

Ingeniería Mecánica

2019-2020

*Trabajo Fin de Grado*

“Viabilidad del diseño de cuadros de bicicletas de grafeno”

---

Carlos Gómez Hernández

Tutora

Carolina Álvarez Caldas

Leganés

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

## Resumen

Esta memoria pretende realizar un estudio sobre la posibilidad de construcción de cuadros de bicicleta de fibra de grafeno, además se comparan otros materiales de construcción de cuadros de bicicleta.

Para comparar los distintos materiales de los cuadros, se realiza un modelo en Solid Edge que posteriormente se analice en el programa de elementos finitos Ansys, más en concreto, Mechanical APDL.

Mediante dicho software, se realizaran los mismos ensayos con cada cuadro con el fin de comparar los resultados de cada uno en cuanto a rigidez, deformación y ligereza.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis de los diferentes cuadros, se procede a una optimización del modelo del cuadro de fibra de grafeno para observar de manera más realista y precisa, las ventajas que puede tener respecto a otros materiales así como su cabida en el mercado del ciclismo profesional.



Contenido

1.	Antecedentes .....	13
1.1.	Historia y origen de la bicicleta.....	13
1.2.	Principales componentes de una bicicleta .....	18
1.3.	Tipos de bicicleta dependiendo de su funcionalidad.....	19
1.3.1.	Bicicletas de montaña.....	19
1.3.2.	Bicicletas de carretera .....	22
1.3.3.	Bicicletas para usos diversos .....	26
1.4.	Diferentes materiales utilizados en la construcción de cuadros de bicicletas .....	28
1.4.1.	Acero .....	28
1.4.2.	Aluminio.....	30
1.4.3.	Titanio .....	31
1.4.4.	Materiales compuestos .....	32
2.	Materiales compuestos.....	33
2.1.	Introducción .....	33
2.2.	Fibras.....	35
2.2.1.	Fibras de carbono .....	36
2.2.2.	Fibras de vidrio.....	38
2.2.3.	Fibras de Boro .....	40
2.2.4.	Fibras metálicas.....	41
2.3.	Matrices.....	41
2.3.1.	Matrices termoestables.....	42
2.3.2.	Resinas viniléster.....	43
2.3.3.	Resinas de esteres cianato .....	43
2.4.	Matrices termoplásticas.....	44
2.4.1.	Policloruro de vinilo (PVC) .....	44
2.4.2.	Polietileno (PE) .....	45
2.4.3.	Polipropileno (PP) .....	45
2.5.	Concepto de lámina.....	45
2.6.	Conceptos y características de la lámina.....	46
2.7.	Concepto de laminado.....	47
3.	Grafeno.....	48
3.1.	Introducción .....	48
3.2.	Fabricación del grafeno.....	49

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

3.3.	Características y propiedades del grafeno .....	50
3.3.1.	Propiedades térmicas .....	50
3.3.2.	Propiedades eléctricas .....	50
3.3.3.	Propiedades químicas .....	50
3.3.4.	Propiedades mecánicas .....	50
3.4.	Problemas de producción y coste del grafeno .....	51
4.	Modelado del cuadro en Solid Edge .....	51
4.1.	Modelos actuales en los que basar el modelo .....	52
4.2.	Diseño del cuadro a ensayar .....	54
4.2.1.	Dimensiones del cuadro de bicicleta .....	55
4.2.2.	Medidas del cuadro diseñado .....	57
4.3.	Realización del modelo en Solid Edge .....	58
5.	Análisis .....	60
5.1.	Fatiga de un material .....	61
5.2.	Curva S-N .....	62
5.2.1.	Parámetros modificativos del límite de fatiga .....	62
5.2.2.	Tipos de tensiones en fatiga .....	66
5.2.	Tipos de ensayo .....	69
5.2.1.	Ensayo de fuerza vertical .....	69
5.2.2.	Ensayo de fuerzas horizontales .....	71
5.2.3.	Ensayo de fuerzas de pedaleo .....	72
5.3.	Materiales de construcción de los cuadros en los ensayos .....	75
5.3.1.	Cuadro de acero .....	75
5.3.2.	Cuadro de aluminio .....	77
5.3.3.	Cuadro de titanio .....	79
5.3.4.	Cuadro de fibra de carbono .....	81
5.3.5.	Cuadro de fibra de carbono con GO .....	83
5.4.	Metodología para la resolución de los análisis .....	86
6.	Resultados .....	87
6.1.	Ensayo a fuerzas verticales .....	87
6.1.1.	Ensayo cuadro fabricado en acero .....	87
6.1.2.	Ensayo cuadro fabricado en aluminio .....	90
6.1.3.	Ensayo cuadro fabricado en titanio .....	92
6.1.4.	Ensayo cuadro fabricado con fibras de carbono .....	94
6.1.5.	Ensayo cuadro fabricado con fibras de carbono reforzadas con GO .....	97
6.2.	Ensayo a fuerzas de pedaleo .....	100

