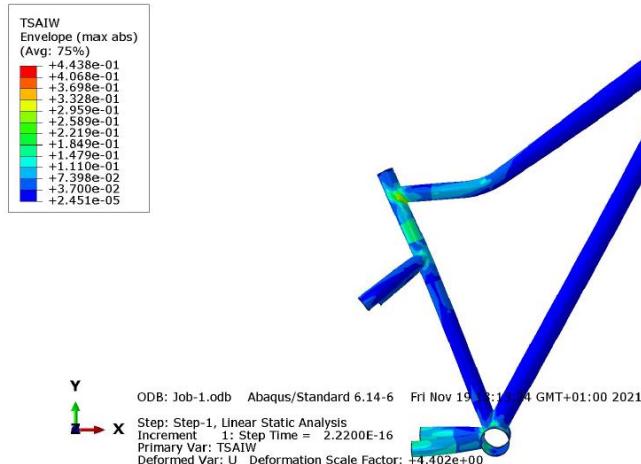


Figura 77. Criterio de fallo de Tsai Wu (zonas con valores menores a 0,5), Step 2, Abaqus.

Observando en detalle las zonas donde se produce el incumplimiento de las condiciones impuestas, se observa como están muy localizadas [Figura 78]. En base a ello, se puede concluir como dicha concentración se produce de forma matemática, a causa de las condiciones de contorno escogidas para modelar el problema.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 16:20:02 Hora estándar romance 2021

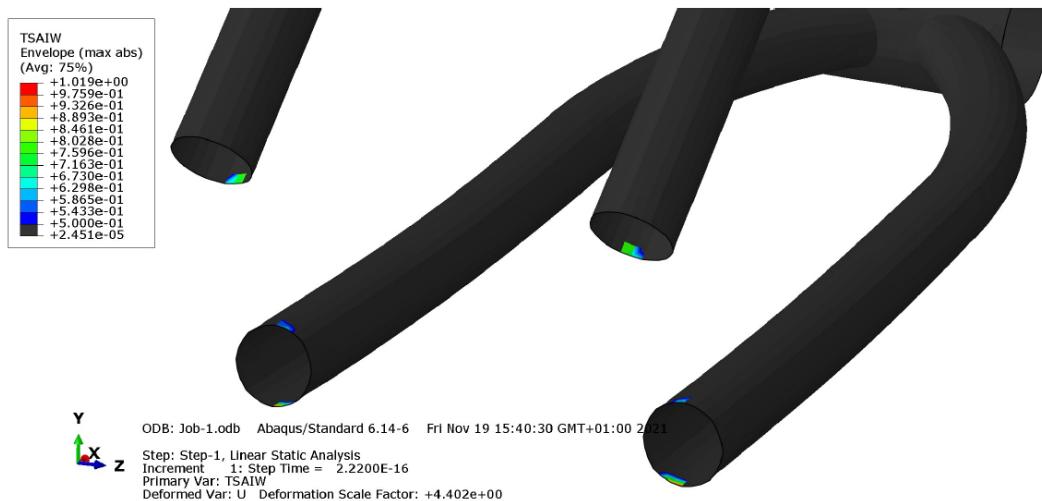


Figura 78. Zonas que incumplen el criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.

Por tanto, se considera que este modelo sería apto bajo el criterio de fallo de Tsai Wu con un coeficiente de seguridad de 2, dado que eliminando dichas zonas se concluye el coeficiente siguiente:

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 0,4438 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{0,4438} = 2,253$$

$$CS_{MÍN} = 2,253 > CS = 2$$

De cara a solventar las concentraciones que puedan aparecer en dichos puntos se propone una modificación de las placas de acero en que se acopla el eje de la rueda trasera que incluye un refuerzo para los extremos finales de las vainas. Con ello, se aporta un refuerzo adicional a la zona [Figura 79-80].



Figura 79. Vistas de los refuerzos propuestos, ANSYS v19.2.

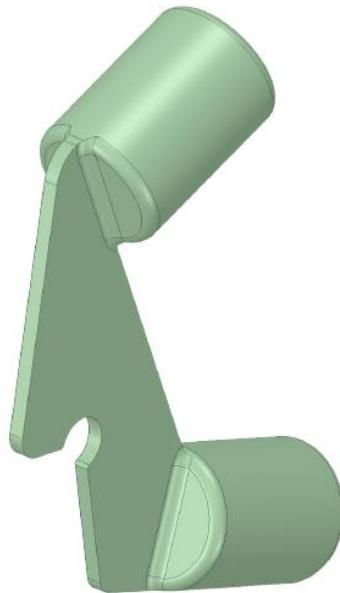


Figura 80. Vista isométrica de los refuerzos propuestos, ANSYS v19.2.

A continuación, se evalúa la validez completa del diseño final con 3 capas de refuerzo en las zonas críticas bajo la normativa española vigente.

Se comienza evaluando los requisitos necesarios bajo el ensayo 2 de choque: caída de cuadro.

Se comprueba que la variación de la distancia entre ejes es menor a 60 milímetros. Para ello, se realiza la medición de la distancia mediante *Tools/Query/Distance* en los resultados obtenidos en desplazamiento para cada uno de los Steps [Figura 81-82].

$$\Delta d = d_{Step2} - d_{Step1} < \Delta d_{máx} = 60 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 1.108,11 - 1.100,35 = 7,76 \text{ mm} < \Delta d_{máx} = 60 \text{ mm}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 17:24:00 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

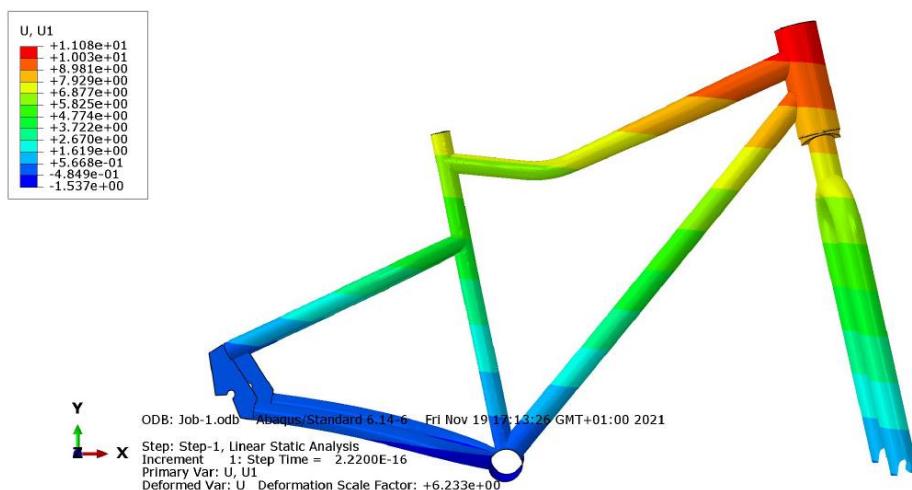


Figura 81. Distribución de desplazamientos en X, Step 1, en mm, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 17:27:34 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

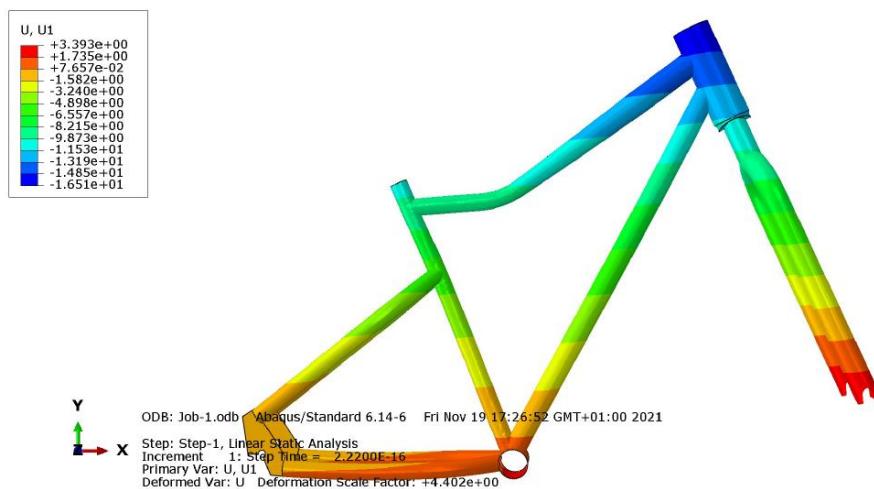


Figura 82. Distribución de desplazamientos en X, Step 2, en mm, Abaqus.

