ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.444

Material evaluation for the Hardtail MTB Frame of a bicycle to increase its fatigue resistance, year 2024

Daniel Albino Palacin[1], y Jorge Luis Lozano Salazar[2]
[1,2]Universidad Tecnológica del Perú, *1525017@utp.edu.pe* y C19254@utp.edu.pe

Abstract: ***The study analyzes the fatigue strength of Hardtail MTB bicycle frames using simulations with ANSYS Mechanical, comparing materials such as steel, aluminum and carbon fiber. Numerical results indicate that Von Mises stresses in the structure reach a maximum of 6.5959 × 10⁹ Pa in critical areas, such as the connection to the rear wheel, suggesting that these areas may need reinforcement due to high loading. As for the deflections, the maximum observed was 0.079544 m in the rudder area, and 0.010866 m in the pedal area, indicating adequate stiffness in most of the structure, but with points requiring improvement. The safety factor analysis shows that, in general, the structure has a factor between 5 and 15, which is adequate, although in certain joints, such as in the pedal area, the factor drops to a minimum of 0.15966, which can be critical under extreme loads. In addition, stresses under compressive and vertical loads also reveal high stress areas, with values of 8.26 × 10⁹ Pa in compression, indicating that the joints should be strengthened and the frame geometry improved. Finally, it is recommended to consider materials such as high-strength steel alloys or chrome-molybdenum, and to optimize frame geometry to increase durability and safety under demanding conditions***

Key words: Frame, steel, simulation, ANSYS, factor of safety.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVEC

Evaluación de material para el cuadro Hardtail MTB Frame de una bicicleta para incrementar su resistencia a la fatiga, año 2024

Daniel Albino Palacin[1], y Jorge Luis Lozano Salazar[2]
[1,2]Universidad Tecnológica del Perú, *1525017@utp.edu.pe* y C19254@utp.edu.pe

Abstract- El estudio analiza la resistencia a la fatiga de los cuadros de bicicletas Hardtail MTB utilizando simulaciones con ANSYS Mechanical, comparando materiales como acero, aluminio y fibra de carbono. Los resultados numéricos indican que los esfuerzos de Von Mises en la estructura alcanzan un máximo de 6.5959 × 10⁹ Pa en las zonas críticas, como la conexión con la rueda trasera, lo que sugiere que estas áreas pueden necesitar refuerzos debido a la alta carga. En cuanto a las deformaciones, la máxima observada fue de 0.079544 m en la zona del timón, y 0.010866 m en la zona del pedal, lo que indica una rigidez adecuada en la mayoría de la estructura, pero con puntos que requieren mejora. El análisis del factor de seguridad muestra que, en general, la estructura tiene un factor entre 5 y 15, lo cual es adecuado, aunque en ciertas uniones, como en la zona del pedal, el factor cae a un mínimo de 0.15966, lo que puede ser crítico bajo cargas extremas. Además, los esfuerzos bajo cargas de compresión y verticales también revelan zonas de alta tensión, con valores de 8.26 × 10⁹ Pa en compresión, lo que indica que se deben reforzar las uniones y mejorar la geometría del cuadro. Finalmente, se recomienda considerar materiales como aleaciones de acero de alta resistencia o cromo-molibdeno, y optimizar la geometría del cuadro para aumentar su durabilidad y seguridad bajo condiciones exigentes.

Keywords—Cuadro, acero, simulación, ANSYS, factor de seguridad

I. INTRODUCCIÓN

Montar en bicicleta es una actividad económica, saludable y beneficiosa, que previene enfermedades, facilita la pérdida de peso, reduce la presión arterial y mejora el bienestar general. Además, es una opción ecológica, económica y eficiente en el tráfico urbano [1]. La elección entre cuadros de carbono y aluminio depende de las necesidades del ciclista: el carbono es más ligero y de alto rendimiento, pero más delicado, mientras que el aluminio es más económico y adecuado para entrenamientos. El acero, aunque menos popular hoy en día, sigue siendo relevante en cicloturismo y BMX por su resistencia y confort, aunque es más pesado y susceptible a la corrosión [2]. Esta investigación compara acero y fibra de carbono en bicicletas, destacando que el acero es duradero, económico y fácil de reparar, especialmente en modelos de alta gama como los de CroMo [3]. Finalmente, la norma ISO 4210 regula los requisitos de seguridad y rendimiento para garantizar bicicletas seguras y confiables [4]. Por lo señalado anteriormente, se formula la pregunta de investigación: ¿Qué tipo de evaluación de material para el cuadro Hardtail MTB Frame de una bicicleta permite incrementar su resistencia a la fatiga, año 2024? por lo que se tiene como objetivo principal evaluar un material para el cuadro Hardtail MTB Frame de una bicicleta para incrementar su resistencia a la fatiga, año 2024.

El análisis de tensiones en cuadros de bicicleta comparó distintas metodologías de simulación y pruebas experimentales, revelando diferencias significativas en los resultados de tensiones, destacando que los métodos actuales tienden a subestimar la tensión real. El Método 1 FEA, sin embargo, mostró resultados más cercanos a las mediciones experimentales, aunque aún requiere ajustes para mayor precisión [5]. En un análisis de cuadros de bicicleta de carretera, se encontró que los cuadros con tubos más pequeños ofrecían mejor elasticidad y rigidez, mientras que los cuadros con tubos superiores más cortos y mayor ángulo de dirección mostraron mayor rigidez lateral. La solución optimizada mejoró la elasticidad y redujo el desplazamiento lateral en un 13% y 15%, respectivamente [6]. En cuanto a materiales, se compararon acero, aluminio 6061 T6, titanio y fibra de carbono, encontrándose que la fibra de carbono tenía la mayor resistencia en condiciones de impacto, aunque el aluminio 6061-T6 mostró las menores deformaciones [7]. Además, el análisis comparativo de aleación de magnesio AZ91D y aluminio 6061-T6 reveló que el aluminio fue más económico y con menores deformaciones en diversas condiciones de carga [8]. El estudio del marco de fibra de carbono mostró una buena resistencia a impactos y deformación, con un peso estimado de 780 g [9]. Finalmente, un estudio de optimización del diseño de cuadros de bicicleta utilizando Pro/ENGINEER mostró que el uso de aleaciones como AZ61/Al2O3 MMCs redujo el peso del marco en un 36%, contribuyendo a un diseño más liviano y resistente [10]. El cuadro Hardtail MTB Frame, fabricado en aleación de aluminio, es adecuado para bicicletas de montaña, con diversas configuraciones y tamaños [11].

DISEÑO DEL CUADRO DE UNA BICICLETA

Los materiales más comunes en los cuadros de bicicleta son acero, aluminio, fibra de carbono y titanio. El acero es duradero y fácil de reparar, pero pesado y propenso a la corrosión. El aluminio es ligero, resistente a la corrosión y económico, pero sufre fatiga y es difícil de reparar. La fibra de carbono es ligera y rígida, pero cara y frágil. El titanio combina ligereza, resistencia y durabilidad, pero es el más caro y complejo de fabricar. La elección depende del uso, peso, duración y presupuesto [12].