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

6.2.1.	Ensayo cuadro fabricado en acero.....	100
6.2.2.	Ensayo cuadro fabricado en aluminio .....	102
6.2.3.	Ensayo cuadro fabricado en titanio .....	105
6.2.4.	Ensayo cuadro fabricado con fibra de carbono .....	108
6.2.5.	Ensayo cuadro fabricado con fibras de carbono reforzadas con GO.....	110
6.3.	Ensayo a fuerzas horizontales .....	113
6.3.1.	Ensayo cuadro fabricado en acero.....	113
6.3.2.	Ensayo cuadro fabricado en aluminio .....	115
6.3.3.	Ensayo cuadro fabricado en titanio .....	118
6.3.4.	Ensayo cuadro fabricado con fibra de carbono .....	120
6.3.5.	Ensayo cuadro fabricado con fibra de carbono reforzado con GO.....	123
7.	Presupuesto .....	126
8.	Conclusiones .....	127
	Bibliografía .....	130

Índice de figuras

Figura 1.1. Ilustración de la bicicleta inventada por Karl Ludwing Drais [2] .....	13
Figura 1.2. Ilustración de la primera bicicleta con pedales .....	14
Figura 1.3. Ilustración de la bicicleta desarrollada por Pierre Michaux [2].....	14
Figura 1.4. Ilustración de bicicleta con rueda delantera de mayor tamaño .....	15
Figura 1.5. Ilustración de la conocida como “bicicleta de seguridad” [1].....	16
Figura 1.6. Ilustración de los primeros cambios de desarrollo en la transmisión [1] .....	17
Figura 1.7. Ilustración de las distintas partes de una bicicleta [3] .....	18
Figura 1.8. Bicicleta de cross country [4] .....	20
Figura 1.9. Bicicleta de trail [5].....	21
Figura 1.10. Bicicleta de enduro [5] .....	21
Figura 1.11. Bicicleta de descenso [5] .....	22
Figura 1.12. Bicicleta escaladora [5].....	23
Figura 1.13. Bicicleta de gran fondo [5] .....	23
Figura 1.14. Bicicleta aerodinámica [5].....	24
Figura 1.15. Bicicleta de contrarreloj [5].....	25
Figura 1.16. Bicicleta de triatlón [5] .....	26
Figura 1.17. Bicicleta gravel [5] .....	27
Figura 1.18. Bicicleta urbana [5].....	27
Figura 1.19. Bicicleta eléctrica [5] .....	28
Figura 1.20. Cuadro y horquilla de bicicleta fabricados en acero [6].....	29
Figura 1.21. Cuadro de bicicleta fabricado en aluminio [6] .....	30
Figura 1.22. Cuadro de bicicleta fabricado en titanio [6].....	31
Figura 1.23. Cuadro de bicicleta fabricado con material compuesto [6] .....	32
Figura 2.1. Diagrama tensión – deformación de un material compuesto [7] .....	34
Figura 2.2. Esquema de diferentes tipos de fibras [9] .....	35
Figura 2.3. Estructura molecular del PVC.....	44
Figura 2.4. Tipos de orientación de las fibras en los materiales compuestos.....	46
Figura 3.1. Esquema grafeno [11] .....	49
Figura 4.1. Bicicleta Trek Madone SLR 8 [12] .....	52
Figura 4.2. Bicicleta Orbea OMX [13] .....	53
Figura 4.3. Bicicleta Merida Reacto [14] .....	54
Figura 4.4. Esquema medidas bicicleta [13].....	55
Figura 4.5. Alzado del modelo desarrollado en Solid Edge .....	59
Figura 4.6. Vista isométrica del cuadro desarrollado en Solid Edge .....	59
Figura 4.7. Vista de alzado y planta del modelo desarrollado .....	60
Figura 5.1. Curva tensión-deformación [15] .....	62
Figura 5.2. Gráfica teoría de Goodman [16] .....	67
Figura 5.3. Gráfica teoría de Soderberg [16].....	68
Figura 5.4. Gráfica teoría de Gerber [16] .....	69
Figura 5.5. Esquema ensayo fuerzas verticales.....	70
Figura 5.6. Esquema ensayo fuerzas horizontales .....	72
Figura 5.7. Esquema ensayo fuerzas de pedaleo .....	74
Figura 5.8. Curva S-N del acero .....	77
Figura 5.9. Curva S-N del aluminio .....	79