Tras ello, se estudia la distribución de las tensiones de Von Mises para comprobar el acero trabaja en su régimen elástico. Se comprueban únicamente en el Step 2, dado que está sometido a mayores solicitudes [Figura 83].

$$\text{Acero: } \sigma_{VM,AC} = 277,6 \text{ MPa} < \sigma_{y,AC} = 400 \text{ MPa}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 17:31:37 Hora estándar romance 2021



Figura 83. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, acero, en MPa, Abaqus.

6. Ensayo 1: Ensayo de choque: Caída de una masa. Refuerzos de 3 capas

Se parte de comprobar si los desplazamientos producidos por el ensayo cumplen con los requisitos impuestos en la normativa. Es decir, se comprueba que el valor de deformación permanente es menor a 10 milímetros [Figura 84].

$$U_1 = 0,3554 \text{ mm} < U_{\text{máx}} = 10 \text{ mm}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 16:54:01 Hora estándar romance 2021

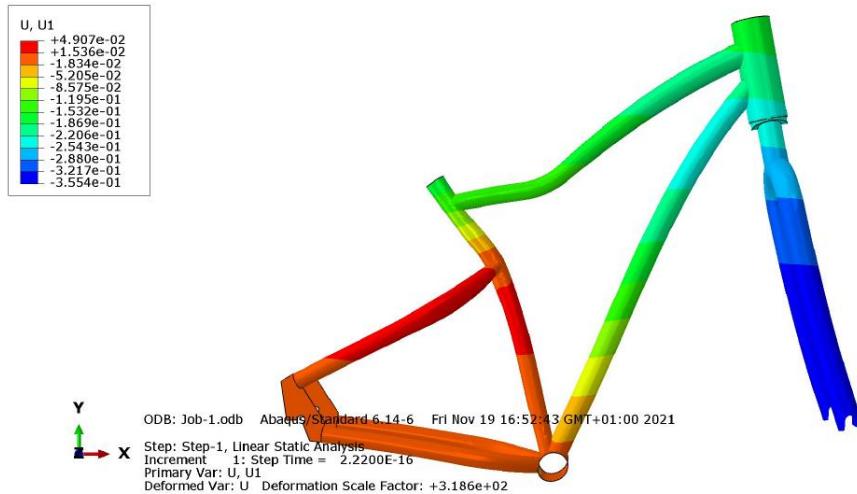


Figura 84. Desplazamientos en dirección X, en mm, Abaqus.

Tras ello, se procede a comprobar el comportamiento del acero en su régimen elástico evaluando la distribución de tensiones de Von Mises. Se comprueba como el valor de la tensión máxima no supera el límite elástico [Figura 85].

$$\text{Acero: } \sigma_{VM,AC} = 9,595 \text{ MPa} < \sigma_{y,AC} = 400 \text{ MPa}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 16:59:03 Hora estándar romance 2021



Figura 85. Distribución de tensiones de Von Mises acero, en MPa, Abaqus.

Finalmente se comprueba el coeficiente de seguridad del material compuesto frente al criterio de fallo de Tsai Wu bajo este ensayo [Figura 86].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 0,04756 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{0,04756} = 21,026$$

$$CS_{MÍN} = 21,026 \gg CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Fri Nov 19 17:06:21 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

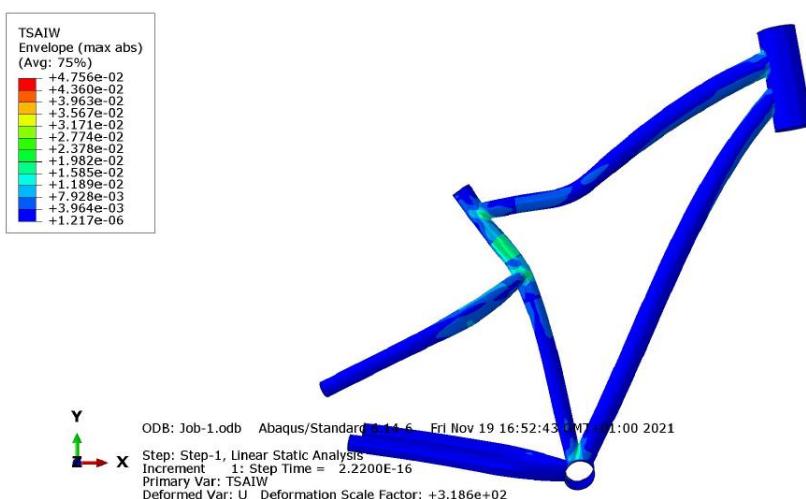


Figura 86. Criterio de fallo de Tsai Wu, Abaqus.

VII.II. Optimización de la cantidad de material

Tras haber obtenido un diseño adecuado que cumple con los requisitos impuestos por la normativa española vigente y que responde con un coeficiente de seguridad adecuado al criterio de fallo impuesto para el material compuesto (Tsai Wu), se fija el foco en uno de los aspectos más relevantes en el diseño de un cuadro de bicicleta: *el peso*.

Se toma el diseño resultado del proceso iterativo de diseño anterior y mediante Abaqus Tools/Query/Mass properties se conoce su peso de 2657,05 gramos, es decir, 2,657 kg.

A continuación, se realiza un proceso iterativo similar al anterior teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la etapa anterior y ajustando las zonas de los refuerzos para tratar de obtener un peso menor que favorezca la aerodinámica del cuadro.

7. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 1 capa

Se comienza evaluando el comportamiento del diseño inicial con 1 capa de refuerzo bajo el ensayo 2, dado que en dicho ensayo se somete a mayores solicitudes. En este caso los refuerzos a añadir se ajustan con mayor precisión a los límites de las zonas que incumplen el criterio de fallo de Tsai Wu [Figura 87].



Figura 87. Comparación de los refuerzos, anterior arriba, actual abajo, Abaqus.

En primer lugar, se evalúa el comportamiento del material compuesto bajo el criterio de fallo de Tsai Wu. Se comprueba el Step 2 por estar sometido a condiciones más restrictivas [Figura 88-89].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 2,275 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{2,275} = 0,44$$

$$CS_{MÍN} = 0,44 \ll CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 10:53:27 Hora estándar romance 2021

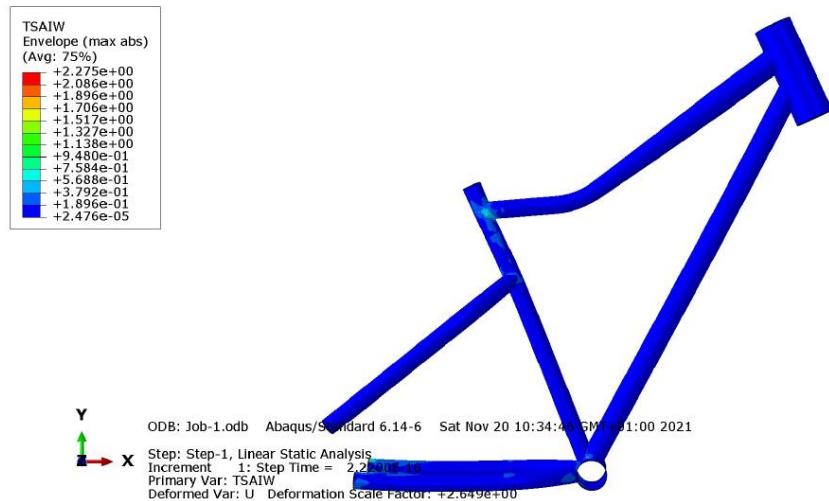


Figura 88. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 10:54:12 Hora estándar romance 2021

