







PROPUESTA DE MEJORA EN EL SISTEMA ESTRUCTURAL DE UN CUADRO RÍGIDO DE BICICLETA DE MONTAÑA DE 15" R29, MEDIANTE FEA Y OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA

IMPROVEMENT PROPOSAL IN THE STRUCTURAL SYSTEM OF A 15" R29 RIGID MOUNTAIN BIKE FRAME, WITH FEA AND GEOMETRIC OPTIMIZATION

Juan P. Guamán^{1,*} , Hugo E. Crespo¹ ,
 César A. Paltán² , Jorge I. Fajardo² 

Recibido: 13-03-2023, Recibido tras revisión: 06-06-2023, Aceptado: 21-09-2023, Publicado: 01-01-2024

Resumen

En la actualidad la práctica del ciclismo ha tenido un incremento considerable, así como el uso de bicicletas de montaña (*Mountain Bike, MTB*, en inglés), de cuadro rígido, utilizadas como medio de transporte y para competencia, debido a su costo asequible. Este tipo de bicicletas, al ser utilizadas para varios propósitos, presentan esfuerzos variados en su cuadro, que conllevan a sobrepasar las exigencias de diseño, presentándose fallos en las vainas superiores. Este tipo de fallo es analizado en este estudio, motivo por el cual se levanta la información referente al material del cuadro, cargas actuantes y modelado 3D. Posteriormente se genera un análisis de homologación del fallo y se determina una propuesta de mejora aplicando optimización geométrica, donde se determina un espesor de 3,50 mm en las vainas superiores, garantizando la resistencia del cuadro de bicicleta bajo las condiciones de estudio; es decir, un drop de 60 cm y carga de 74 kg, con la cual se garantiza que el esfuerzo en las vainas superiores no sobrepase el esfuerzo último del material de 890,94 MPa.

Palabras clave: cuadro rígido, MTB, vainas superiores, optimización geométrica, esfuerzo último, drop

Abstract

Currently, the practice of cycling has had a considerable increase, as well as the use of mountain bikes (MTB) with rigid frames, used as a means of transportation and for competition, due to their affordable cost. This type of bicycles, when used for various purposes, present varied stresses in its frame, which leads to exceed the design requirements, presenting failures in the upper chainstays. This type of failure will be analyzed in this study, which is why the information regarding the frame material, acting loads and 3D modeling is collected. Subsequently, a homologation analysis of the failure is generated and an improvement proposal is determined by applying geometric optimization, where a thickness of 3,50 mm is determined in the upper sheaths, guaranteeing the resistance of the bicycle frame under the study conditions; that is, a drop of 60 cm and a load of 74 kg, this guarantees that the stress in the upper chainstays does not exceed the ultimate stress of the material of 890,94 MPa.

Keywords: rigid frame, MTB, chainstay, geometric optimization, ultimate stress, drop

^{1,*}Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

²Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales y Procesos de Transformación GiMaT, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Autor para correspondencia ✉: cpaltan@ups.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Guamán, J. P.; Crespo, H. E.; Paltán, C. A. y Fajardo, J. I. "Propuesta de mejora en el sistema estructural de un cuadro rígido de bicicleta de montaña de 15" R29, mediante FEA y optimización geométrica," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 31, pp. 106-114, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.09>.

1. Introducción

Uno de los medios de transporte alternativos más usados en la actualidad y que ha tenido un incremento importante durante los últimos años, es la bicicleta [1, 2]; además de ser saludable y amigable con el ambiente, es asequible a la sociedad en general [3, 4].

Entre la variedad de bicicletas que existen, las más utilizadas son las MTB, debido a la versatilidad de uso, tanto en carretera como en montaña [5]. Estas disponen de amortiguación en la parte delantera y su cuadro es rígido. Las bicicletas han tenido una evolución tecnológica, se ha disminuido considerablemente el peso y se ha incrementado la resistencia, pasando del uso del acero a materiales compuestos con refuerzos de fibra de carbono en la mayoría de los componentes de la bicicleta, además de la mejora de su sistema de transmisión [6].

Los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP*, en inglés), se utilizan en la fabricación de los cuadros de bicicleta por sus bondades de ligereza, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión [7]. Cabe mencionar que en las zonas de interfaces con el resto de componentes de la bicicleta se encuentran dispuestos insertos de aleación de aluminio debido al tipo de conexión [1]. La aplicación del material compuesto en bicicletas MTB se da a partir de la disposición u orientación de las fibras, por la propuesta de trenzados de los filamentos, lo cual evita la rigidez excesiva [8].