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Figura 5.10. Curva S-N del Titanio .....	81
Figura 5.11. Curva S-N fibra de carbono .....	82
Figura 5.12. Comparación módulo de Young [17].....	84
Figura 5.13. Variación módulo de Young y límite elástico [17].....	84
Figura.6.1. Validación Goodman cuadro acero con fuerzas verticales .....	87
Figura 6.2. Tensión de Von Misses cuadro acero con fuerzas verticales .....	88
Figura 6.3. Deformación acero con fuerzas verticales .....	89
Figura 6.4. Validación Goodman cuadro aluminio con fuerzas verticales .....	90
Figura 6.5. Tensión Von Misses aluminio con fuerzas verticales .....	91
Figura 6.6. Deformación aluminio con fuerzas verticales .....	91
Figura 6.7. Validación Goodman cuadro titanio con fuerzas verticales.....	92
Figura 6.8. Tension de Von Misses titanio con fuerzas verticales.....	93
Figura 6.9. Deformación cuadro titanio con fuerzas verticales .....	93
Figura 6.10. Validación Goodman fibra de carbono con fuerzas verticales.....	95
Figura 6.11. Tensión Von Mises cuadro fibra carbono con fuerzas verticales.....	95
Figura 6.12. Deformación fibra de carbono con fuerzas verticales .....	96
Figura 6.13. Validación Goodman fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales ..	97
Figura 6.14. Tensión Von Mises cuadro de fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales .....	98
Figura 6.15. Deformación fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales .....	99
Figura 6.16. Validación Goodman cuadro acero con fuerzas de pedaleo.....	100
Figura 6.17. Tensión Von Mises cuadro acero con fuerzas de pedaleo .....	101
Figura 6.18. Deformación cuadro acero con fuerzas de pedaleo .....	101
Figura 6.19. Validación Goodman cuadro aluminio con fuerzas de pedaleo.....	103
Figura 6.20. Tensión Von Mises cuadro aluminio con fuerzas de pedaleo.....	103
Figura 6.21. Deformación cuadro aluminio con fuerzas de pedaleo .....	104
Figura 6.22. Validación cuadro titanio con fuerzas de pedaleo .....	105
Figura 6.23. Tensión Von Mises cuadro titanio con fuerzas de pedaleo .....	106
Figura 6.24. Deformación cuadro titanio con fuerzas de pedaleo.....	106
Figura 6.25. Validación Goodman cuadro de fibra de carbono con fuerzas de pedaleo .....	108
Figura 6.26. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono con fuerzas de pedaleo .....	109
Figura 6.27. Deformación fibra de carbono con fuerzas de pedaleo.....	109
Figura 6.28. Validación Goodman fibra de carbono reforzada con Go con fuerzas de pedaleo .....	110
Figura 6.29. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono reforzada con Go con fuerzas de pedaleo.....	111
Figura 6.30. Deformación cuadro fibra de carbono reforzada con Go con fuerzas de pedaleo	112
Figura 6.31. Validación Goodman cuadro acero con fuerzas horizontales.....	113
Figura 6.32. Tensión Von Mises cuadro acero con fuerzas horizontales .....	114
Figura 6.33. Deformación cuadro acero con fuerzas horizontales .....	114
Figura 6.34. Validación cuadro aluminio con fuerzas horizontales.....	115
Figura 6.35. Tensión Von Mises cuadro aluminio con fuerzas horizontales.....	116
Figura 6.36. Deformación cuadro aluminio con fuerzas horizontales .....	117
Figura 6.37. Validación Goodman cuadro titanio con fuerzas horizontales .....	118
Figura 6.38. Tensión Von Misses cuadro titanio con fuerzas horizontales .....	119
Figura 6.39. Deformación cuadro titanio con fuerzas horizontales.....	119
Figura 6.40. Validación cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales.....	120
Figura 6.41. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales .....	121

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Figura 6.42. Deformación cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales..... 122

Figura 6.43. Validación Goodman cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales..... 123

Figura 6.44. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales..... 124

Figura 6.45. Deformación cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales ..... 124

Índice de tablas

Tabla 2-1. Distintos tipos de fibras y matrices en materiales compuestos.....	34
Tabla 2-2. Tipos de fibras de carbono .....	37
Tabla 2-3. Tipos de fibras de vidrio .....	39
Tabla 2-4. Propiedades de la fibra de boro .....	41
Tabla 2-5. Tipos de matrices en materiales compuestos.....	42
Tabla 2-6. Tipos de resinas epoxi .....	43
Tabla 2-7. Propiedades de resinas esteres cianato.....	44
Tabla 4-1. Dimensiones del cuadro a desarrollar.....	58
Tabla 5-1. Coeficiente Ka de fatiga.....	63
Tabla 5-2. Coeficiente Kc de fatiga.....	64
Tabla 5-3. Coeficiente Kf de fatiga .....	65
Tabla 5-4. Fuerzas en ensayo de fuerzas horizontales (2) .....	72
Tabla 5-5. Cargas aplicadas en el hueco de pedal derecho .....	73
Tabla 5-6. Cargas aplicadas en el hueco de pedal izquierdo.....	74
Tabla 5-7. Fuerzas ensayo fuerzas de pedaleo.....	74
Tabla 5-5-8. Propiedades del acero.....	75
Tabla 5-9. Factor de corrección Ka del acero .....	76
Tabla 5-10. Propiedades del aluminio.....	77
Tabla 5-11. Factor de corrección Ka del aluminio.....	78
Tabla 5-12. Propiedades del Titanio.....	79
Tabla 5-13. Factor de corrección Ka del titanio .....	80
Tabla 5-14. Propiedades de la fibra de carbono. ....	81
Tabla 5-15. Factor de corrección Ka fibra de carbono .....	82
Tabla 5-16. Propiedades fibra de carbono reforzada con GO.....	85
Tabla 5-17. Coeficiente de corrección ka para fibra de carbono reforzada con GO.....	85
Tabla 6-1. Resultados acero con fuerzas verticales .....	89
Tabla 6-2. Resultados cuadro aluminio fuerzas verticales.....	92
Tabla 6-3. Resultados cuadro titanio con fuerzas verticales.....	94
Tabla 6-4. Resultados cuadro de fibra de carbono con fuerzas verticales.....	96
Tabla 6-5. Resultados cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales .....	99
Tabla 6-6. Resultados cuadro acero con fuerzas pedaleo.....	102
Tabla 6-7. Resultados cuadro acero con fuerzas de pedaleo.....	104
Tabla 6-8. Resultados cuadro titanio con fuerzas de pedaleo .....	107
Tabla 6-9. Resultados cuadro fibra de carbono con fuerzas de pedaleo .....	110
Tabla 6-10. Resultados cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas de pedaleo...	112
Tabla 6-11. Resultados cuadro acero con fuerzas horizontales.....	115
Tabla 6-12. Resultados cuadro aluminio con fuerzas horizontales.....	117
Tabla 6-13. Resultados cuadro titanio con fuerzas horizontales .....	120
Tabla 6-14. Resultados cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales .....	122
Tabla 6-15. Resultados cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales.	125
Tabla 7-1. Presupuesto proyecto .....	126