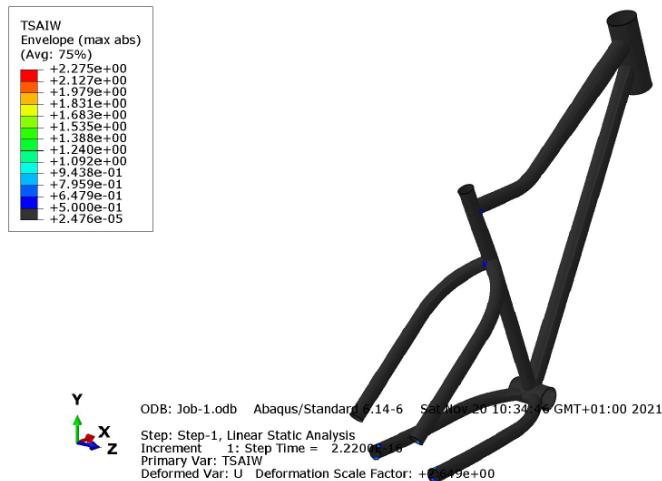


Figura 89. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.

Se observa un aumento considerable respecto al coeficiente de seguridad obtenido sin refuerzos (CS = 8,41) pero no cumple las especificaciones buscadas, por lo que se añade otra capa adicional en los refuerzos locales.

8. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 2 capas

Se procede de igual modo que en el caso anterior y se evalúa el criterio de fallo de Tsai Wu en el Step 2 del segundo ensayo cuando los refuerzos locales cuentan con dos capas adicionales de fibra de carbono [Figura 90-91].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 1,802 \rightarrow CS_{MÍN} = 1,802 = 0,555$$

$$CS_{MÍN} = 0,555 \ll CS = 2$$

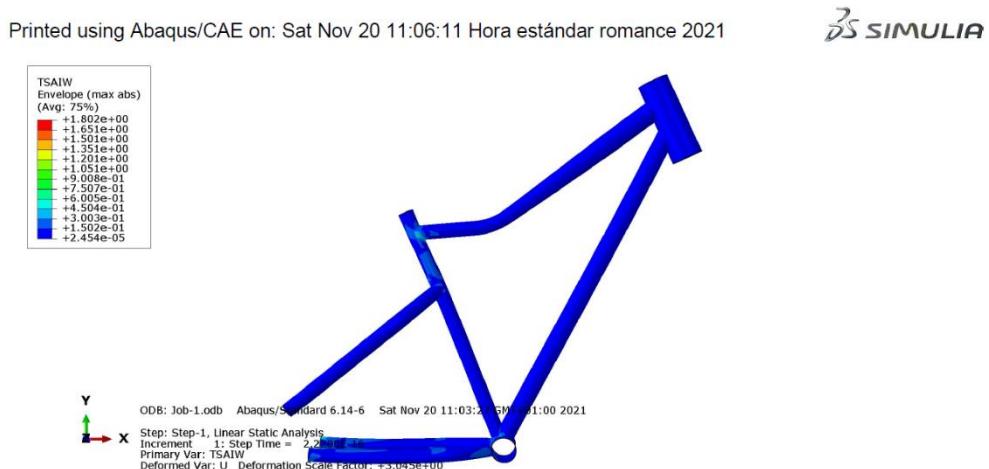


Figura 90. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.



Figura 91. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,4), Step 2, Abaqus.

Se hace notable la necesidad de una tercera capa en los refuerzos locales para reforzar las zonas que incumplen los requisitos buscados. Pese a ello, las zonas críticas (excluyendo las vainas que van al eje de la rueda trasera), se encuentran próximas al coeficiente de seguridad objetivo. El máximo excluyendo las vainas es de 0,6107 [Figura 92].

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 11:16:43 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA



Figura 92. Criterio de fallo Tsai Wu (mayores a 0,4 excluyendo vainas), Step 2, Abaqus.

9. Ensayo 2: Ensayo de choque: Caída de cuadro. Refuerzos de 3 capas

Se comienza por la comprobación del criterio de fallo de Tsai Wu del material compuesto. Se realiza la comprobación del comportamiento del material compuesto en el Step 2 dado que se somete a mayores solicitudes [Figura 93-94].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 1,539 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{1,539} = 0,649$$

$$CS_{MÍN} = 0,649 \ll CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 12:22:51 Hora estándar romance 2021



Figura 93. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 12:23:56 Hora estándar romance 2021

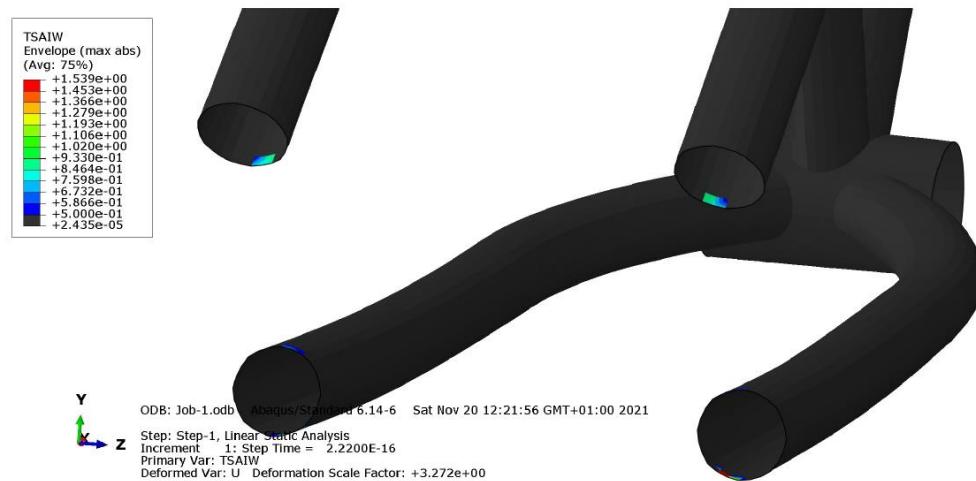


Figura 94. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.

De nuevo se comprueba cómo, alcanzado este número de capas en los refuerzos el incumplimiento del coeficiente de seguridad de 2 se produce **únicamente en los extremos finales de las vainas** que van al eje de la rueda trasera. Por ello, se evalúa el comportamiento del cuadro excluyéndolas, dado que se trata de concentraciones matemáticas y, además, dichas zonas serán reforzadas con los refuerzos propuestos para la colocación de las placas de acero. Se evalúa por tanto el coeficiente de seguridad bajo el criterio de fallo de Tsai Wu excluyendo las vainas [Figura 95].