Este vehículo está conformado por varios componentes, entre los más importantes se encuentra el cuadro, ya que posee las interfaces principales y es donde desembocan los esfuerzos; el cuadro, por ende, está predispuesto al fallo, debido a la concentración de cargas transmitidas durante el funcionamiento [9].

Los fallos más comunes presentados en los cuadros rígidos de bicicletas MTB, además de presentarse en las uniones e interfaces, se generan en las vainas superior e inferior [10, 11], esto se debe a una sobrecarga provocada por los saltos o descensos pronunciados. Existen casos provocados por caídas, los cuales no son considerados como fallos de un uso normal de funcionamiento [12], el análisis está centrado de manera específica, en el fallo presentado en las vainas superiores, debido a la disponibilidad física de un cuadro rígido.

Es necesario dar una propuesta de solución, pues los fallos son proporcionales al incremento del uso de este tipo de bicicletas de cuadro rígido de fibra de carbono y, por ende, una insatisfacción mayor de los clientes, lo que implica el desprestigio directo de las marcas de bicicletas, lo cual va de la mano con una pérdida de ventas [13].

Al determinar una propuesta de mejora con optimización geométrica de las vainas superiores [14], se garantizará la resistencia mecánica acorde con los

requerimientos de diseño de este tipo de bicicletas, basada en parámetros de entrada y salida deseada [15], respecto a lo establecido en la normativa ISO 4210-6 2019 y su aplicación [16].

En el presente artículo se determina la carga de fallo y la configuración del material utilizado, luego se realiza una homologación del fallo ocasionado mediante el uso de un software de ingeniería, para posterior plantear una propuesta de solución mediante optimización geométrica de las vainas superiores [17].

2. Materiales y métodos

2.1. Configuración del laminado

Se utilizó una bicicleta MTB elaborada con CFRP de dimensiones 15" R29, con un fallo en las vainas superiores, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Falla en vainas superiores

En este caso para la aplicación del cuadro de bicicletas se utiliza laminado cuasi-isotrópico, cuyas capas están orientadas en $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$. Este laminado de fibra de carbono cuasi-isotrópico ofrece varias ventajas significativas como un buen comportamiento de resistencia y rigidez en múltiples planos. También presenta mayor durabilidad por la mejor distribución la carga, aumentado la resistencia a la fatiga del material. Esto es especialmente valioso en aplicaciones donde el laminado está sometido a cargas variables o cíclicas a lo largo del tiempo. Otro factor es la reducción de la sensibilidad a las grietas al ser menos sensible a la propagación de grietas o daños localizados y una mejor absorción de vibraciones. Estas características son debido a su estructura y distribución uniforme de fibras de carbono múltiples direcciones [18].

Las láminas de fibra de carbono están compuestas por filamentos con un porcentaje entre 80 y 95 % de carbono, con un diámetro, por lo general, de 8 μm . Se utiliza una resina o matriz polimérica para posicionar y unir dichos filamentos, además de protegerlos de agentes externos [19, 20].

En la Figura 2 se muestra el sistema de orientación de las fibras de carbono sometidas a esfuerzo de tracción y compresión acorde con la orientación de fibras [19, 21].

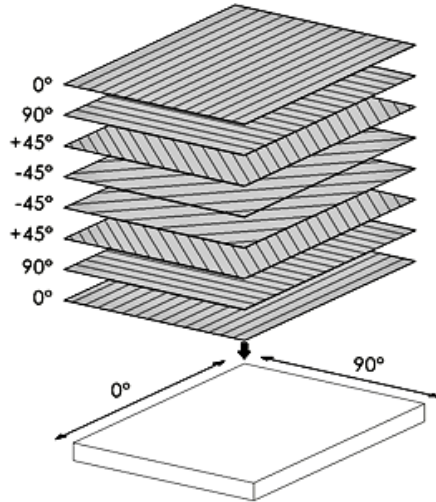


Figura 2. Laminado cuasi-isotrópico [20]

Las constantes del material compuesto epoxy/carbono se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Constantes del material compuesto

	E _{xy}	E _{yz}	E _{xz}
Módulo de Young (GPa)	123.3	7.78	7.78
	V _{xy}	V _{yz}	V _{xz}
Coefficiente de Poisson	0.27	0.42	0.27
	G _{xy}	G _{yz}	G _{xz}
Módulo cortante (GPa)	5	3.8	5

2.2. Métodos de análisis

Para el análisis de cuadros de bicicletas de fibra de carbono, se considera un tipo de laminado cuasi-isotrópico con ángulos de orientación y disposición de las fibras de la siguiente manera: 0° / 90° / +45° / -45° / -45° / +45° / 90° / 0°, las cuales se cargan en la configuración el programa como láminas previo a las simulaciones.