## 1. Antecedentes

### 1.1. Historia y origen de la bicicleta

La primera bicicleta se le atribuye al inventor alemán Karl Christian Ludwig Drais (1785-1851). Esta bicicleta, que data de 1817 era propulsada por la fuerza que realizaba el conductor con los pies contra el suelo. [1]



*Figura 1.1. Ilustración de la bicicleta inventada por Karl Ludwig Drais [2]*

Este nuevo vehículo que posteriormente fue denominado “bicicleta” fue un signo de distinción social y sustitutivo del transporte a caballo.

La primera gran evolución del modelo inicial del inventor alemán fue la sustitución en la forma de propulsión del vehículo. Este modelo fue creado por el escocés Kirkpatrick Macmillan, que incorporó unas palancas que permitían transmitir el par procedente de las piernas del conductor a la rueda trasera.

Este herrero escocés es considerado como el inventor de la bicicleta a pedales.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno



*Figura 1.2. Ilustración de la primera bicicleta con pedales*

Ya en el año 1861, Pierre Michaux y su hijo realizan un modelo de velocípedo que constaba de dos bielas y un eje fijo en la rueda delantera, sistema parecido al de las bicicletas actuales y que se sigue usando por ejemplo en triciclos infantiles.



*Figura 1.3. Ilustración de la bicicleta desarrollada por Pierre Michaux [2]*

Este modelo fue la raíz de una nueva línea de diseño de este tipo de vehículos pero ahora se enfrentaban a otro impedimento, la poca velocidad que se podían alcanzar con el modelo de Pierre Michaux.

Por este motivo en Inglaterra en torno al año 1870, se desarrolla un velocípedo con la rueda motriz (delantera) de mayor diámetro que la trasera. Con esta innovación se consigue avanzar una mayor distancia por cada vuelta del eje de los pedales.



*Figura 1.4. Ilustración de bicicleta con rueda delantera de mayor tamaño*

El récord de altura de este tipo vehículos lo logró Víctor Renard con un diámetro de la rueda de dos metros y medio. Este vehículo lograba recorrer siete con ochenta y cinco metros por cada vuelta del eje de pedaliar.

Con esta innovación se lograban velocidades de desplazamiento muy altas pero también causaban bastante dificultad de manejo. Eran vehículos muy inestables que requerían de un gran manejo, por lo que fueron usados sobre todo en competición.

Para garantizar el uso cotidiano de este vehículo, se impusieron estandarizaciones en el diseño tales como un máximo en la medida del diámetro de las ruedas, quedando en cifras de uno con dos metros para la delantera y de cero con cuatro metros para la trasera. Así se conseguía un vehículo más estable y por lo tanto más útil para un uso cotidiano.

A pesar de la estandarización, no se consiguió extender su uso a toda la población debido a seguir requiriendo una notable destreza debido a su inestabilidad.

El reto de los consiguientes modelos era este, conseguir extender su uso a toda la población, facilitando el manejo del vehículo.

Con este reto presente, y debido a dos grandes innovaciones, nace la denominada “bicicleta de seguridad” en contraposición a sus peligrosas antecesoras. Este vehículo conseguía reducir de una manera notable la distancia del ciclista al suelo. Esta bicicleta se desarrolló gracias a dos principales innovaciones, la cadena de transmisión y el neumático.



*Figura 1.5. Ilustración de la conocida como “bicicleta de seguridad” [1]*

La cadena lograba transferir el par entre dos ejes separados, en este caso desde el eje de pedaliador hasta la rueda trasera. Este hecho consiguió que el vehículo tuviera dos ruedas del mismo tamaño, reduciendo así la altura del ciclista respecto del suelo.