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 12:24:37 Hora estándar romance 2021

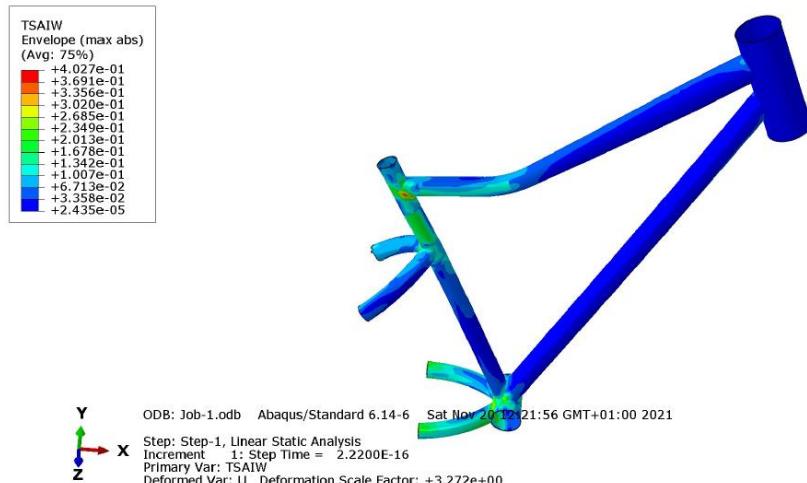


Figura 95. Criterio de fallo de Tsai Wu excluyendo vainas, Step 2, Abaqus.

Por tanto, se considera que este modelo sería apto bajo el criterio de fallo de Tsai Wu con un coeficiente de seguridad de 2, dado que eliminando dichas zonas se concluye el coeficiente siguiente:

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 0,4027 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{0,4027} = 2,483$$

$$CS_{MÍN} = 2,483 > CS = 2$$

Tras verificar el cumplimiento del coeficiente de seguridad objetivo bajo el criterio de fallo impuesto, se comprueba que el modelo cumple con los requisitos impuestos por la normativa española vigente.

Se comienza evaluando los requisitos necesarios bajo el ensayo 2 de choque: caída de cuadro.

Se verifica que la variación de la distancia entre ejes es menor a 60 milímetros. Para ello, se realiza la medición de la distancia mediante *Tools/Query/Distance* en los resultados obtenidos en desplazamiento para cada uno de los Steps [Figura 96-97].

$$\Delta d = d_{Step2} - d_{Step1} < \Delta d_{máx} = 60 \text{ mm}$$

$$\Delta d = 1.104,76 - 1.099,57 = 5,19 \text{ mm} < \Delta d_{máx} = 60 \text{ mm}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 12:46:49 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

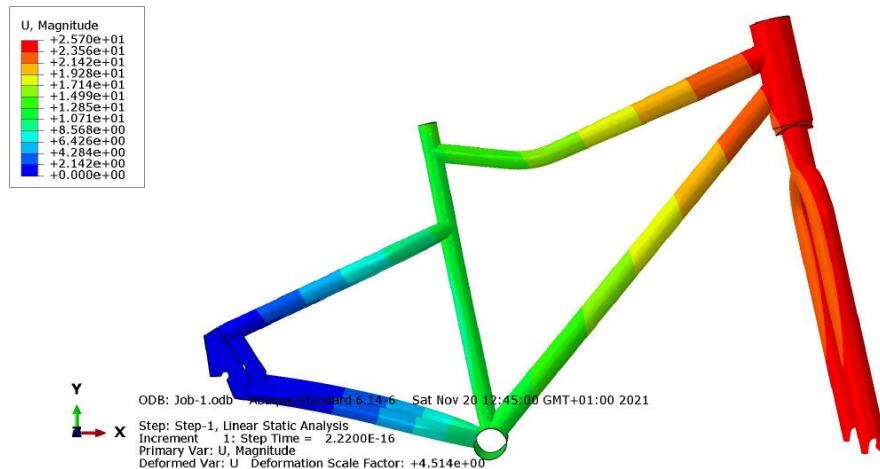


Figura 96. Distribución de desplazamientos en X, Step 1, en mm, Abaqus.

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 12:43:11 Hora estándar romance 2021

 SIMULIA

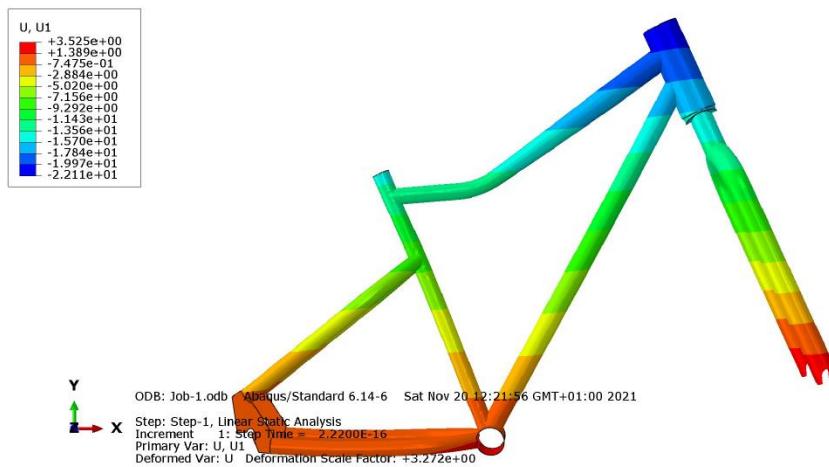


Figura 97. Distribución de desplazamientos en X, Step 2, en mm, Abaqus.

A continuación, se evalúa el comportamiento del acero y se comprueba que actúa en su régimen elástico, para ello, se observa la distribución de las tensiones de Von Mises. Se estudian en el Step 2, dado que está sometido a mayores solicitudes [Figura 98].

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 12:59:49 Hora estándar romance 2021

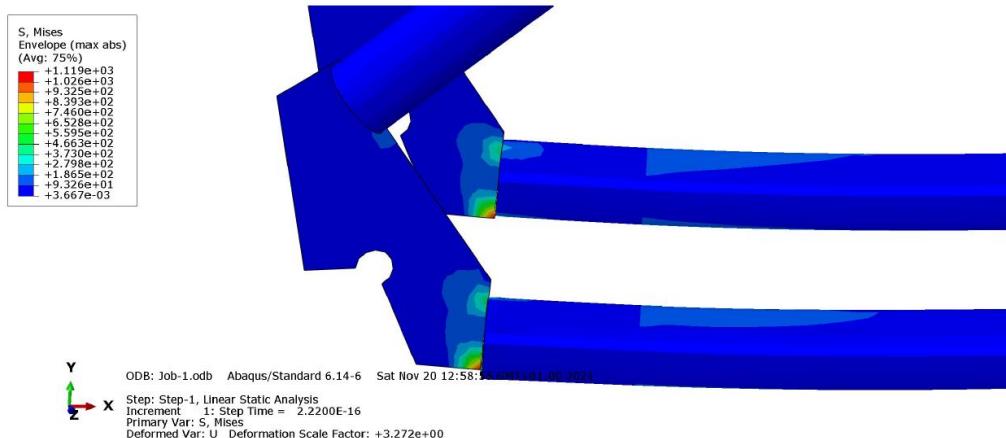


Figura 98. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, en MPa, Abaqus.

Se encuentra como la tensión máxima presente en la distribución de tensiones de Von Mises es de 1.119 MPa en el acero, lo que significaría que el material trabaja en régimen plástico; pero se analiza en mayor profundidad.

Prestando atención a los puntos exactos donde dichos valores aparecen, se observa cómo son consecuencia del tipo de contacto impuesto entre las placas de acero y los tubos del cuadro. Dado que, además, las tensiones en dicho punto disminuyen de forma brusca al aumentar el grosor de las placas de acero (aumento de la superficie de contacto).