Además, en el análisis del material se toma como referencia la simetría ortótropa, y la ecuación constitutiva del material en la ecuación (1), para un sistema cartesiano en las tres direcciones perpendiculares entre sí, donde los esfuerzos (σ) son igual a la matriz de rigidez (C) por las deformaciones (ε) [19].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

- $\sigma_{1,2,3}$ = Esfuerzos de las direcciones x, y, z
- $\tau_{1,2,3}$ = Cortantes en las direcciones x, y, z
- $[C]$ = Matriz de rigidez
- $\varepsilon_{1,2,3}$ = Deformaciones en x, y, z
- $\gamma_{1,2,3}$ = Deformación angular en x, y, z

2.3. Modelo de elementos finitos usado

El modelo de elementos finitos utilizado para este estudio es Von Mises, con el cual se determina las deformaciones generadas sobre las vainas. El tipo de análisis es estático, debido a que se conoce las cargas que influye sobre el cuadro de la bicicleta y la correlación de las cargas dinámicas. Los tipos de elementos utilizados para el mallado son tetraédricos, por la complejidad del modelo; además, el número de orden del elemento es cuadrático lo cual ayuda a la convergencia [9]. Respecto al tipo de unión de los laminados en casos prácticos se utiliza Bonded debido a su proceso, mientras que para la simulación se cargó un laminado como Layered Section, el cual permite dar el espesor y ángulos de cada capa.

2.4. Criterio de falla

El criterio de falla se basa en el de máximo esfuerzo normal, porque es un material frágil; en este caso el marco de la bicicleta al ser de fibra de carbono, presenta poca deformación antes de romperse. Para la validación, la falla se da cuando uno de los componentes del esfuerzo en las tres direcciones ortogonales, es mayor o igual al esfuerzo límite del material en la dirección correspondiente, como se presenta en la ecuación (2).

$$\sigma_{max} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \geq \sigma_u \quad (2)$$

Donde:

- σ_{max} = Esfuerzo máximo
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Esfuerzo en x, y, z
- σ_u = Esfuerzo último

2.5. Optimización geométrica

El objetivo de la optimización geométrica del caso de estudio es maximizar el espesor de las vainas superiores, para incrementar la resistencia de tal manera que soporte los esfuerzos, producto de la carga actuante sobre el cuadro de la bicicleta. Es necesario identificar cuáles son los parámetros o condiciones de entrada y de salida para obtener los valores adecuados acorde con lo requerido.

La condición de entrada es:

- **P4:** Espesor

Las condiciones de salida son:

- **P2:** Restricción de esfuerzo último del material (890 MPa) y rango de espesores de 1 a 5 mm
- **P3:** Maximizar el volumen

2.6. Caracterizaciones

2.6.1. Análisis de microscopía

Para determinar el espesor del laminado, se extrajo una muestra de la zona cercana a la ruptura en la vaina superior, la cual fue preparada de acuerdo con el procedimiento metalográfico [22]. Con la micrografía de la región analizada se obtuvo la siguiente fotografía presentada en la Figura 3.

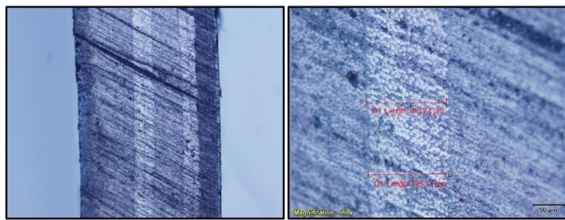


Figura 3. Microscopía 5x (a) y 20x (b)

Con el análisis microscópico a 20x, se determina la medida del espesor del laminado de $125 \mu m$ [23], lo que implica que acorde con el espesor levantado de 1 mm de espesor en la vaina superior, se posee 8 láminas, como se menciona en [24–26].

2.6.2. Sensor de datos

El usuario de la bicicleta, mediante una pulsera deportiva Mobvoi Ticwatch E3, la cual posee sensores GPS, giroscopio, acelerómetro y de ritmo cardiaco, registró datos como velocidad de la bicicleta, pendiente del terreno y altura del salto.

2.6.3. Análisis de espesor

Para conocer el espesor del laminado de las vainas superiores del cuadro de bicicleta, se utilizó un microscopio metalográfico Olympus BX51M, con cámara digital DP72, software OLYMPUS Stream Essential® el cual permite capturar imágenes con un aumento de 5x y 20x.

2.7. Geometría del marco de bicicleta

La geometría del cuadro de bicicleta se realiza en escala 1:1 modelada como superficie, para que se pueda cargar las láminas con su respectiva orientación de las fibras cuasi-isotrópicas. En la Figura 4 se presenta el modelo del cuadro rígido de la bicicleta.