El neumático de caucho, creado por John Boyd Dunlop, logró que la bicicleta de seguridad tuviera un agarre con el terreno mucho mayor que sus antecesoras.

Este modelo de bicicleta significa la base para modelos posteriores e incluso en la actualidad la geometría y los componentes tienen cierta similitud.

Desde la denominada “bicicleta de seguridad” como base, los modelos van incorporando diversas innovaciones sobretodo enfocadas a competiciones cada vez más populares como el Tour de Francia. Estas competiciones son un escaparate perfecto para las cada vez más numerosas marcas de bicicletas y componentes, para después ampliar dichas innovaciones al uso cotidiano.

Una de las principales innovaciones fue posibilitar el cambio de desarrollo. Hasta la fecha, en competiciones, se optaba por incorporar a la rueda trasera dos piñones con diferentes números de dientes, uno a cada lado de la misma. Así, cuando se deseaba cambiar el desarrollo el ciclista debía bajar del vehículo y dar la vuelta a la rueda trasera, cambiando así el número de piñones del engranaje y por lo tanto el desarrollo del sistema de transmisión.

Con la incorporación de los cambios, el ciclista solo debía mover un desviador para lograr variar el par desarrollado. Este hecho supuso una revolución en las

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

competiciones, ya que permitía realizar la etapa en menor tiempo y con mayor comodidad.



*Figura 1.6. Ilustración de los primeros cambios de desarrollo en la transmisión [1]*

Aunque sin ninguna duda, las mayores innovaciones desde la “bicicleta de seguridad” se han llevado a cabo en el ámbito de los materiales de construcción de bicicletas que van desde el pesado acero hasta el aluminio, fibra de carbono o titanio. La mayoría de las bicicletas se fabricaban en madera y más tarde en acero.

Este material era muy resistente, duradero y rígido pero la densidad era bastante alta. Fue entonces cuando se comenzó a usar el aluminio, que siendo un poco menos resistente que el acero, la densidad era mucho menor. Este hecho reducía el peso total de la bicicleta de manera significativa. El peso en el mundo de la bicicleta cada vez va cobrando más importancia, ya que sobre todo a la hora de subir grandes puertos, un exceso de peso significaba mucha diferencia sobre todo en competición.

Las grandes compañías de la industria de la bicicleta compiten en los años 90 por conseguir reducir cada vez más el peso y ya no solo en un tipo de bicicletas, cada vez surgen más disciplinas distintas como la bicicleta de montaña. De esta casi obsesión con el peso, el desarrollo de nuevos materiales es continua y surge la incorporación de los materiales compuestos a la industria.

Estos materiales, en concreto la fibra de carbono, se utilizan cada vez más en todas las disciplinas de la bicicleta y cada vez se utiliza el material de una forma más eficaz y óptima, provocando una disminución del peso final de la bicicleta, que puede estar por debajo de los 6 kilos en la actualidad.

## 1.2. Principales componentes de una bicicleta



Figura 1.7. Ilustración de las distintas partes de una bicicleta [3]

- 1- Sillín. El sillín es uno de los tres apoyos del ciclista con la bicicleta. Sobre este componente recae la mayor parte del peso del ciclista. Además de poseer una gran resistencia debe asegurar la comodidad y la salud del ciclista, por este motivo debe ser constituido por materiales rígidos como la fibra de carbono o aluminio y por materiales elásticos como siliconas o geles.
- 2- Cuadro. El cuadro de una bicicleta es la base en la que se montan el resto de las componentes, y es la parte de la bicicleta que soporta casi todos los esfuerzos que se generan por su uso, tales como el peso propio del ciclista o los baches del terreno.
- 3- Potencia. Componente que une el manillar con el tubo de la horquilla, que a su vez está unido al cuadro.
- 4- Manillar. Esta parte de la bicicleta debe cumplir dos funciones, una es resistir parte del peso del ciclista y otra es permitir al ciclista realizar cambios de dirección del vehículo.
- 5- Manetas de freno y cambio. Palancas que sirven para que el ciclista accione el sistema de freno y realice un cambio desarrollo de los engranajes del cambio.
- 6- Puente de freno. Parte de la bicicleta que permite reducir la velocidad del vehículo mediante la presión de dos zapatas contra la rueda.