Área de los Tubos del Cuadro

El área de sección transversal de los tubos del cuadro es importante para determinar la resistencia y rigidez. Para un tubo cilíndrico con radio exterior r_e y espesor d, el área de sección transversal A_t del tubo es:

$$A_t = \pi(r_e^2 - (r_e - d)^2) \quad (1)$$

A_t = Área de sección transversal del tubo (m²)
r_e = Radio exterior del tubo (m)
d = Espesor del tubo (m)

Momento de Inercia del Tubo

El momento de inercia I de un tubo cilíndrico con radio exterior r_e, radio interior r_i y longitud L es fundamental para calcular la rigidez del tubo bajo flexión. Se calcula como:

$$I = \frac{\pi}{64}(r_e^4 - r_i^4) \quad (2)$$

Donde:

I = Momento de inercia (m^4)
r_e = Radio exterior del tubo (m)
r_i = Radio interior del tubo (m)

RESISTENCIA A LA FATIGA

La resistencia a la fatiga ante impactos evalúa la capacidad de un material para soportar cargas cíclicas repetidas sin fallar, especialmente bajo impactos bruscos. Este análisis es esencial para predecir la vida útil de componentes como los cuadros de bicicleta, usando herramientas como el análisis de elementos finitos para simular y detectar puntos débiles. Las pruebas experimentales confirman la durabilidad del material y ayudan a identificar posibles fallos. La resistencia varía según el material y el diseño, influyendo en la durabilidad y seguridad del componente [13].

Tensión Equivalente de Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1\sigma_2} \quad (3)$$

donde σ_1 y σ_2 son las tensiones principales.

Rigidez del Cuadro en Flexión

La rigidez del cuadro en flexión puede calcularse usando el momento de inercia de los tubos y el módulo de elasticidad del material. La deformación δ bajo una carga F aplicada en el centro de un tubo de longitud L y momento de inercia I es:

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (4)$$

Donde:
δ = Deformación (m)
F = Carga aplicada (N)
L = Longitud del tubo (m)
E = Módulo de elasticidad del material (Pa)
I = Momento de inercia (m^4)

Carga de Compresión en el Tubo

Para calcular la carga de compresión que un tubo puede soportar sin fallar, se puede usar la fórmula de resistencia de materiales para la carga axial F:

$$F = \frac{\sigma A_t}{FS} \quad (5)$$

Donde:

F = carga de compresión
σ = Resistencia a la compresión del material (Pa)

A_t = área de sección transversal del tubo (m^2)
FS= el factor de seguridad es un valor que se selecciona

dependiendo de las condiciones de uso y los estándares de diseño.

La optimización del diseño del cuadro Hardtail MTB Frame en 2024 busca mejorar la resistencia a la fatiga y adaptarse a las necesidades del ciclismo moderno, mejorando la experiencia del ciclista. Se realizará un análisis estructural detallado mediante simulaciones avanzadas con software de elementos finitos (ANSYS), para evaluar el rendimiento del cuadro bajo diferentes cargas ciclos de fatiga, identificando posibles fallos. El objetivo es crear un diseño que aumente la durabilidad, seguridad y confort del ciclista, contribuyendo al desarrollo sostenible e innovador en la industria del ciclismo.

II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La investigación aplica conocimientos teóricos para resolver problemas prácticos, con un enfoque cuantitativo y descriptivo, observando fenómenos sin manipular variables y utilizando datos numéricos [14], [15] y [16]. El objetivo es diseñar y analizar materiales para el cuadro de una bicicleta Hardtail MTB, mejorando su resistencia a la fatiga. Se seleccionarán materiales como la aleación de cromo molibdeno y se utilizarán simulaciones en ANSYS Mechanical para evaluar la resistencia y ligereza del diseño, sin incluir análisis económicos ni simulaciones CFD debido a limitaciones del software. El estudio se centrará en un solo cuadro sin muestreo ni recopilación de datos de varios cuadros [17].

RECOLECCIÓN DE DATOS DE UN CUADRO HARDTAIL MTB FRAME DE UNA BICICLETA

En la tabla 1 se recopilaron datos como el peso del cuadro, entre otros.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del cuadro de la bicicleta

ESPECIFICACIONES DEL CUADRO	
Característica	**Detalles**
Nombre	Hardtail MTB Frame
Desviador Trasero	Versión de eje del cañón de 12 × 148 mm
Tamaño de Rueda	27,5 pulgadas / 29 pulgadas
Juego de Tazones	44 × 56 juego de tazones
Tija de Sillín	31,6 mm
Tamaños Disponibles	S, M, L
Sugerencias de Selección de Tamaño	S: 150-165 cm de altura
	M: 165-175 cm de altura
	L: 175-185 cm de altura
Peso Neto	2093 g (S) / 2125 g (M) / 2148 g (L)
Longitud del Elevador	380 mm (S) / 420 mm (M) / 465 mm (L)
Longitud de Cinco Pasadas	68 mm
B B	BB91 eje central roscado
Sistema de Frenos	Freno de disco (disco de 160 mm de ajuste predeterminado, 180-203 mm necesita agregar adaptador)
Regalos Incluidos	Abrazadera de tija de sillín, vástago de cañón

Nota: En la tabla se muestra las características del cuadro Hardtail MTB Frame adaptado de: 29inch mountain bike

frame cross-country class MountainBike disk Brake MTB frame [11]

Tabla 2. Ficha técnica de un tubo hueco de acero

Diámetro Interior	Diámetro Exterior (D)	Espesor (e)	Presión/Prueba	Peso (kg/mts)
pulg	mm	pulg	mm	pulg
1/2"	21.3	0.84	2.77	0.1
3/4"	26.7	1.05	2.87	0.11
1"	33.4	1.31	3.38	0.13
1 1/4"	42.2	1.66	3.56	0.14
1 1/2"	48.3	1.9	3.68	0.14
2"	60.3	2.37	3.91	0.15
2 1/2"	73	2.87	5.16	0.2
3"	88.9	3.5	5.49	0.21
4"	114.3	4.5	6.02	0.24
5"	141.3	5.56	6.55	0.25
6"	168.3	6.62	7.11	0.28
8"	219.1	8.63	8.18	0.32
10"	273	10.75	9.27	0.36
12"	323.8	12	10.31	0.41
14"	355.6	14	11.13	0.43

Nota: En la tabla se muestra las características del tubo de acero adaptado de: 29inch mountain bike frame cross-country class MountainBike disk Brake MTB frame [11]