Figura 4. Geometría de cuadro en 3D

2.8. Mallado

Se realiza un mallado de la superficie de la geometría, utilizando el método de mejoramiento de malla Capture Proximity and Curvature. Se obtuvo un total de 81786 nodos y 82487 elementos (Figura 5).

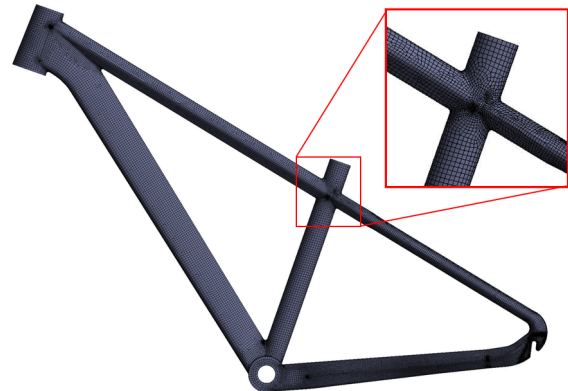


Figura 5. Mallado de cuadro de bicicleta

Dentro de la verificación de calidad de malla, se obtienen valores promedio de *Orthogonal Quality*: 0,97 y *Skewness*: 0,14. Con estos resultados se evidencia una alta calidad de malla [26], lo que conlleva a obtener una adecuada aproximación de los valores de la simulación.

2.9. Determinación factores para el fallo

Los datos obtenidos de la pulsera deportiva que usó el ciclista el día del evento son velocidad de 35 km/h, una pendiente en la ruta de -2° y un salto cortado o drop de 0,60 m de altura. Adicionalmente se conoce que la masa del ciclista es de 74 kg, los cuales actuaron sobre el sillín de la bicicleta.

2.10. Determinación del esfuerzo último de tensión del laminado

Con la información ingresada del espesor de láminas con su respectiva orientación y la carga actuante, se procede a determinar el esfuerzo último de tensión del laminado del cuadro de bicicleta.

Para simular el ensayo de tensión, se genera un modelo de probeta con medidas de 25 mm de ancho x 150 mm de longitud y 2,50 mm de espesor con ocho capas de laminado con configuración cuasi-isótropa. Las condiciones de frontera son un extremo fijo y el otro extremo con desplazamiento, donde se aplica un desplazamiento de 4 mm en el sentido longitudinal de la probeta, bajo los estándares establecidos en la norma ASTM D3090 [27]. El análisis se realizó con *Explicit Dynamics*, obteniéndose el esfuerzo máximo equivalente de Von Mises (514,87 MPa) como se presenta en la Figura 6.

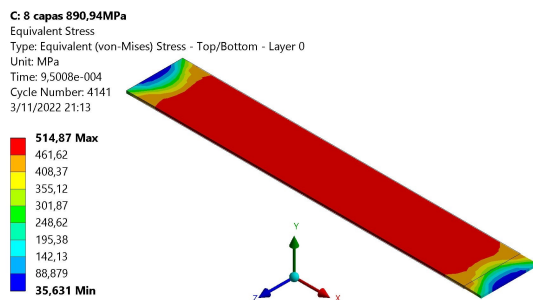


Figura 6. Simulación de probeta en ensayo de tensión

Luego de generada la simulación de la probeta a ensayo de tracción, se obtiene el esfuerzo máximo a la tensión de 890,94 MPa.

2.11. Simulación numérica de carga vertical

El método de ensayo de carga vertical de la norma UNE ISO 4210-6 [16], describe condiciones de frontera que son aplicables a este análisis, los cuales complementan a los datos descritos en el apartado de determinación de modo de fallo (Figura 7).

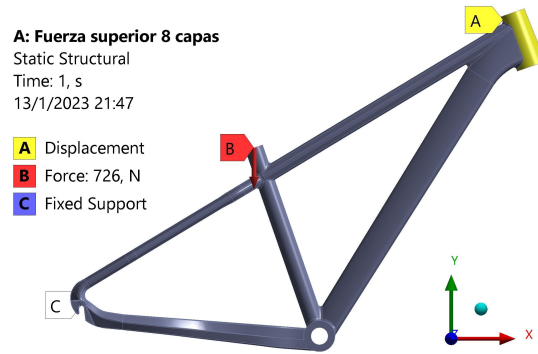


Figura 7. Condiciones iniciales y de frontera

Adicionalmente, dicha norma especifica que los ensayos a aplicarse son dinámicos, pero el análisis de este cuadro de bicicleta se lo realizará de forma estática, aplicando valores relativos a cargas dinámicas, obteniendo el mismo efecto [28, 29].