Dicho problema, se solventaría con el uso de los refuerzos propuestos para el acople de las placas de acero, dado que realizaría la unión mediante una transición más suave y aumentaría considerablemente la superficie de contacto lo cual disminuiría las tensiones derivadas de tal efecto. Por ello, se procede a evaluar la distribución de tensiones de Von Mises sin considerar dichas piezas [Figura 99].

$$\text{Acero: } \sigma_{VM,AC} = 25,30 \text{ MPa} < \sigma_{y,AC} = 400 \text{ MPa}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Mon Nov 22 12:31:43 Hora estándar romance 2021

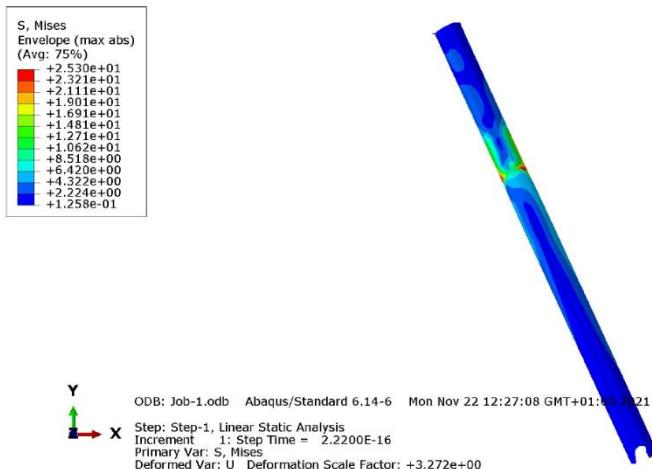


Figura 99. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, acero, en MPa, Abaqus.

10. Ensayo 1: Ensayo de choque: Caída de una masa. Refuerzos de 3 capas

A continuación, se procede a comprobar el cumplimiento de los requisitos en desplazamiento impuestos por la normativa vigente. Se comprueba que en el ensayo 1 el desplazamiento experimentado sea menor a 10 mm [Figura 100].

$$U_1 = 0,3893 \text{ mm} < U_{\max} = 10 \text{ mm}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 13:23:52 Hora estándar romance 2021

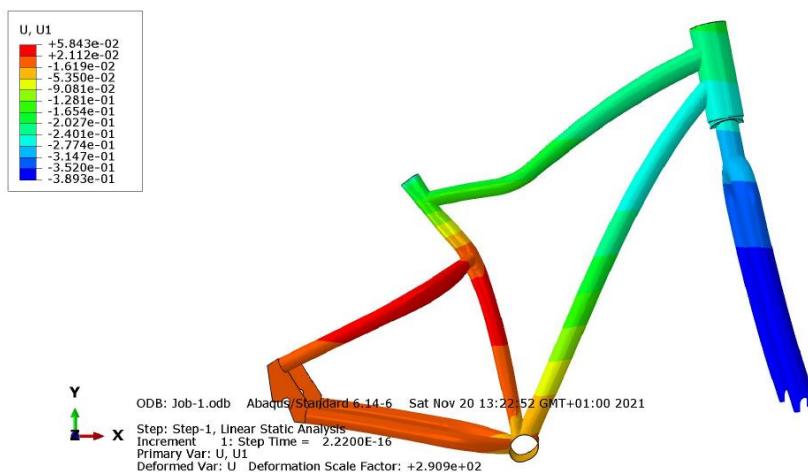


Figura 100. Desplazamientos en dirección X, en mm, Abaqus.

Atendiendo a la distribución de tensiones de Von Mises, se observa como el acero trabaja en su régimen elástico [Figura 101].

$$\text{Acero: } \sigma_{VM,AC} = 11,55 \text{ MPa} < \sigma_{y,AC} = 400 \text{ MPa}$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 13:28:25 Hora estándar romance 2021

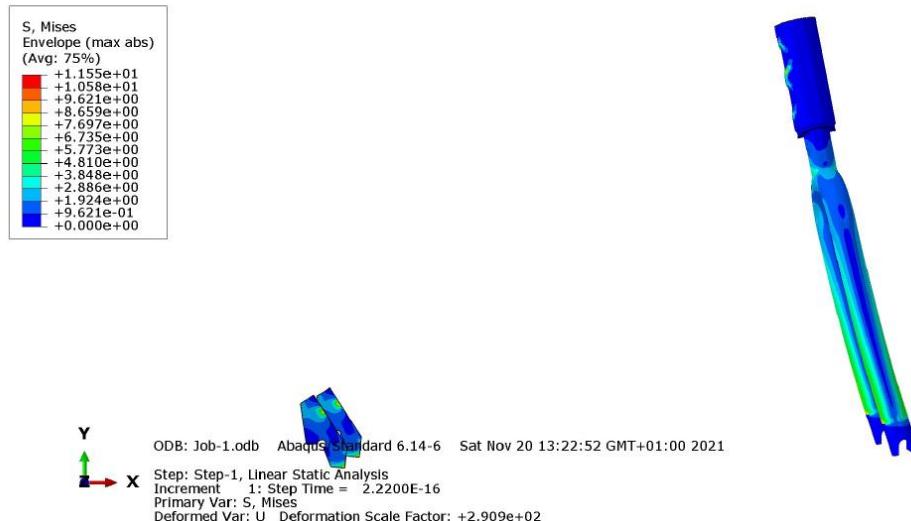


Figura 101. Distribución de tensiones de Von Mises acero, en MPa, Abaqus.

Finalmente se comprueba el coeficiente de seguridad del material compuesto frente al criterio de fallo de Tsai Wu bajo este ensayo [Figura 102].

$$TSAIW_{MÁX} \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{TSAIW_{MÁX}}$$

$$TSAIW_{MÁX} = 0,05147 \rightarrow CS_{MÍN} = \frac{1}{0,05147} = 19,43$$

$$CS_{MÍN} = 19,43 \gg CS = 2$$

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Nov 20 13:39:35 Hora estándar romance 2021

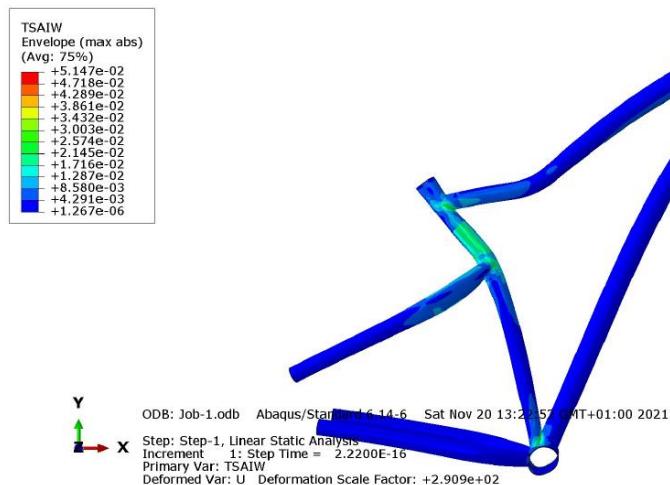


Figura 102. Criterio de fallo de Tsai Wu, Abaqus.

Finalmente se evalúa el efecto obtenido sobre el peso con el ajuste de los refuerzos a zonas más locales [Tabla 4].

Tabla 4. Comparativa de los pesos de los modelos evaluados.

Comparativa de los pesos en kg			
BASE	Refuerzos +1 capa	Refuerzos +2 capas	Refuerzos +3 capas
2,115	2,303	2,490	2,657
1,697	1,763	1,824	1,878

Se observa cómo, gracias a una ubicación más local de los refuerzos, se ha conseguido disminuir el peso en 0,779 kg, lo cual, constituye una mejoría notable sobre las características generales del cuadro gracias a la optimización de su peso.