Tabla 3. Ficha de rangos de pesos en el Perú

Categoría	IMC Rango	Altura Promedio (m)	Peso Rango (kg)	Porcentaje de la población	Diferencias
Sin sobrepeso	18,5 - 24,9	1,62	48,7 - 65,5	47% (aprox.)	-
Con sobrepeso	25 - 29,9	1,62	65,6 - 78,6	35,5%	Afecta más a la Costa (38,9%) y a personas de mayor nivel socioeconómico (41,5%)
Obesidad	≥ 30	1,62	≥ 78,7	17,8%	Mayor en mujeres (22,4%) y en áreas urbanas (21,9%)
Por regiones (sobrepeso)	25 - 29,9	1,62	65,6 - 78,6	Costa (38,9%), Selva (32,2%), Sierra (31,6%)	-
Por nivel socioeconómico (obesidad)	≥ 30	1,62	≥ 78,7	Ricos (23,7%), Pobres (8,1%)	Diferencia de 15,6 puntos porcentuales entre ricos y pobres
Obesidad por departamentos	≥ 30	1,62	≥ 78,7	Tacna (30,4%), Tumbes (26,2%), Ica (26,2%)	Los menores porcentajes en Huancavelica (7,6%), Apurímac (8,9%), y Cajamarca (9,5%)

Nota: En la tabla se muestran los pesos alrededor de toda la problación peruana adaptado de: Instituto Nacional de Estadistica e Informatica [19]

10. ANÁLISIS DE DATOS

*El software Excel brinda un mayor orden para la recolección de datos experimentales que se usarán para el análisis del cuadro.

*El software Inventor ayuda al diseño del cuadro, analizado en el software Ansys Mechanical.

*El software Ansys Mechanical ayuda a determinar qué tan ligero y resistente será el cuadro a diversas cargas aplicadas como el peso total (peso del cuadro + peso de una persona).

Tabla 4. Especificaciones requeridas para la simulación del cuadro Hardtail MTB Frame

Característica	Detalle
Desviador trasero	Versión del eje del cañón de 12 x 148 mm
Tamaño de rueda	27.5 pulgadas / 29 pulgadas
Juego de tazones	44 * 56
Tija de sillín	31.6 mm
Peso neto	2093 g (S) / 2125 g (M) / 2148 g (L)
Longitud del elevador	380 mm (S) / 420 mm (M) / 465 mm (L)
Longitud de cinco pasadas (BB)	68 mm

Nota: En la tabla se muestran las especificaciones técnicas para saber el peso total al que estará sometido el cuadro adaptado de: 29inch mountain bike frame cross-country class MountainBike disk Brake MTB frame [11]

Tabla 5. Características específicas del tubo de acero para la simulación del cuadro Hardtail MTB Frame

Propiedad	Tubo más cercano
Diámetro Exterior	26.70 mm (3/4")
Espesor (e)	2.87 mm
Material	Acero
Norma	ASTM A 53 GRB
Categoría	Tubos redondos
Presión/Prueba	49 kg/cm^2, 700 lb/pulg^2
Peso (kg/mts)	1.68 kg/mts

Nota: En la tabla se muestran las características específicas del tubo de aceros para saber el peso total al que estará sometido el cuadro adaptado de: Tubo Cédula 40 [18]

Tabla 6. Tabla de pesos para la simulación del cuadro Hardtail MTB Frame

Categoría	IMC Rango	Altura Promedio (m)	Peso Rango (kg)
Sin sobrepeso	18,5 - 24,9	1,62	48,7 - 65,5
Con sobrepeso	25 - 29,9	1,62	65,6 - 83

Nota: En la tabla se muestran los pesos de la población peruana para adaptarlo al peso total al que estará sometido el cuadro adaptado de: Instituto Nacional de Estadistica e Informatica [19]

DISEÑO DEL CUADRO HARDTAIL MTB FRAME

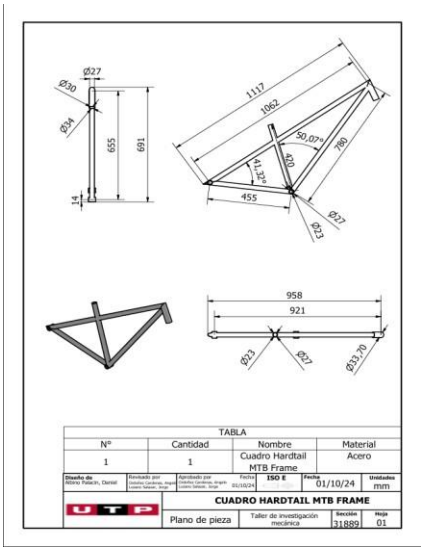
Para el diseño del cuadro se usan los datos de la tabla:

$$W_{total} = W_{cuadro} + W_{persona}$$

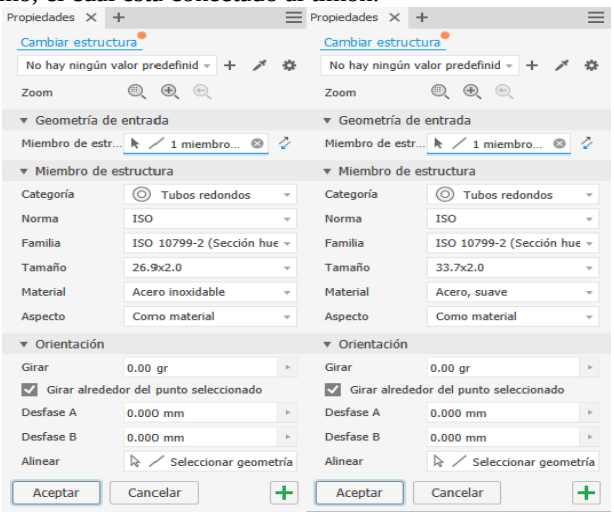
$$W_{total} = (2125 * 0.001 * 9.81) + (82.875 * 9.81)$$

$$= 833.85\ N$$

Por lo que se seguirá las dimensiones del siguiente plano:



Posteriormente, se procederá al diseño del cuadro en Autodesk Inventor siguiendo una serie de pasos específicos: primero, se creará un boceto en 2D para graficar el diseño del cuadro. Una vez completado, se guardará el boceto y, en una carpeta de ensamblado, se volverá a ensamblar el modelo. Utilizando la herramienta de Diseño, se insertará la estructura con las dimensiones especificadas, aplicando estas mismas características a cada tramo, excepto en el tramo que se conecta al timón, donde las dimensiones deberán ajustarse ligeramente. Finalmente, se aplicará la estructura modificada al último tramo, el cual está conectado al timón.