Con la ecuación (3) se determina el coeficiente dinámico para que en la ecuación (4) poder determinar la fuerza dinámica.

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 * H}{\delta_{est}}} = 46,119 \quad (3)$$

En donde:

- H= Altura de caída de la bicicleta (mm)
- δ_{est} = Desplazamiento estático del punto de aplicación de la fuerza estática (mm)

Para obtener el desplazamiento estático en el punto de aplicación de la carga, se realiza una primera simulación aplicando la carga de 74 kg. Obteniendo como resultado un desplazamiento de 0,52 mm (Figura 8).

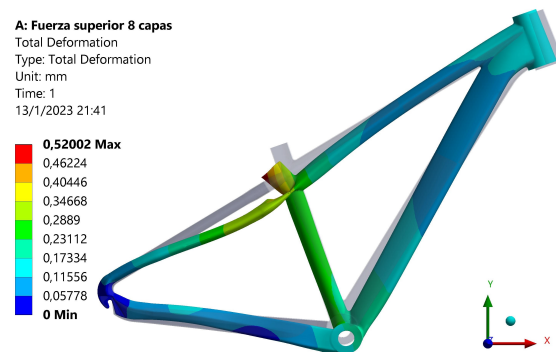


Figura 8. Máximo desplazamiento con carga estática de 74 kg

De esta manera, se determina la carga dinámica.

$$P_d = P_e * K_d = 3412,80 \text{ kg} \quad (4)$$

En donde:

- P_e = Fuerza estática

El valor encontrado de P_d es la nueva carga para aplicarse para realizar una segunda simulación, considerando el impacto de la carga inicial de 74 kg, con una altura de caída de 0,60 m.

3. Resultados y discusión

3.1. Rotura de las vainas superiores

Para determinar el esfuerzo equivalente de Von Mises actuante sobre las vainas superiores, de tal manera que se pueda homologar el modo de fallo, se aplica una carga de $-3412,80$ kg (Pd) sobre el eje "Y" del tubo del sillín que representa la carga del ciclista. Luego del posprocesamiento se obtienen valores superiores al esfuerzo último de $890,94$ MPa (determinado con la probeta) como se presenta en la Figura 9. El mecanismo de falla se da por impacto y estrés repetitivo. Se pueden presentar grietas que no se detectan a tiempo, estas pueden propagarse y debilitar la estructura de la bicicleta. En nuestro estudio no existe delaminación porque las capas de fibra de carbono no se separan o despegan lo cual se pudo apreciar en la inspección del cuadro de bicicleta con la microscopía. El daño por impacto debilita la estructura y reduce su resistencia. Un golpe brusco contra un objeto duro o una caída significativa pueden provocar daños internos no visibles a simple vista. Además, la sobrecarga por el salto superó los límites de diseño.

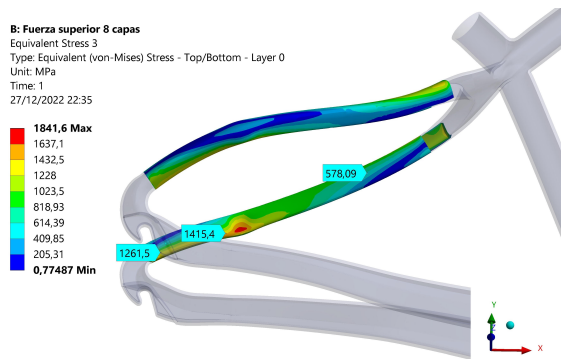


Figura 9. Esfuerzos generados en vainas superiores

3.2. Análisis mediante optimización geométrica

3.2.1. Optimización de espesor del marco de bicicleta

Teniendo presente que el esfuerzo último de la probeta del material laminado es $890,94$ MPa, el esfuerzo obtenido en la zona de fractura de las vainas superiores de $1415,40$ MPa, y que, además, existe un esfuerzo máximo de $1841,60$ MPa desplazada a la zona de fractura, como se muestra en la Figura 9, que es perteneciente a la zona subsiguiente izquierda. Por lo cual también

se hará una optimización para que dicho esfuerzo no afecte a las vainas superiores.

Luego de la primera iteración, se obtiene como resultado tres puntos candidatos como solución, como se muestra en la Tabla 2. Estos puntos representan los tres posibles espesores del laminado que pueden tener el marco de la bicicleta. El punto candidato 1 corresponde a un espesor de 5 mm, lo cual representa un incremento del 400 % de su espesor. El punto candidato 2, corresponde a un espesor de 4,60 mm, lo cual representa un incremento del 360 %; por último, el punto candidato 3 corresponde a un espesor de 4,16 mm con un incremento del 316 %. El punto 3 es el que representa el menor incremento de todos, por eso se lo puede considerar para la simulación con el nuevo espesor.