- 7- Rueda. Parte móvil del vehículo y único contacto de este con el suelo. Debe absorber parte de las irregularidades del terreno y permite el cambio de dirección del vehículo.
- 8- Horquilla. Componente de la bicicleta que une la rueda delantera y la potencia. Gracias a esta pieza también se transmite el cambio de dirección del vehículo desde el manillar hasta la rueda.
- 9- Desviador. Pieza móvil que empuja o tira de la cadena desplazándola por los diferentes engranajes que posea la bicicleta.
- 10- Biel. Palanca que absorbe la fuerza ejercida por el ciclista al pedal y la transforma como giro al eje de pedalier.
- 11- Plato. Engranaje que gira solidario con el eje de pedalier, y por lo tanto es la pieza que permite realizar la transmisión de par de dicho eje al eje de la rueda trasera.
- 12- Cadena de transmisión. Componente que posibilita la transmisión del par desde el eje de pedalier hasta el eje de la rueda trasera.
- 13- Cambio trasero. Elemento que mueve la cadena de transmisión a través de los diferentes engranajes acoplados en la rueda trasera
- 14- Piñones. Engranajes colocados uno al lado del otro con diferente número de dientes. La cadena de transmisión engrana en uno u otro piñón para que así se obtenga una relación de transmisión distinta.
- 15- Tija. Tubo recto que une el cuadro con el sillín.

### 1.3. Tipos de bicicleta dependiendo de su funcionalidad

En este apartado se ven los diferentes tipos de bicicletas existentes dependiendo de su función a realizar.

#### 1.3.1. Bicicletas de montaña

Bicicletas diseñadas prioritariamente para circular sobre terrenos no asfaltados e irregulares, por lo que, los modelos de este tipo de bicicletas incorporan unos neumáticos con un mayor ancho y un sistema de frenado con disco de freno que

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

aumenta la potencia de frenado. También incorporan un manillar más ancho para aumentar la manejabilidad.

Las diferentes modalidades del ciclismo de montaña se detallan a continuación:

- Cross country

Disciplina que se practica en montaña pero no por senderos demasiado complejos. La importancia de este tipo de práctica recae en las subidas, por lo que la bicicleta debe ser ligera y el cuadro rígido y comúnmente equipan únicamente amortiguación delantera.

Dichas características hacen que esta bicicleta no sea la mejor en las bajadas ni en terrenos muy irregulares pero si son rápidas en subidas y pistas.



*Figura 1.8. Bicicleta de cross country [4]*

- Trail

Tipo de bicicleta equilibrada que se comporta bastante bien en todos los tipos de terrenos y perfiles. Suelen equipar tanto amortiguación delantera como trasera y de mayor recorrido que la anterior disciplina.

El peso no tiene tanta importancia como en el cross country por lo que no es común el uso de fibra de carbono en la construcción del cuadro de las mismas.

El uso de la doble suspensión las hace menos rápidas en las subidas pero favorece las bajadas más irregulares, por lo que además, equipa un manillar más ancho y una tija telescópica, que permite subir y bajar el sillín a gusto del usuario.



*Figura 1.9. Bicicleta de trail [5]*

- Enduro

Esta disciplina va un paso más allá y aun favorece más las bajadas en decremento de las subidas. En las bajadas es una bicicleta muy ágil y agresiva.

El cuadro de la bicicleta es más corto y equipa tanto amortiguador trasero como delantero y de mayor recorrido que el anterior tipo de bicicleta de montaña. Equipa también un manillar más ancho y de doble altura para facilitar su manejo en bajadas complejas.



*Figura 1.10. Bicicleta de enduro [5]*

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

### - Descenso

La geometría de este tipo de bicicletas está enteramente destinada a las bajadas. Por ello el cuadro es muy resistente y equipa doble suspensión de gran recorrido, manillar muy ancho para favorecer el manejo, tija telescópica y frenos de disco hidráulico para desarrollar un gran par de frenada.

El sillín suele estar siempre abajo para que el ciclista se pueda mover libremente en las bajadas y en ningún momento suponga peligro alguno para este.

Los neumáticos utilizados son de gran anchura para favorecer la adherencia y la amortiguación por terrenos de gran irregularidad.



*Figura 1.11. Bicicleta de descenso [5]*

### 1.3.2. Bicicletas de carretera

#### - Bicicleta escaladora

Bicicleta de carretera específica para su uso en subidas de gran pendiente y longitud. Estas bicicletas destacan por su reducido peso y su gran rigidez. El cuadro se compone de tubos de reducido diámetro y el material más usado es la fibra de carbono, ya que es el material más ligero utilizado para la construcción de cuadros de bicicletas.

Los componentes instalados en la bicicleta deben ser también lo más ligero posibles por lo que el sistema de frenos utilizado suele ser el tradicional sistema de freno de zapata, que es más ligero que el nuevo sistema de discos.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

El perfil de las ruedas suele ser bajo ya que se prima la ligereza a la aerodinámica, debido a que la velocidad en subidas es baja y la aerodinámica no cobra un papel tan relevante.



*Figura 1.12. Bicicleta escaladora [5]*

### - Bicicleta Gran Fondo

Bicicleta concebida para asegurar el confort del ciclista y así poder cubrir una larga distancia.

El cuadro es menos rígido que el de la bicicleta escaladora y flexa mínimamente para absorber las irregularidades de la carretera y así conseguir una mayor comodidad del usuario.

Estas bicicletas equipan un mayor balón de neumático y un tubo vertical mayor para que la postura del ciclista sea más relajada. Estas características hacen que no sea una bicicleta destinada a la competición y su mercado está enfocado únicamente a ciclistas aficionados.