CÁLCULO DE CARGAS EN EL CUADRO

Inicialmente colocamos los datos iniciales del modelo de cuadro como las dimensiones y ángulos de la estructura:
Posteriormente realizamos su diagrama de cuerpo libre:
Nodo A:

$$A_x + F_{AC} * cos(\theta_{AC}) = 0$$
$$A_y + F_{AC} * sen(\theta_{AC}) = 0$$
$$B_x + F_{EB} * cos(\theta_{EB}) = 0$$

Nodo C:

$$A_x + F_{AC} * cos(\theta_{AC}) + F_{CD} * cos(\theta_{CD}) = 0$$
$$A_y + F_{AC} * sen(\theta_{AC}) + F_{CD} * sen(\theta_{CD}) = 833.85\ N$$

Nodo B:
Como: By = 0 entonces:

$$F_{EB} * sen(\theta_{EB}) - F_{AB} = 0$$

Pasamos a solucionar cada ecuación:

$$A_x = 562.48\ N$$
$$A_y = 494.50\ N$$
$$F_A = 749.96\ N$$

Posteriormente se halla la fuerza F_{EB}:

$$B_x + F_{EB} * cos(\theta_{EB}) = 0$$
$$F_{EB} * sen(\theta_{EB}) - F_{AB} = 0$$
$$F_{EB} = 562.48\ N$$

Finalmente la reacción B en la dirección x:

$$B_x = -562.48\ N$$

SIMULACIÓN DEL CUADRO DE LA BICICLETA:

Inicialmente, se inserta el modelo diseñado en Inventor, el cual cuenta con las características detalladas y se coloca una malla de 1 mm como tamaño de elementos. Una vez enmallado, se asigna un soporte, seguido por la aplicación de una fuerza de 833.85 N en la sección inferior conectada a los pedales. Además, se asigna una fuerza de -562.48 N en la sección que conecta al timón, en la dirección X. En cuanto al análisis vertical, se coloca otro soporte en la sección que está conectada a la rueda delantera y, posteriormente, se asigna una carga de 833.85 N en la sección conectada a las ruedas para estudiar el comportamiento del peso en esta dirección. En una simulación posterior, se asigna un soporte en la sección conectada a los pedales y, nuevamente, se aplica una fuerza de -562.48 N en la dirección X en la sección que conecta con la rueda delantera. Gracias a las siguientes especificaciones brindadas por el ANSYS MECHANICAL:

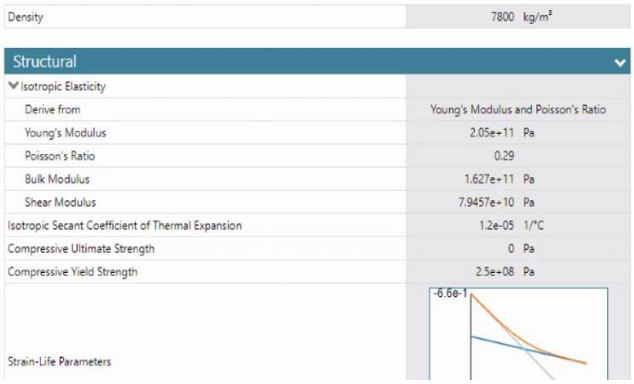


Figura 1. Especificaciones técnicas del acero estructural obtenido del ANSYS MECHANICAL

Se puede observar en las siguientes figuras los resultados favorables respecto a la simulación con las diferencias fuerzas distrubuidas entre diferentes zonas y puntos del cuadro metálico.

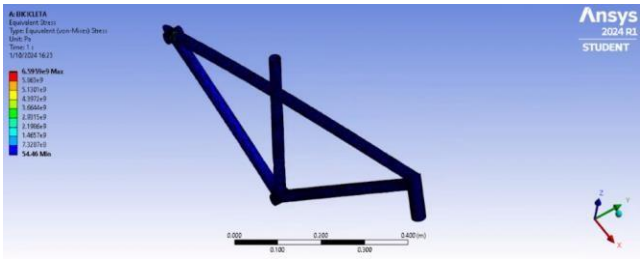


Figura 2. Esfuerzos de Von mises obtenidos a partir de cargas distribuidas en la estructura

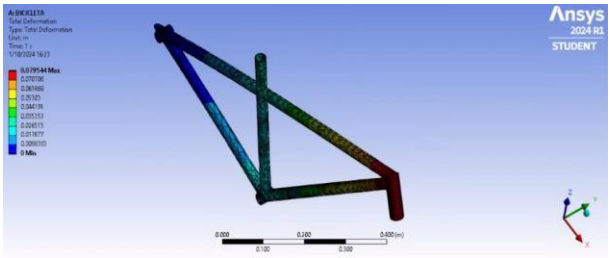


Figura 3. Deformaciones obtenidas a partir de cargas distribuidas en la estructura

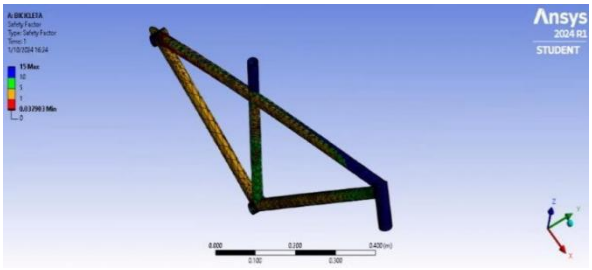


Figura 4. Factor de seguridad obtenido a partir de cargas distribuidas en la estructura

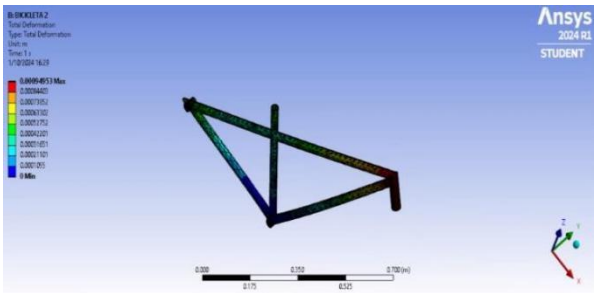


Figura 5. Simulación de deformaciones a partir de cargas verticales en la estructura

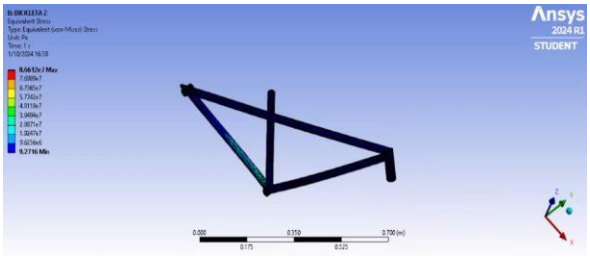


Figura 6. Simulación de los esfuerzos de Von mises a partir de cargas verticales en la estructura

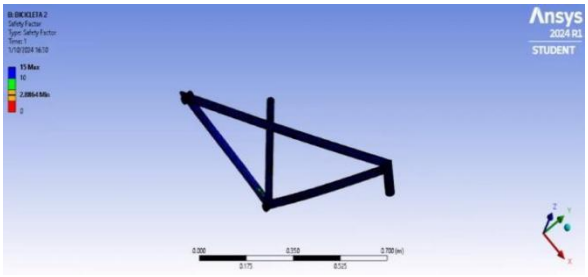


Figura 7. Simulación del factor de seguridad a partir de cargas verticales en la estructura

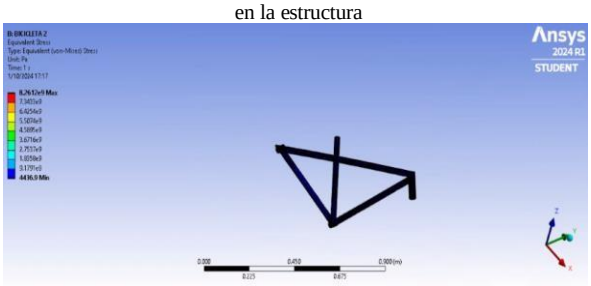


Figura 8. Simulación de los esfuerzos de Von mises a partir de cargas de compresión en la estructura