Tabla 2. Resultados de la optimización geométrica. Primera optimización

Nombre	P4-SYS\ Surface Thickness (mm)	P2 - Equivalent Stress 3 Máximum (MPa)		P3 - SYS \Surface Volumen (mm^3)	
		Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia	Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia
Punto candidato 1	5	2167,6	0,45 %	1,93E+0,6	20,09 %
Punto candidato 2	4,6	2164,1	0,29 %	1,78E+0,6	10,48 %
Punto candidato 3	4,16	2157,8	0,00 %	1,61E+0,6	0,00 %

Realizando una nueva simulación con el nuevo espesor de 4,16 mm en todo el marco de la bicicleta, se obtiene un esfuerzo de $478,68$ MPa en la zona de fallo, y un esfuerzo máximo de 665 MPa en la zona subsiguiente izquierda (Figura 10a).

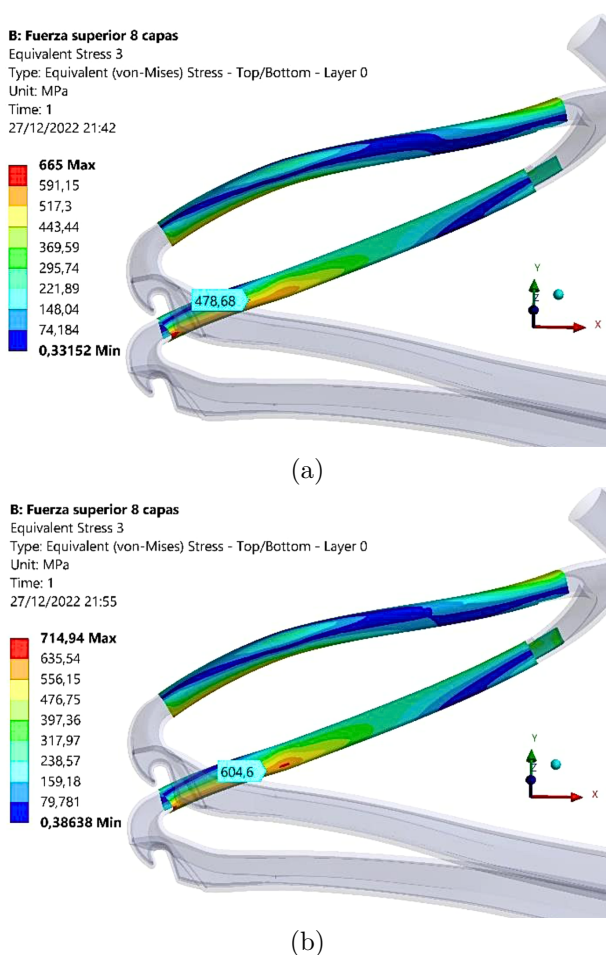
3.2.2. Optimización de espesor de vainas superiores

En una segunda iteración, se trabaja únicamente en el espesor de las vainas superiores, basándose en los resultados obtenidos de la primera corrida, tomando como referencia el esfuerzo máximo de 665 MPa. Con lo cual se obtuvo como resultado tres puntos candidatos de espesores nuevos, como lo muestra la Tabla 3. El objetivo de esta segunda iteración es tratar de reducir el espesor de las vainas en comparación al espesor encontrado para el resto del marco, el punto candidato 1 se descartó debido a que presenta un valor de 4,16 mm. Entre los puntos candidatos restantes se tomó el de menor espesor, es decir, el punto 3 con un valor de 3,50 mm.

Tabla 3. Resultados de la optimización geométrica. Segunda optimización

Nombre	P4-SYS\ Surface Thickness (mm)	P2 – Equivalent Stress 3 Máximum (MPa)		P3 - SYS \ Surface Volumen (mm^3)	
	Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia	Valor del parámetro	Variación respecto a la referencia	
Punto candidato 1	4,16	664,97	0,00 %	1,61E+0,6	18,89 %
Punto candidato 2	3,84	664,97	0,00 %	1,491E+0,6	9,85 %
Punto candidato 3	3,5	664,97	0,00 %	1,358E+0,6	0,00 %

Se realizó una nueva simulación con el nuevo espesor de 3,50 mm en las vainas superiores del marco de la bicicleta, obteniendo un esfuerzo de 604,60 MPa en la zona de fallo, y un esfuerzo máximo de 714,94 MPa en la zona subsiguiente izquierda (Figura 10b).