*Figura 1.13. Bicicleta de gran fondo [5]*

- Bicicletas Aero.

Bicicletas creadas para lograr un gran rendimiento en decremento de la comodidad sobre todo en terrenos llanos o de media montaña, donde la velocidad de desplazamiento es alta.

Los cuadros y los componentes de estas bicicletas son creados para ofrecer la menor resistencia al aire posible. Los tubos adquieren formas más complejas que reducen la resistencia con el aire. También son bicicletas que obligan a adoptar una postura agresiva y aerodinámica al usuario.

Estas bicicletas son utilizadas por muchos ciclistas profesionales debido a su gran competitividad.



*Figura 1.14. Bicicleta aerodinámica [5]*

- Bicicletas de contrarreloj.

Bicicleta muy específica. Únicamente usada para recorridos relativamente cortos y que se deben recorrer en solitario.

El ciclista circula sin un pelotón que le proteja del viento por lo que la postura que se adopta en estas bicicletas es muy aerodinámica. Esto se consigue gracias a un manillar que hace llevar los brazos muy juntos haciendo que el ciclista adopte una forma de flecha que hace que la resistencia contra el viento sea mucho menor.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

El cuadro de esta bicicleta es similar a las del tipo aero. Con tubos con formas aerodinámicas y en donde el peso no adquiere una importancia tal y como lo hace en las bicicletas escaladoras.

El material más usado es la fibra de carbono ya que usualmente este tipo de bicicletas están enfocados a un uso profesional.



*Figura 1.15. Bicicleta de contrarreloj [5]*

### - Bicicletas de triatlón

Bicicletas con una geometría y un manillar muy similar a las bicicletas de contrarreloj, pero cumplen diferente función. En competiciones tales como el triatlón o los ironman, se recorren una gran cantidad de kilómetros, pero estos se hacen en solitario.

Debido a esto se necesita que estas bicicletas sean aerodinámicas pero que sean cómodas para recorrer una gran distancia. Por eso la postura es algo más relajada respecto a las bicicletas de contrarreloj. Además, equipan diferentes dispositivos para almacenar bebidas, comida y herramientas.



*Figura 1.16. Bicicleta de triatlón [5]*

### 1.3.3. Bicicletas para usos diversos

#### - Bicicletas gravel

La geometría de este tipo de bicicletas es similar a la de las bicicletas de ruta o carretera, pero deben cumplir la función de rodar por caminos de grava o similar terreno sin demasiadas irregularidades.

Para ello, el cuadro debe tener una gran resistencia y equipar unas ruedas de mayor grosor con un dibujo más pronunciado, incluso incorporar tacos al neumático.

Estas características reúnen las condiciones para que esta bicicleta pueda recorrer pistas y senderos fáciles con una alta velocidad, ya que se trata de una bicicleta rígida y el ciclista adopta una posición bastante agresiva y aerodinámica.

El peso suele ser mayor que el de las bicicletas de ruta porque debe ser más resistente pero aun así es más ligera que las bicicletas destinadas a la montaña. El material más común para este tipo de bicicletas es el aluminio o la fibra de carbono para las gamas más altas.



*Figura 1.17. Bicicleta gravel [5]*

- Bicicleta urbana

Bicicleta concebida para su uso dentro de un entorno urbano y de recorridos relativamente cortos.

En este tipo de bicicletas se da la mayor importancia a la comodidad del usuario por lo que la posición que adopta este, es muy erguida y relajada.

No suele equipar amortiguadores, ya que el terreno por el que circula es muy regular y el balón del neumático es estrecho para reducir el rozamiento de este contra el asfalto. El material más utilizado para este tipo de bicicletas es el aluminio, debido a su ligereza y su precio contenido.



*Figura 1.18. Bicicleta urbana [5]*

- Bicicleta eléctrica

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Bicicleta que equipa un motor eléctrico que coopera con el usuario para facilitar a este la tarea de pedaleo.

Este motor únicamente entra en funcionamiento si el ciclista pedalea y siempre si se circula por debajo de los 25 km/h. El uso de estas bicicletas es variado, ya que el motor se instala en bicicletas de carretera, montaña y urbanas.



*Figura 1.19. Bicicleta eléctrica [5]*

### 1.4. Diferentes materiales utilizados en la construcción de cuadros de bicicletas

En este apartado se pretende realizar una definición de los principales materiales usados en la construcción de cuadros de bicicleta, así como el mercado en el que se encuentran cada uno de ellos.

#### 1.4.1. Acero

El acero es el único material con el que se construían cuadros de bicicleta hasta la década de los años 70.

Este material posee unas propiedades mecánicas que lo hacían ideal para su uso en esta industria. El acero tiene una gran resistencia y rigidez, y se usaba para bicicletas de competición como para su uso como transporte. Soportaba las cargas a las que era sometida la pieza y su vida útil era bastante prolongada, aunque la resistencia a la corrosión no es muy elevada.