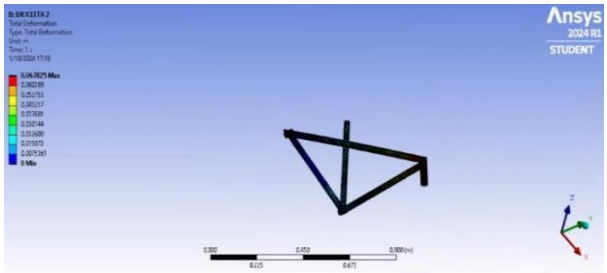


Figura 9. Simulación de la deformación a partir de cargas de compresión en la estructura

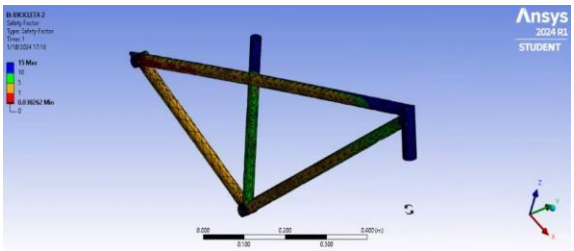


Figura 10. Simulación del factor de seguridad a partir de cargas de compresión en la estructura

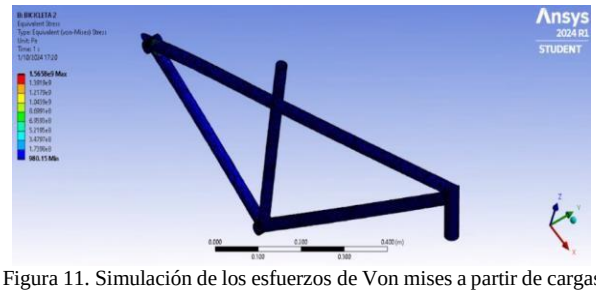


Figura 11. Simulación de los esfuerzos de Von mises a partir de cargas verticales en la zona del pedal

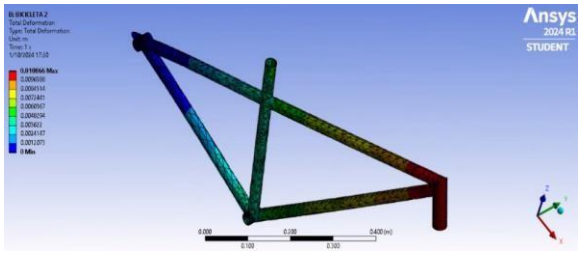


Figura 12. Simulación de la deformación a partir de cargas verticales en la zona del pedal

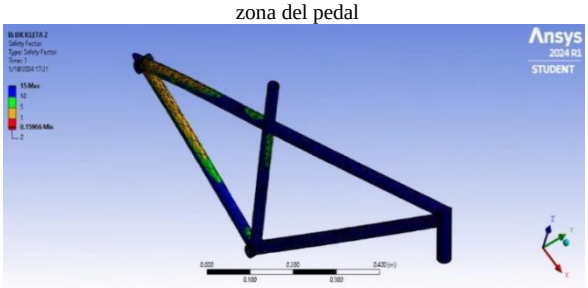


Figura 13. Simulación del factor de seguridad a partir de cargas verticales en la zona del pedal

Tabla 7. Tabla de esfuerzos y deformaciones a diferentes cargas aplicadas sobre la estructura

Esfuerzos de Von mises (Pa)				Deformaciones (m)			
Cargas distribuidas	Carga vertical	Carga de compresión	Carga en el pedal	Cargas distribuidas	Carga vertical	Carga de compresión	Carga en el pedal
6.60E+09	8.66E+07	8.26E+09	1.57E+09	0.079544	0.00094953	0.067825	0.010866
5.86E+09	7.70E+07	7.34E+09	1.39E+09	0.070706	0.0008443	0.060289	0.0096588
5.13E+09	6.74E+07	6.43E+09	1.22E+09	0.061868	0.00073852	0.052753	0.0084514
4.40E+09	5.77E+07	5.51E+09	1.04E+09	0.05303	0.00063302	0.045217	0.0072441
3.66E+09	4.81E+07	4.59E+09	8.70E+08	0.044191	0.00052752	0.037681	0.0060367
2.93E+09	3.85E+07	3.67E+09	6.96E+08	0.035353	0.00042201	0.030144	0.0048294
2.20E+09	2.89E+07	2.75E+09	5.22E+08	0.026515	0.00031651	0.022608	0.003622
1.47E+09	1.92E+07	1.84E+09	3.48E+08	0.017677	0.00021101	0.015072	0.0024147
7.33E+09	9.62E+07	9.18E+08	1.74E+08	0.0088383	0.0001055	0.0075361	0.0012073
5.45E+01	9.2716	4436.9	980.15	0	0	0	0

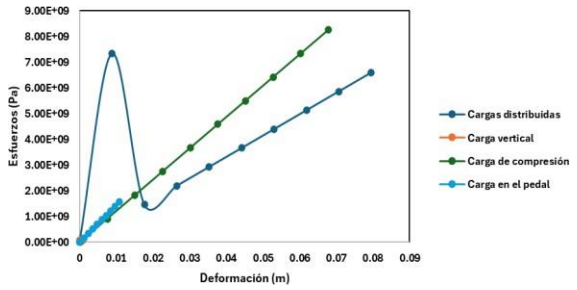


Figura 14. Esfuerzos vs deformaciones de la estructura a diferentes cargas

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Para esta parte, como se observa en la figura 1, las especificaciones que se usarán para la estructura del cuadro. De donde gracias a ello, en la figura 2 se puede observar los esfuerzos de von mises a lo largo de la estructura, los cuales son relativamente bajos, ya que se observa que en gran parte de la estructura se obtuvo un esfuerzo de 54.46 Pa, mientras que en ciertos puntos como la sección que conecta con la rueda trasera se obtuvo un esfuerzo de 6.5959 x 10^9 Pa.

En la figura 3 se observa que la estructura presenta deformaciones relativamente bajas, con un máximo de 0.079544 m en la parte delantera que conecta con el timón, mientras que en el resto de la estructura se observa como toma valores de entre 0.061868 y 0 m en la zona que conecta con la rueda trasera.

En la figura 4 se observa que el factor de seguridad es alto en casi toda la estructura, solo hay ciertos puntos que presentan un factor de seguridad igual a 0.037903 mientras que en casi el 99% de la estructura presenta un factor de seguridad entre 5 y 15.

En la figura 5, el análisis de deformación total en la estructura de bicicleta muestra una deformación máxima de 0.00094953 m (0.95 mm), concentrada en el tubo superior derecho y el tubo inferior izquierdo, según la escala de colores donde las áreas de mayor deformación se representan en tonos verde a rojo. Este valor máximo es bajo, lo cual indica que la estructura presenta buena rigidez y mantiene la estabilidad bajo carga. La longitud de la estructura es de aproximadamente 0.7 m, y la deformación mínima es de 0.0001055 m. Estos resultados sugieren que el diseño puede soportar adecuadamente las fuerzas típicas en condiciones normales de uso.