**Figura 10.** Esfuerzos generados en vainas superiores primera iteración (a). Esfuerzos generados en vainas superiores segunda iteración (b).

3.2.3. Propuesta final

Los resultados finales, producto de las optimizaciones, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados finales de optimizaciones

Parámetros	Estado inicial	Estado optimizado	Variación
Esfuerzo en vainas superiores	1766 MPa	619,54 MPa	-64,92 %
Espesor del material	1 mm	3,50 mm	250,20 %

4. Conclusiones

Las bicicletas de montaña de cuadro rígido, en la actualidad, son las más utilizadas como medio de transporte y competencia, sin considerar su límite de aplicación, motivo por el cual, son sobreexigidas por los usuarios, debido a su versatilidad, dándoles usos fuera del estándar con los que fueron diseñadas, esto se debe a que son asequible a cualquier usuario.

El estudio permitió determinar mecanismos para la determinación de fallas en los cuadros de bicicletas de fibra de carbono, analizando el modo de falla de rotura de las vainas superiores después de realizar un drop de 60 cm, tomando como fundamento la norma UNE ISO 4210-6 y la recolección de datos de usuario, para realizar la validación mediante (*Finite Element Analysis, FEA*, en inglés).

El análisis de microscopía permitió determinar espesor y número de capas, así también el espesor total del laminado.

Es importante mencionar que la determinación del número de capas (8 capas), y respecto a estudios anteriores de laminado estándar de los cuadros de bicicletas comerciales de fibra de carbono (cuasi-isótropo), se genera el análisis de tracción, donde se obtiene los valores de carga última y una curva de esfuerzo-deformación de un material frágil.

Para generación del análisis en el programa de simulación numérica, se carga el laminado Layered Section donde se configura el número de capas y orientación, el cual permite tener una similitud con el laminado tipo bonded utilizado en fabricación de cuadro de bicicletas de fibra de carbono.

El fallo de los componentes del cuadro de bicicleta, específicamente en las vainas superiores, se da debido a que los esfuerzos generados superan el esfuerzo último del material compuesto de 890,94 MPa, acorde con la simulación generada de la probeta del laminado.

La optimización geométrica se basa en la propuesta de nuevos espesores del material laminado y no en la variación de su geometría; además, con la propuesta de mejora se garantiza los esfuerzos generados por la carga del ciclista donde interactúa su peso de 74 kg y el drop de 60 cm.

La optimización entrega una propuesta de espesor para las vainas superiores de 3,50 mm, adicionalmente

se propone un espesor de 4,16 mm para la zona de sujeción de la llanta posterior, debido a que es una zona que influye directamente a las vainas superiores.

La rotura del sistema en estudio se da por la naturaleza frágil del material. La deformación encontrada corresponde a un sistema frágil y a la rotura del sistema por la fragilidad de la fibra de carbono, con el valor de espesor propuesto (3.5 mm). Mediante la optimización, se evitará roturas por el impacto de la bicicleta al caer al suelo en los saltos estudiados, esto se da porque aumentamos el área evitando exceder el límite de esfuerzo del material compuesto.