Bibliografía

- [1] "Cómo Elegir la Bicicleta Correcta." <https://www.bikeexchange.com.co/blog/eligiendo-la-bicicleta-correcta> (accessed May 10, 2021).
- [2] "Ciclomotor y gravel: todo lo que necesitas saber para diferenciarlas." <https://www.sanferbike.com/videostv/diferencias-ciclomotor-y-gravel-todo-lo-que-necesitas-saber/> (accessed May 10, 2021).
- [3] "¿Qué es una bicicleta tandem? - la bicikleta." <https://labicikleta.com/que-es-una-bicicleta-tandem/> (accessed May 10, 2021).
- [4] A. A. Diferenciarlas and T. Y. M. De, "Tipos y medidas de direcciones de bicicleta," pp. 1–13, 2021.
- [5] "El juego de dirección: sistemas y estándares | NO SIN MI BICI." <https://nosinmibici.com/2016/07/22/el-juego-de-direccion-sistemas-y-estandares/> (accessed Sep. 03, 2021).
- [6] "JUEGO DIRECCIÓN 1"1/8 SEMIINTEGRADO ZS44/28.6 ZS44/30 NEGRO ROCKRIDER | Decathlon." https://www.decathlon.es/es/p/juego-direccion-1-1-8-semiintegrado-zs44-28-6-zs44-30-negro/_R-p-199346?mc=8523054&_adin=11551547647 (accessed Sep. 03, 2021).
- [7] "Dirección FIRST Semiintegrada 1-1/8" - Bikeshop." <https://www.bikeshop.es/direccion-first-semiintegrada-aa-aa-8/148827.html> (accessed Sep. 03, 2021).
- [8] "sourcing map Liso Metal Plateado Casquillo Buje de 4440 Cojinete Manguito Autolubricante 50mm X 44mm X 40mm : Amazon.es: Coche y moto." https://www.amazon.es/sourcingmap-Plateado-Casquillo-Cojinete-Autolubricante/dp/B00N416QPU/ref=sr_1_12__mk_es_ES=ÅMÅŽÕÑ&dchild=1&keywords=casquillo+44mm&qid=1632932271&qsid=257-8926276-9824141&sr=8-12&sres=B08VNRVPTW%2CB07L6P2NMY%2CB08YZ2S574%2CB095318JY5%2CB096VCG7TR%2CB087Y3TLWJ%2CB07D441P79%2CB09CKTWXGY%2CB08P26L5NL%2CB09C5HJXDH%2CB00N416QPU%2CB07HMWRMTT%2CB075XVGVX2%2CB099584DW9%2CB082DP67BT%2CB096TXPWYQ%2CB096VCMW2Y%2CB096VBJS9%2CB07QF7ZNQP%2CB088NWZJP (accessed Sep. 29, 2021).
- [9] "Tipos de pedalier de bicicleta | NO SIN MI BICI." <https://nosinmibici.com/2016/06/15/tipos-de-pedalier-de-bicicleta/> (accessed Sep. 06, 2021).
- [10] Equipo de Emeb, "Cajas De Pedalier, Tipos Y Medidas. Aprende a Diferenciarlas.,," pp. 1–16, 2015, [Online]. Available: <https://www.emeb.es/cajas-de-pedalier-tipos-y-medidas/>.
- [11] L. A. Rosca, "T47 EL NUEVO STANDARD PARA CAJAS DE PEDALIER . VOLVEMOS A," pp. 1–4, 2021.
- [12] "KCNC BB92 Press Fit Adaptador, negro | Bikester.es." <https://www.bikester.es/kcnc-bb92-press-fit-eje-pedalier-M357822.html?vgid=G401280> (accessed Sep. 06, 2021).
- [13] "Pedalier Pressfit GXP MTB BB92." <https://todobicis.net/ejes-de-pedalier/519-pedalier-sram-pressfit-gxp-mtb-bb92.html> (accessed Sep. 06, 2021).
- [14] "Adaptador para eje de pedalier STRONGLIGHT PF30 > BB86/89/92 - Bikeshop." <https://www.bikeshop.es/kit-adaptador-para-eje-de-pedalier-strONGLIGHT-PF30-BB86-89-92.html>

- <https://www.bikeshop.es/adaptador-para-eje-de-pedalier-stronglight-pf30-bb86-89-92/167889.html> (accessed Sep. 29, 2021).
- [15] “Rueda Bicicleta Polivalente 28" Pulgadas Trasera Doble Pared Negro RIVERSIDE | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/rueda-bicicleta-polivalente-28-pulgadas-trasera-doble-pared-negro/_/R-p-314993?mc=8331674&_adin=02021864894 (accessed Sep. 08, 2021).
- [16] “CUBIERTA TREKKING 1 SPEED ARO RIGIDO 700x38 / ETRTO 38-622 BTWIN | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/cubierta-trekking-1-speed-aro-rigido-700x38-etrto-38-622/_/R-p-192736?mc=8403033&_adin=11551547647 (accessed Sep. 08, 2021).
- [17] “Ejes de rueda, tipos y medidas. ¿Sabes cual lleva montado tu bicicleta?” <https://www.emeb.es/ejes-de-ruedas-tipos-y-medidas/> (accessed Sep. 08, 2021).
- [18] “Eje Pasante Transversal Rueda Trasera Bicicleta Montaña 12 x 148 Boost ROCKRIDER | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/eje-pasante-transversal-rueda-trasera-bicicleta-montana-12-x-148-boost/_/R-p-198655?mc=8512593&_adin=11551547647 (accessed Sep. 29, 2021).
- [19] “Eje Pasante Delantero 15x110MM Bicicleta Montaña Manitou MANITOU | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/eje-pasante-delantero-15x110mm-bicicleta-montana-manitou/_/R-p-203354?mc=8607834&_adin=11551547647 (accessed Sep. 29, 2021).
- [20] “Patilla Cambio Bicicleta MTB RR9 Posterior a 2009 ROCKRIDER | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/patilla-cambio-bicicleta-mtb-rr9-posterior-a-2009/_/R-p-200036?mc=8527894&_adin=11551547647 (accessed Oct. 02, 2021).
- [21] “Tija de Sillín 27.2 mm Bicicleta Negro ROCKRIDER | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/tija-de-sillin-27-2-mm-bicicleta-negro/_/R-p-199272?mc=8522029&_adin=11551547647 (accessed Sep. 03, 2021).
- [22] “Abrazadera Sillín 32 mm Plata ELOPS | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/abrazadera-sillin-32-mm-plata/_/R-p-189895?mc=8400851&_adin=11551547647 (accessed Sep. 08, 2021).
- [23] “TOM shim 25,4 / 27,2 mm plata - Internet-Bikes.” https://www.internet-bikes.com/es/174566-tom-shim-254-272-mm-plata/?gclid=CjwKCAjwndCKBhAkEiwAgSDKQYTLHiHF1X_VPKHnJUBR85kjcl5HyvhU2INWdhi-SnP7flufHy8lgRoCsVgQAvD_BwE (accessed Sep. 29, 2021).
- [24] “Tija sillín bicicleta 25,4 mm diámetro y 300 mm longitud negro BTWIN | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/tija-sillin-bicicleta-25-4-mm-diametro-y-300-mm-longitud-negro/_/R-p-196575?mc=8408360&c=NEGRO&_adin=11551547647 (accessed Sep. 29, 2021).
- [25] “BICICLETA DE TREKKING RIVERSIDE 500 ALUMINIO 28 PULGADAS MONOPLATO 9V RIVERSIDE | Decathlon.” https://www.decathlon.es/es/p/bicicleta-de-trekking-riverside-500-aluminio-28-pulgadas-monoplato-9v/_/R-p-300777?mc=8577822&_adin=11551547647 (accessed Sep. 08, 2021).
- [26] AENOR, “Norma española, UNE-EN ISO 4210. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas.,” 2015.
- [27] “Anexo:Constantes elásticas de diferentes materiales - Wikipedia, la enciclopedia libre.”

- https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constantes_elásticas_de_diferentes_materiales (accessed Nov. 03, 2021).
- [28] L. Osman, "Section 8," *Prairie Schoon.*, vol. 88, no. 4, pp. 38–38, 2014, doi: 10.1353/psg.2014.0135.
- [29] A. Esmeralda Castillo Sebastián Tutor José Luis Pérez Aparicio, "ANÁLISIS DE CRITERIOS DE FALLO PARA MATERIALES COMPUESTOS."
- [30] "Fibra de Carbono | Propiedades, precio y aplicación | Propiedades materiales." <https://material-properties.org/es/fibra-de-carbono-tabla-de-materiales-aplicacion-precio/> (accessed Nov. 19, 2021).