La figura 6 muestra un análisis de esfuerzo equivalente de von Mises en una estructura de bicicleta, donde el valor máximo alcanza 8.661 x 10^7 Pa y el mínimo es 9.2716 Pa. Los colores representan la distribución de esfuerzos, siendo las zonas de mayor esfuerzo aquellas en tonos verde y amarillo, localizadas principalmente en el tubo inclinado inferior. La longitud total de la estructura es de aproximadamente 0.7 m. Estos valores indican que ciertas áreas están sometidas a altos niveles de esfuerzo, lo cual es crucial para evaluar si el material y diseño de la estructura pueden resistir estas tensiones sin fallar.

La figura 7 muestra una simulación de ANSYS del factor de seguridad en un cuadro de bicicleta, donde el color azul indica un alto factor de seguridad (hasta 15) y el rojo representa las zonas con menor factor de seguridad (alrededor de 2.8864), indicando áreas bajo mayor estrés. La mayor parte del cuadro está en azul, lo que sugiere que soporta bien las cargas aplicadas, pero existen pequeñas zonas con menor factor de seguridad que podrían mejorarse para reforzar el cuadro o reducir material en áreas menos críticas.

La figura 8 muestra una simulación de ANSYS del esfuerzo equivalente (von Mises) en un cuadro de bicicleta, con valores en pascales. La escala de colores indica que los puntos de mayor esfuerzo alcanzan hasta 8.26 x 10^9 Pa en pequeños puntos de la estructura y los puntos de menor esfuerzo llegan a 4436.9 Pa en casi el 99% de la estructura. La mayor parte del cuadro está en colores oscuros, indicando bajos niveles de esfuerzo, lo cual sugiere que la estructura puede soportar bien las cargas aplicadas; sin embargo, hay algunas zonas con esfuerzos mayores, que podrían necesitar revisión para asegurar la integridad del diseño bajo condiciones de carga intensas.

La figura 9 muestra una simulación de ANSYS sobre la deformación total en un cuadro de bicicleta, con valores en metros. La escala de colores indica que la deformación máxima es de 0.067825 m en la parte que conecta con el timón y la mínima es 0 m en la parte trasera de la estructura. La mayoría

del cuadro presenta deformaciones bajas, con colores oscuros, lo que sugiere una buena rigidez estructural. Sin embargo, las áreas con deformación máxima, aunque pequeñas, podrían representar puntos de flexión bajo carga, lo cual sería importante considerar para mejorar la resistencia o estabilidad del diseño si es necesario.

La figura 10 muestra un análisis de factor de seguridad en un cuadro de bicicleta realizado en ANSYS, donde los colores indican las zonas de estrés: azul para áreas seguras (factor 15) y rojo para pequeños puntos de la estructura (factor mínimo 0.30262). Las zonas en amarillo y rojo, especialmente en las uniones de los tubos, presentan menor factor de seguridad, lo que sugiere una mayor susceptibilidad a fallas bajo carga. Esta información es útil para identificar puntos que podrían requerir refuerzo o materiales más resistentes, optimizando así la estructura para soportar mejor las cargas aplicadas aunque es mínimo ya que casi el 95% de la estructura presenta un factor de seguridad de entre 5 a 15.

La figura 11 muestra un análisis de esfuerzo equivalente (von Mises) en el cuadro de una bicicleta, indicando la distribución de tensiones en pascales. La escala de colores va desde 980.15 Pa (azul) hasta 1.5658 x 10^9 Pa (rojo), señalando que las áreas en azul están bajo menor esfuerzo y las zonas rojas son las más críticas. Aunque la mayoría del cuadro presenta un color azul, lo cual es positivo, las zonas con colores cálidos en las uniones pueden ser puntos vulnerables bajo carga extrema. Este análisis es útil para identificar posibles áreas de refuerzo en el diseño estructural.

La figura 12 muestra el análisis de deformación total del cuadro de bicicleta en ANSYS, con la deformación medida en metros. La escala de colores indica desde 0 (azul, sin deformación) hasta 0.010866 m (rojo, máxima deformación). Las áreas en rojo y amarillo, principalmente en el tubo horizontal y trasero, muestran mayores niveles de deformación bajo carga, mientras que las áreas en azul se deforman mínimamente. Este análisis es útil para identificar las zonas del cuadro que podrían necesitar refuerzo para mejorar la rigidez y minimizar la deformación bajo carga máxima esperada.

La figura 13 muestra un análisis de factor de seguridad donde los colores indican las zonas de estrés: azul para áreas seguras (factor 15) y rojo para pequeños puntos de la estructura (factor mínimo 0.15966). Las zonas en amarillo y algunos puntos de rojo, especialmente en las uniones de los tubos, presentan menor factor de seguridad, lo que sugiere una mayor susceptibilidad a fallas bajo carga. Esta información es útil para identificar puntos que podrían requerir refuerzo o materiales más resistentes, optimizando así la estructura para soportar mejor las cargas aplicadas aunque es mínimo ya que casi el 98% de la estructura presenta un factor de seguridad de entre 5 a 15.

En base a los resultados obtenidos en la tabla 7 de las simulaciones de deformación y esfuerzos, la conclusión es que el diseño actual del cuadro de bicicleta de acero es aceptable a pesar de que algunas áreas presentan esfuerzos de Von Mises dentro de un rango razonable (por ejemplo, 86.6 MPa en carga vertical, lo cual es seguro para el acero), otras zonas, como las cargas distribuidas (6.6 GPa) y compresión (8.26 GPa), muestran esfuerzos significativamente superiores al límite de fluencia del acero, lo que indica que estos pequeños puntos están en riesgo de sufrir fallos plásticos bajo cargas extremas. Además, la deformación máxima observada de 0.079544 m en cargas distribuidas es un poco alta, lo que refleja que la rigidez es aceptable pero se puede mejorar en algunas secciones del cuadro logrando así mayor estabilidad y rendimiento en terrenos accidentados. Aunque el factor de seguridad en la mayoría de las zonas del cuadro es aceptable (5 a 15), algunas áreas críticas, como las uniones, presentan valores de factor de seguridad de hasta 0.037903, lo que las hace vulnerables a la fatiga y fallos bajo cargas repetitivas. Por lo tanto, el diseño global del cuadro, aunque seguro en términos generales, requiere mejoras en ciertos puntos críticos.

Debido a lo mencionado en la tabla 7, la figura 14 sirve como retroalimentación del comportamiento de las cargas demostrando que los esfuerzos más altos son para las cargas de compresión alcanzando los 8.26 GPa, mientras que el caso óptimo es cuando se ejerce vertical y en el pedal donde los valores alcanzan los 86.6 MPa y 1.57 GPa respectivamente.