Referencias

- [1] S. M. Martín Mozas, *Desarrollo de guía metodológica y ejemplo de análisis estático y a fatiga de cuadro de bicicleta*. E. T. S. I. Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/48wefnU>
- [2] J. Freire, *El sector de la bicicleta en cifras 2020*. 30 Días en Bici, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ruvJAf>
- [3] W. J. Jara Lupercio and M. A. Dunia Pauta, *Beneficios sobre la salud derivados del uso de la bicicleta, frente a la contaminación ambiental y la pandemia SARS CoV-2. Revisión bibliográfica*. Carrera de Cultura Física. Universidad de Cuenca, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/48rqrpO>
- [4] J. Sanín Eastman, "El uso de la bicicleta como promotor de la movilidad sostenible: acciones y efectos en la movilidad cotidiana, el mejoramiento de la calidad del aire y el transporte público de las ciudades," *Revista Kavilando*, vol. 12, no. 1, pp. 118–126, jun. 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/45a030G>
- [5] P. Cañizares Gómez de Terreros, *Prediseño y análisis numérico de un prototipo de cuadro de bicicleta en CFRP*. Universidad de Sevilla, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Pt8DSx>
- [6] P. Navarro, J. Rui-Wamba, A. Campos, O. Antisench, C. Bañuelos, and M. Jordi, J. Rui-Wamba, *Ingeniería de la Bicicleta*. Fundación Esteyco, 2009. [Online]. Available: <https://bit.ly/466mHIC>
- [7] P. Bajpai, *Carbon Fiber*. Second edition. Cambridge, Elsevier, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/453CAOU>
- [8] A. Paz Carvajal, L. M. Ríos Gamboa, G. F. Casanova García, A. Leyton, and J. J. García Álvarez, "Fabricación y caracterización mecánica de un laminado de fibra de carbono en matriz de resina epoxi," *Scientia et Technica*, vol. 22, no. 3, pp. 262–267, 2017. [Online]. Available: <https://bit.ly/465xoev>
- [9] K. Khutal, G. Kathiresan, K. Ashok, B. Simhachalam, and D. Davidson Jebaseelan, "Design validation methodology for bicycle frames using finite element analysis," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 1861–1869, 2020, 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Modelling, ICM MM – 2019, VIT University, Vellore, 29th - 31st March 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.085>
- [10] Aszahara. (2010) Rotura tirante carbono Orbea Oiz, garantía. Foro MTB. Foro MTB. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZvqFbf>
- [11] NazcaCarbono. (2020) Caso de éxito: Reparación de una vaina totalmente seccionada. Nazca Carbono. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rsOqnP>
- [12] UvesBikes. (2023) Reparar cuadro de bicicleta. Uves Bikes. Uves Bikes. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rAvt2u>
- [13] C. Carlson Morales and A. L. Villarreal-Gómez, "Análisis de las 5 fuerzas de Porter aplicado a una refaccionaria de bicicletas y motocicletas," *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, vol. 8, no. 16, pp. 44–47, jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29057/icea.v8i16.5832>
- [14] M. A. Guzmán and A. Delgado, "Optimising a shaft's geometry by applying genetic algorithms," *Ingeniería e Investigación*, vol. 25, no. 2, pp. 15–23, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v25n2.14631>
- [15] U. Khalid, O. M. A. Mustafa, M. A. Naeem, M. Y. M. Alkhateeb, and B. M. A. E. Awad, "Direct optimization of an automotive sheet metal part using ANSYS," *International Journal of Engineering and Management Sciences*, vol. 5, no. 3, pp. 134–142, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2020.3.14>
- [16] ISO, *ISO 4210-6:2023 Cycles – Safety requirements for bicycles – Part 6: Frame and fork test methods*. Internacional Organization for Standardization, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3LCmg0m>
- [17] L. Parras, "Métodos alternativos de optimización de la geometría de estructuras articuladas," *Informes de la Construcción*, vol. 35, no. 351–352, pp. 77–82, 1983. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Zy91DG>

- [18] J. Fajardo, M. Villa, J. Pozo, and D. Urgilés, “Characterization of the tensile properties of an epoxy-carbon laminated composite used in the development of a single-seater Formula SAE type,” *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 3, pp. 1–12, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n3.381>
- [19] A. F. Rivas Bolívar, *Análisis estructural de un marco rígido de bicicleta de montaña mediante el modelamiento de elemento finitos en el software ANSYS*. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/48wxeP9>
- [20] L. A. Vargas Martínez and J. M. Martínez Benavides, *Estudio de propiedades mecánicas en láminas de fibra de carbono fabricadas mediante el proceso de laminación para elementos aeronáuticos*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3PwqDvd>
- [21] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*. Taylor and Francis, 1999. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ro9DiT>
- [22] Facultad de Ingeniería, *Metalografía Protocolo. Curso de Materiales*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia, 2011. [Online]. Available: <https://bit.ly/3t5aw0i>
- [23] S. K. García Castillo, *Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto*. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid, 2007. [Online]. Available: <https://bit.ly/46ooad5>
- [24] E. Monsalvo Barrera and J. Cortés Rico, *Propuesta de diseño de una masa soporte en fibra de carbono para un vehículo mini-baja*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZsU193>
- [25] A. Solana Rodríguez, *Cuadro de bicicleta en material compuesto*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales. Universidad Pública de Navarra, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZzFkSP>
- [26] ANSYS, *Mesh Quality*. ANSYS Workbench, 2023. [Online]. Available: <https://bit.ly/3RBFMyC>
- [27] ASTM, *ASTM D3039/D3039M-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International, 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/3PzA6SJ>
- [28] Y. Lugo Pérez, *Modelación de un cuadro de bicicleta “Minerva” para la utilización de un nuevo material aplicando el MEF*. Ingeniería Mecánica, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3rtgUxQ>
- [29] D. Vdovin, Y. Levenkov, and V. Chichekin, “Light frame design for quad bike using topology optimization,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 589, no. 1, p. 012026, 2019. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/589/1/012026>