Índice de figuras

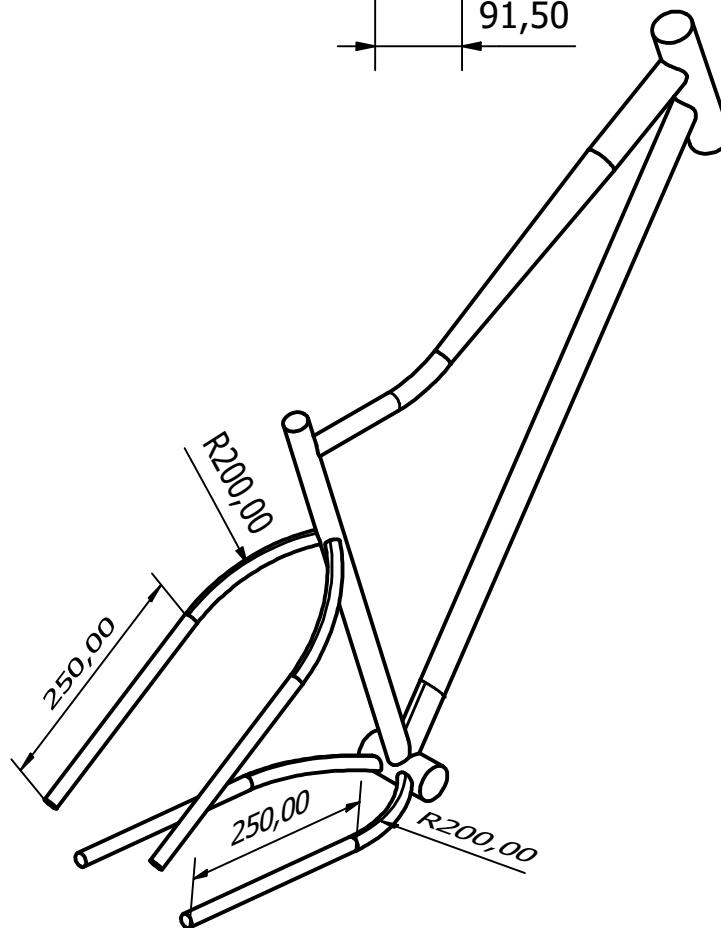
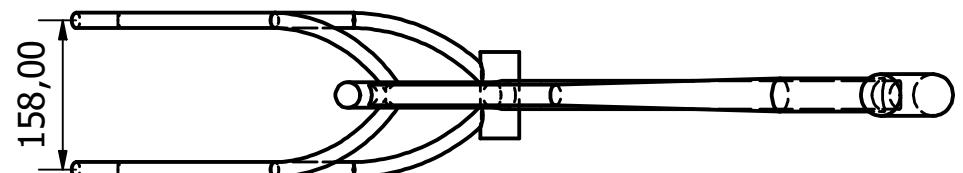
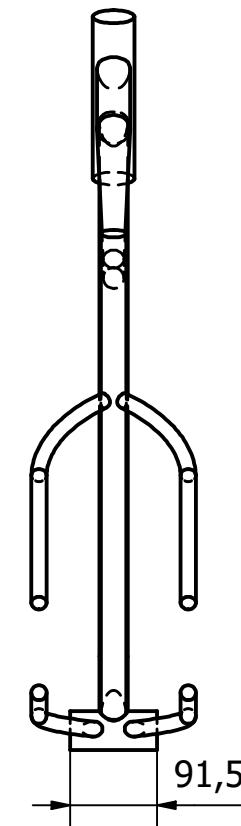
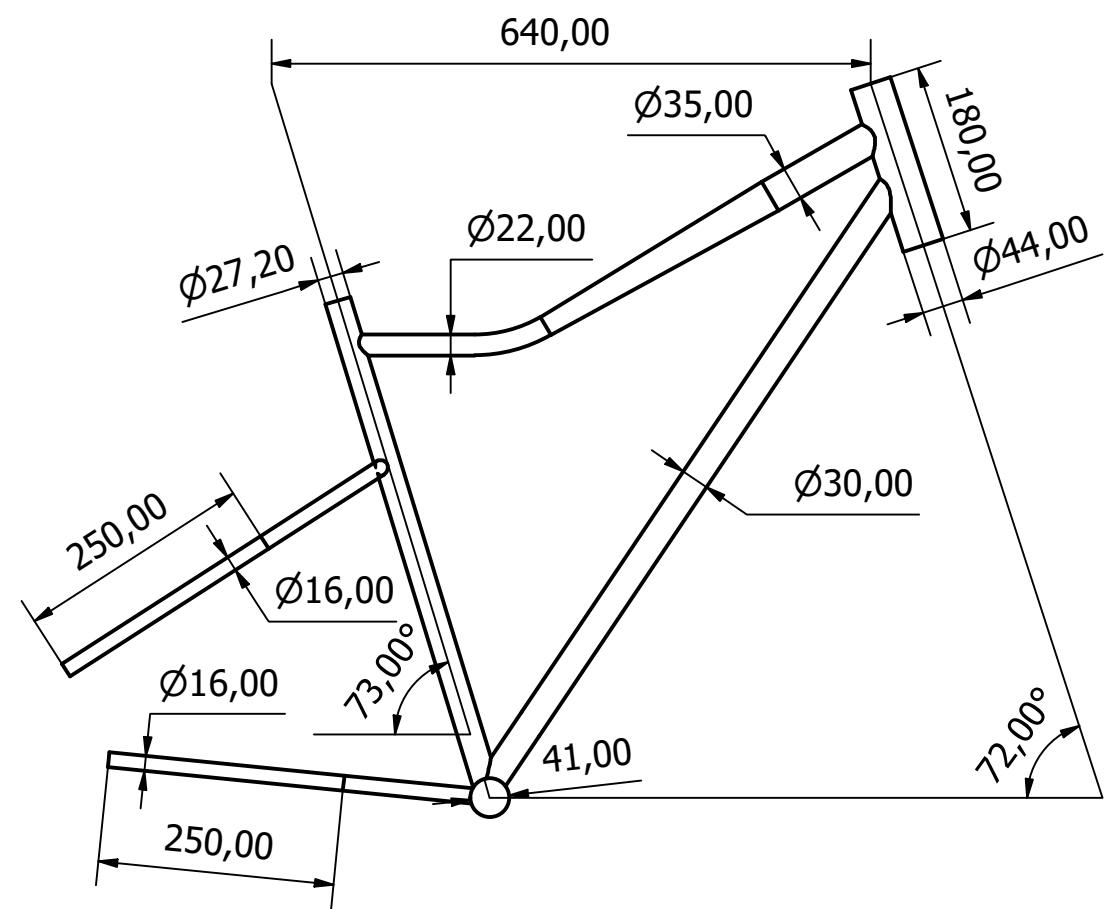
Figura 1. Bicicleta de ciudad [1].	3
Figura 2. Bicicleta de ciclomontaño o MTB [1].	4
Figura 3. Bicicleta de triatlón [1].	4
Figura 4. Bicicleta de ciclocross [2].	5
Figura 5. Bicicleta para turismo [1].	6
Figura 6. Bicicleta plegable [1].	6
Figura 7. Bicicleta híbrida [1].	7
Figura 8. Bicicleta de paseo [1].	7
Figura 9. Bicicleta doble o tandem [2].	8
Figura 10. Bicicleta BMX [1].	8
Figura 11. Bicicleta eléctrica [1].	9
Figura 12. Dirección roscada (threaded) [4].	10
Figura 13. Dirección embutida convencional [4].	11
Figura 14. Dirección embutida semiintegrada [4].	11
Figura 15. Dirección embutida integrada [4].	11
Figura 16. Juego dirección semiintegrado ZS44/28.6 ZS44/30 Decathlon [6].	13
Figura 17. Juego dirección semiintegrado ZS44/28.6 ZS44/30 Bikeshop [7].	13
Figura 18. Sourcing map liso metal plateado casquillo buje de 4440 Cojinete Manguito Autolubricante 50mm x 44mm x 40mm, Amazon [8].	14
Figura 19. Eje pedalier roscado de cuadradillo con rodamientos sellados [10].	16
Figura 20. Tipos de ejes pedalier [9].	16
Figura 21. Conjunto Hollow-Tech [10].	17
Figura 22. Pedalier de montaje directo [10].	18
Figura 23. Pedalier con montaje Press-Fit [10].	18
Figura 24. Cotas de caja de pedalier BB 86/92 [10].	19
Figura 25. KCNC BB92 Press Fit Adaptador, negro de Bikester [12].	19
Figura 26. Sistema Press Fit [13].	20
Figura 27. Adaptador para eje de pedalier Stronglight PF30 > BB86/89/92, de Bikeshop [14]..	20
Figura 28. Rueda Bicicleta Polivalente 28" Trasera Doble Pared Negro, Decathlon [15].	21
Figura 29. Cubierta Trekking Aro Rígido 700x38 / ERTO 38-622 BTWIN, Decathlon [16].....	21
Figura 30. Eje Pasante Transversal Rueda Trasera Bicicleta Montaña 12 x 148 Boost, Decathlon [18].	22
Figura 31. Eje Pasante Delantero 15x110 mm Bicicleta Montaña Manitou, Decathlon [19].	23
Figura 32. Patilla Cambio Bicicleta MTR RR9 posterior a 2009 [20].....	23