IV. DISCUSIÓN

* Los resultados muestran que los esfuerzos de Von Mises obtenidos en la simulación alcanzan valores significativamente más altos que los reportados en algunas fuentes. En el análisis realizado, los esfuerzos de Von Mises bajo cargas distribuidas llegan a 6.6 GPa (ver Figura 2), lo que es considerablemente mayor que los 9.82 MPa reportados para el acero en el análisis de arranque estático en [3]. Además, en la simulación de compresión (Figura 8), se observan esfuerzos de hasta 8.26 GPa, lo que también excede los 31.22 MPa observados en el acero en el análisis de impacto vertical de [7]. Estas diferencias sugieren que, aunque el diseño simulado indica una estructura de bicicleta capaz de soportar las cargas, ciertos puntos podrían estar sometidos a tensiones más altas que las consideradas en algunos estudios previos, lo que podría requerir un refuerzo en áreas críticas.

* En cuanto a la deformación, los resultados de la simulación también revelan valores más altos que los reportados en las fuentes consultadas. Por ejemplo, según [4], las deformaciones máximas para el acero en condiciones de impacto horizontal son de 0.0309 mm, mientras que en mi simulación, la deformación máxima registrada en condiciones de carga distribuida es de 0.079544 m (ver Figura 3), lo que representa una deformación considerablemente más significativa. Este valor indica que, aunque el diseño podría ser adecuado bajo condiciones de carga estándar, podría haber problemas de rigidez insuficiente en algunas zonas clave del cuadro, especialmente en aquellas partes que conectan con el timón. Esta mayor deformación podría comprometer la estabilidad del cuadro en condiciones de uso más exigentes, como en terrenos accidentados o bajo cargas dinámicas.

* Respecto al factor de seguridad, los resultados de la simulación muestran un comportamiento generalmente favorable en la mayoría de las áreas, con factores de seguridad que oscilan entre 5 y 15 (Figura 4). Sin embargo, algunos puntos críticos, como las uniones de los tubos, presentan factores de seguridad muy bajos, llegando a valores de 0.0379 en algunas zonas, lo cual podría ser motivo de preocupación. En comparación, la fuente [3] reporta que las tensiones máximas de Von Mises para el acero bajo cargas estáticas son de 8.3 MPa, lo que se considera dentro de un rango relativamente seguro para materiales como el acero. Sin embargo, las áreas en el modelo que presentan factores de seguridad bajos, en particular aquellas donde se concentran las cargas, podrían ser más susceptibles a fallas por fatiga o bajo cargas repetidas. La fuente [7] también indica que las tensiones en acero bajo impacto vertical pueden llegar hasta 31.22 MPa, lo que resalta la necesidad de revisar y posiblemente reforzar esas zonas críticas de baja seguridad en el diseño.
* Finalmente, en términos de comparación con otros materiales, los resultados muestran que el acero utilizado en el cuadro tiene un desempeño similar al de otros materiales en cuanto a esfuerzo y rigidez, aunque con algunas diferencias notables. Según [7], el acero alcanza esfuerzos de 6.38 MPa durante el pedaleo y 31.22 MPa bajo impacto vertical, mientras que en mi análisis el acero alcanza esfuerzos considerablemente más altos en ciertas áreas. Por otro lado, [4] menciona que el acero bajo arranque estático muestra esfuerzos de 9.82 MPa, lo que resulta ser significativamente menor que los 86.6 MPa observados en la simulación bajo cargas verticales. Esto sugiere que, aunque el diseño general podría ser adecuado, ciertas zonas del cuadro podrían estar sobrecargadas en comparación con los resultados obtenidos en los estudios revisados, lo que podría afectar la durabilidad y seguridad a largo plazo.

CONCLUSIONES

1. Se mejoró el diseño del Cuadro Hardtail MTB Frame ya que los esfuerzos de Von Mises obtenidos de la simulación de cargas distribuidas en la estructura muestran un esfuerzo máximo de 6.5959 x 10^9 Pa en la sección que conecta con la rueda trasera. En la mayoría de la estructura, los esfuerzos fueron relativamente bajos, con un valor promedio de 54.46 Pa. Esto indica que, aunque el diseño general muestra una distribución de esfuerzos adecuada, las zonas de mayor esfuerzo (como las uniones) deben ser reforzadas. La deformación máxima observada fue de 0.079544 m, concentrándose en la parte delantera que conecta con el timón, lo que también sugiere que se podría optimizar la rigidez en esa área para mejorar la resistencia a la fatiga.
2. Se verificó la mejora del material mediante simulación ya que en el análisis del factor de seguridad bajo cargas distribuidas, la mayor parte de la estructura presentó un factor de seguridad entre 5 y 15, lo cual es adecuado. Sin embargo, en ciertas zonas críticas, como las uniones, el factor de seguridad alcanzó un valor mínimo de 0.037903, lo cual indica un área susceptible a fallos bajo condiciones de carga extremas. Los esfuerzos de Von Mises en estas zonas alcanzaron valores cercanos a 6.5959 x 10^9 Pa. Esto sugiere que el material en estas zonas podría necesitar refuerzo o incluso una mejora en la aleación o tratamiento térmico para aumentar su resistencia a la fatiga.
3. Se determinó las curvas de fatiga de la estructura donde se muestra la relación entre los esfuerzos y deformaciones en el cuadro de una bicicleta bajo diferentes tipos de cargas. Para las cargas distribuidas y la carga de compresión, los esfuerzos aumentan linealmente hasta 8.0×10^9 Pa con deformaciones de hasta 0.08 m. La carga en el pedal alcanza un pico máximo de 9.0×10^9 Pa con una deformación de 0.015 m, mostrando un comportamiento no lineal. Por otro lado, la carga vertical genera menores esfuerzos, llegando a 5.0×10^9 Pa con una deformación de 0.05 m. Esto demuestra cómo el cuadro responde de manera distinta según el tipo y magnitud de la carga.
4. Se optimizó el diseño para incrementar la resistencia a la fatiga ya que en la simulación de cargas verticales, se observó que la deformación máxima fue de 0.00094953 m (0.95 mm) en los tubos superiores derecho e inferior izquierdo, lo que indica que la estructura es rígida y mantiene su estabilidad bajo carga. Sin embargo, en ciertas zonas como las uniones, los esfuerzos de Von Mises alcanzaron valores máximos de 8.661 x 10^7 Pa, lo cual indica que estas áreas están sometidas a esfuerzos elevados y podrían ser puntos críticos para la fatiga. El factor de seguridad en estas zonas fue bajo, con valores cercanos a 2.8864, lo que sugiere que se podrían mejorar estas zonas reforzando los tubos o utilizando materiales con mayor resistencia a los esfuerzos repetitivos. La mayor parte de la estructura mostró un factor de seguridad adecuado, con valores entre 5 y 15 en casi el 99% de la estructura. De manera similar, bajo cargas de compresión, los esfuerzos de Von Mises alcanzaron un valor máximo de 8.26 x 10^9 Pa en áreas específicas, mientras que en la mayor parte del cuadro los esfuerzos fueron bajos, alrededor de 4436.9 Pa. Estas zonas de mayor esfuerzo, aunque en menor cantidad, representan puntos críticos que deben ser reforzados para mejorar la resistencia general del cuadro a la fatiga.