Figura 33. Tija de Sillín 27.2 mm Bicicleta Negro Decathlon [21].	24
Figura 34. Abrazadera Sillín 32 mm Plata, Decathlon [22].....	24
Figura 35. TOM shim 25,4 / 27,2 mm plata, Internet-Bikes [23].	25
Figura 36. Tija sillín bicicleta 25,4 mm diámetro y 300 mm longitud, Decathlon [24].	25
Figura 37. Geometría del cuadro, SpaceClaim ANSYS v19.2.....	27
Figura 38. Parámetros de diseño [25].	27
Figura 39. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.....	28
Figura 40. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.....	29
Figura 41. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.....	29
Figura 42. Croquis corte A-A, Autodesk Inventor Professional 2022.....	30
Figura 43. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.....	31
Figura 44. Croquis detalle B-B, Autodesk Inventor Professional 2022.	31
Figura 45. Croquis del cuadro, Autodesk Inventor Professional 2022.....	32
Figura 46. Croquis detalle C-C, Autodesk Inventor Professional 2022.....	32
Figura 47. Croquis vista isométrica, Autodesk Inventor Professional 2022.....	33
Figura 48. Geometría del molde, SpaceClaim ANSYS v19.2.....	34
Figura 49. Croquis del molde, Autodesk Inventor Professional 2022.....	35
Figura 50. Croquis del molde, Autodesk Inventor Professional 2022.....	35
Figura 51. Croquis del molde, Autodesk Inventor Professional 2022.....	36
Figura 52. Vista isométrica, Autodesk Inventor Professional 2022.	36
Figura 53. Extracto de la Norma UNE-EN ISO 4210-6:2015.	38
Figura 54. Condiciones de contorno impuestas, Abaqus.	39
Figura 55. Descomposición de la fuerza perpendicular al eje de la dirección, Abaqus.	39
Figura 56. Magnitud de los desplazamientos de la horquilla, Abaqus.....	40
Figura 57. Distribución de tensiones de Von Mises, Abaqus.	40
Figura 58. Distribución de tensiones de Von Mises, Abaqus.	41
Figura 59. Conjunto cuadro-horquilla, caída de una masa, Norma UNE-EN ISO 4210 [26].....	42
Figura 60. Conjunto cuadro-horquilla, caída de cuadro, Norma UNE-EN ISO 4210 [26].	45
Figura 61. Desplazamientos en dirección X, en mm, Abaqus.	51
Figura 62. Distribución de tensiones de Von Mises acero, en MPa, Abaqus.....	51
Figura 63. Criterio de fallo de Tsai Wu, Abaqus.	52
Figura 64. Distribución de desplazamientos en X, Step 1, en mm, Abaqus.	53
Figura 65. Distribución de desplazamientos en X, Step 2, en mm, Abaqus.	53
Figura 66. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, acero, en MPa, Abaqus.	54
Figura 67. Zona de concentración de tensiones de Von Mises, Step 2, en MPa, Abaqus.	54
Figura 68. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.	55

Figura 69. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,3), Step 2, Abaqus.	55
Figura 70. Zonas en que se ubican los refuerzos, Abaqus.....	56
Figura 71. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.....	57
Figura 72. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.	57
Figura 73. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.....	58
Figura 74. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.	59
Figura 75. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.....	60
Figura 76. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.	60
Figura 77. Criterio de fallo de Tsai Wu (zonas con valores menores a 0,5), Step 2, Abaqus.	61
Figura 78. Zonas que incumplen el criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.	61
Figura 79. Vistas de los refuerzos propuestos, ANSYS v19.2.	62
Figura 80. Vista isométrica de los refuerzos propuestos, ANSYS v19.2.....	62
Figura 81. Distribución de desplazamientos en X, Step 1, en mm, Abaqus.	63
Figura 82. Distribución de desplazamientos en X, Step 2, en mm, Abaqus.	63
Figura 83. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, acero, en MPa, Abaqus.	64
Figura 84. Desplazamientos en dirección X, en mm, Abaqus.	65
Figura 85. Distribución de tensiones de Von Mises acero, en MPa, Abaqus.	65
Figura 86. Criterio de fallo de Tsai Wu, Abaqus.	66
Figura 87. Comparación de los refuerzos, anterior arriba, actual abajo, Abaqus.....	67
Figura 88. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.	68
Figura 89. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.	68
Figura 90. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.	69
Figura 91. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,4), Step 2, Abaqus.	69
Figura 92. Criterio de fallo Tsai Wu (mayores a 0,4 excluyendo vainas), Step 2, Abaqus.	70
Figura 93. Criterio de fallo de Tsai Wu, Step 2, Abaqus.	71
Figura 94. Criterio de fallo de Tsai Wu (valores mayores a 0,5), Step 2, Abaqus.	71
Figura 95. Criterio de fallo de Tsai Wu excluyendo vainas, Step 2, Abaqus.....	72
Figura 96. Distribución de desplazamientos en X, Step 1, en mm, Abaqus.	73
Figura 97. Distribución de desplazamientos en X, Step 2, en mm, Abaqus.	73
Figura 98. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, en MPa, Abaqus.	74
Figura 99. Distribución de tensiones de Von Mises, Step 2, acero, en MPa, Abaqus.	75
Figura 100. Desplazamientos en dirección X, en mm, Abaqus.	75
Figura 101. Distribución de tensiones de Von Mises acero, en MPa, Abaqus.	76
Figura 102. Criterio de fallo de Tsai Wu, Abaqus.	77

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de dimensiones.....	26
Tabla 2. Parámetros geométricos relevantes en el diseño [1].....	28
Tabla 3. Parámetros angulares relevantes en el diseño [1].....	28
Tabla 4. Comparativa de los pesos de los modelos evaluados.	77



Dibujado:	Fecha	Nombre	Firma:	ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ZARAGOZA
Comprobado:				
Escala:	Título: Molde cuadro bicicleta			NIA: 699876
E 1:8	Proyecto: Cuadro de bicicleta			Curso: Master en Ing. Mecánica Nº Plano: Cuadro bicicleta