RECOMENDACIONES

1. Aumentar el factor de seguridad a 3 en las uniones, donde los esfuerzos de Von Mises alcanzan 6.5959 x 10^9 Pa.
2. Utilizar aleaciones de aluminio de alta resistencia o acero cromo-molibdeno para mantener un factor de seguridad mínimo de 5, especialmente en áreas donde los esfuerzos de Von Mises llegan hasta 8.661 x 10^7 Pa.
3. Optimizar la geometría para reducir la deformación máxima a menos de 0.05 m en la zona delantera, donde la deformación máxima fue 0.079544 m.
4. Reforzar las zonas con factor de seguridad de 0.037903 y esfuerzos de compresión de 8.26 x 10^9 Pa para lograr un factor de seguridad mínimo de 3 y mejorar la resistencia a la fatiga.

V. RECONOCIMIENTO

A la Universidad Tecnológica del Perú, por el patrocinio de esta investigación.

VI. REFERENCIAS

[1] "Bicis de carbono o de aluminio: qué material es mejor", Aurum Bikes, 2024. Disponible en: https://aurumbikes.com/es/carbono-vs-aluminio/

[2] "Cuadros de bicicletas de acero", 32dientes.com. [En línea]. Disponible en: https://www.32dientes.com/cuadros-de-bicicletas-de-acero/

[3] "Principales materiales para el cuadro de bicicletas y cuál es mejor", Maquinabikes.com, 2023. [En línea]. Disponible en: https://maquinabikes.com/principales-materiales-para-el-cuadro-de-bicicletas-y-cual-es-mejor/

[4] "La relevancia de la norma ISO 4210 en la seguridad de motos y bicis", Normasiso.org, 2023. [En línea]. Disponible en: https://normasiso.org/norma-iso-4210/

[5] K. Khutal, G. Kathiresan, K. Ashok, B. Simhachalam, y D. Davidson Jebaseelan, "Design validation methodology for bicycle frames using finite element analysis", Mater. Today, vol. 22, pp. 1861–1869, 2020. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320318605

[6] D. Covill, S. Begg, E. Elton, M. Milne, R. Morris, y T. Katz, "Parametric finite element analysis of bicycle frame geometries", Procedia Eng., vol. 72, pp. 441–446, 2014. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814005931

[7] Sarath P, Akash Deepak, Hrishikesh H, Nimisha S. D., "Stress analysis of bicycle frame using different materials by FEA", Grdjournals, vol. 6, No. 7, pp. 14 - 20, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.grdjournals.com/uploads/article/GRDJE/V06/I07/0016/GRDJEV06I070016.pdf

[8] R. Gupta y G. V. Seshagiri Rao, "Analysis of mountain bike frame by F.e.m", IOSR-JMCE, vol. 13 No. 2, pp. 60 - 71, 2016. Disponible en: https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue2/Version-2/L1302026071.pdf

[9] D. P. Lauda y M. V. Donadon, "Carbon fiber bicycle frame analysis using finite element modeling", Org.br, 2011. Disponible en: https://abcm.org.br/app/webroot/anais/cobem/2011/PDF/053901.pdf

[10] C.-C. Lin, S.-J. Huang, y C.-C. Liu, "Structural analysis and optimization of bicycle frame designs", Adv. Mech. Eng., vol. 9, núm. 12, p. 168781401773951, 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/321854253_Structural_analysis_and_optimization_of_bicycle_frame_designs

[11] "29inch mountain bike frame cross-country class MountainBike disk Brake MTB frame", eBay. Disponible en: https://www.ebay.com/itm/176453053623?_trkparms=amclksrc%3DITM%26aid%3D1110006%26algo%3DHOMESPLICE.SIM%26ao%3D1%26asc%3D20231107084023%26meid%3Db898442821d34ea8a35518871b6925e9%26pid%3D101875%26rk%3D4%26rkt%3D4%26sd%3D326223063710%26itm%3D176453053623%26pmt%3D1%26noa%3D0%26pg%3D2332490%26algv%3DSimVIDwebV3WithCPCExpansion%26brand%3DUnbranded&_trksid=p2332490.c101875.m1851&itmprp=cksum%3A176453053623b898442821d34ea8a35518871b6925e9%7Cenc%3AAQAJAAABAIeU%252BizQ5PpchaJkCuOhDXf4e8tn5d6vwatFoqZsQvXjVa0XLlgUPjfHfGul8r1XATdSTejuktKtBHUFjjBvXpJOCxOrgw8cy3AAsHPfTK5vB2jWp7xGNVrNpYObIWYqWSwWwpksI3vVpOMQ%252BBKzN6eS3wtOrNVl%252BTFI4Hz23CcOnTVpcxRz5cp%252B7GISwwHTMOJKOrt1LZcGBflVAVF5bf4ySfWIf4zFgW2KFSsF5F4nFVxq1wcCVTpUg9mfkMF6lBQ7pquJ6AVPqvhPwSpB1MDj4FXw0UFhwsaU%252F5DcU98MWX0zZQ7W246YyaBKJDRbr4RJiEKsjCC%252Bps618%252BnGNiA%253D%7Campid%3APL_CLK%7Cclp%3A2332490&itmmeta=01J5KAHDJBSG2416N4R3XH4F7C

[12] "La guía definitiva de cuadros de bicicleta; ¿qué material es mejor?", tuvalum. Disponible en: https://tuvalum.com/blogs/novedades/guia-materiales-cuadros-bicicleta

[13] A. Conde de Andrés, "ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FATIGA DE UN CUADRO DE BICICLETA DE DOBLE SUSPENSIÓN", Universidad Carlos III de Madrid, pp. 1 - 119, Uc3m.es, 2015. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/7332b93c-472c-448f-92e1-c52ec4aac602/content

[14] "INVESTIGACIÓN APLICADA", Minciencias. Disponible en: https://minciencias.gov.co/glosario/investigacion-aplicada

[15] Velázquez, A. y Rey, N. (2004). Metodología de la Investigación Científica. Editorial San Marcos. Disponible en: https://fr.scribd.com/document/334825158/Metodologia-de-La-Investigacion-Cientifica-Velazquez-Rey

[16] Hernández-Sampieri, R. y Mendoza, C. (2018). Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Interamericana Editores S. A. Disponible en: http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/SampieriLasRutas.pdf

[17] B. Arteaga, "Sobre la población y muestra en investigaciones empíricas." Aula Magna 2.0, 2017. Disponible en: https://cuedespyd.hypotheses.org/2353#:~:text=Así%20por%20ejemplo%3A%20si%20se,a%20la%20de%20la%20población

[18] "Tubo Cédula 40", DIPAC. Disponible en: https://dipacmanta.com/producto/tuberia-sin-costura/tubo-cedula-40/tubo-cedula-40/

[19] INEI, "Instituto Nacional de Estadistica e Informatica", Gob.pe. Disponible en: https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/el-355-de-la-poblacion-peruana-de-15-y-mas-anos-de-edad-padece-de-sobrepeso-9161/