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde este último elemento únicamente conforma un 2% del peso total como máximo.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Existen por tanto numerosos tipos de acero dependiendo del porcentaje de carbono que contengan:

- Acero extra suave: El contenido en carbono de este acero es menor al 0.15% en peso. Se trata de un tipo de acero fácilmente soldable y deformable y tiene una resistencia última y una dureza aproximada de 35 kg/mm<sup>2</sup> y 110 HB.
- Acero dulce: El carbono existente en este acero es no superior al 0.25%. Tiene buena soldabilidad y presenta una resistencia última aproximada de 50 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 150 HB.
- Acero semidulce: Presenta un porcentaje de carbono aproximado del 0.35% de peso. Tiene una resistencia última aproximada de 60 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 160 HB.
- Acero semiduro: El acero contiene un porcentaje de carbono aproximado del 0.45%. Su resistencia última es aproximadamente de 65 Kg/mm<sup>2</sup> y dureza de 240 HB.
- Acero duro: Este tipo de acero contiene alrededor de un 0.55% de carbono y tiene una resistencia última de 75 Kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 210 HB. Mediante un tratamiento térmico de temple puede alcanzar una resistencia última de 100 Kg/mm<sup>2</sup>.

En la industria de la bicicleta además de los tipos mencionados, también se utilizan aleaciones como en acero cromoly, que ofrece una mayor resistencia, pero con un mayor coste.

El acero por tanto se trata de un material económico, manejable y con buena soldabilidad, aunque bastante pesado. Este hecho hace que en la actualidad haya sido sustituido por materiales más ligeros, y solamente sea utilizado en algunas bicicletas de gama baja de estética clásica.



*Figura 1.20. Cuadro y horquilla de bicicleta fabricados en acero [6]*

### 1.4.2. Aluminio

Los cuadros de aluminio desde su aparición en el mercado desbancaron a los cuadros fabricados en acero debido a su menor peso.

En la actualidad sigue siendo el material más comúnmente usado para cuadros de bicicleta ya que es un material bastante equilibrado. El aluminio es un material muy abundante en la corteza terrestre y posee unas buenas propiedades mecánicas.

Tiene una gran resistencia específica, es decir, su resistencia es elevada en relación con su peso y ofrece buena resistencia a la corrosión, aunque debido a su bajo punto de fusión, requiere su manejabilidad de mayor complejidad que el acero.

El tipo de aluminio más utilizado en el sector de la construcción de cuadros de bicicleta es el aluminio 6061. Este aluminio es una aleación de magnesio y silicio.

Posee este aluminio una gran resistencia frente a la corrosión y permite una buena soldabilidad, característica muy importante que permite la buena unión entre los tubos que componen el cuadro.



*Figura 1.21. Cuadro de bicicleta fabricado en aluminio [6]*

Este aluminio para esta aplicación se trata mediante un templado específico que permite aumentar la resistencia de este.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Este material por las características mencionadas anteriormente es muy equilibrado en cuanto a propiedades mecánicas, peso y coste. En la actualidad es el material más usado sobre todo en gamas medias y bajas, aunque dependiendo de la función que luego el cuadro realice, puede ser usado también en gamas altas.

### 1.4.3. Titanio

El titanio es el noveno metal más abundante en la naturaleza, pero su extracción y procesado son complejos, por lo que el producto final suele tener un alto coste.

Los cuadros de bicicleta de titanio, debido a su coste, no son muy comunes y suelen reservarse únicamente para gamas altas y ediciones limitadas exclusivas. Este material posee muy buenas propiedades mecánicas. Tiene una densidad muy baja, en torno a 4.5 g/cm<sup>3</sup>. Posee una alta resistencia a la corrosión, y gran resistencia específica, por lo que la vida útil del cuadro de titanio es muy alta.



*Figura 1.22. Cuadro de bicicleta fabricado en titanio [6]*

Los cuadros de titanio de acuerdo con lo dicho anteriormente tienen un reducido mercado, ya que tiene unas propiedades similares a las del aluminio, pero siendo bastante más costoso. Este hecho hace que estos cuadros sean vendidos por una cuestión de estética y exclusividad.

#### 1.4.4. Materiales compuestos

En la actualidad, es el material más usado en gamas altas y medias en cuadros destinados a una bicicleta de carretera y también se instalan en muchas bicicletas de montaña, en disciplinas como el cross country, donde el peso cobra mucha importancia.

Los materiales compuestos en bicicletas comienzan a desarrollarse en la década de los 90. Suponen una gran revolución ya que se conseguía un peso mucho menor manteniendo e incluso mejorando propiedades mecánicas del aluminio, material más comúnmente utilizado hasta entonces.



*Figura 1.23. Cuadro de bicicleta fabricado con material compuesto [6]*

También permite este tipo de materiales poder realizar geometrías más complejas mediante una fabricación por moldeo.

El material compuesto más utilizado es el de matriz de resina epoxi con un refuerzo de fibras de carbono.

Este tipo de materiales se explicarán en mayor profundidad en siguientes capítulos.

## 2. Materiales compuestos

### 2.1. Introducción

Un material compuesto presenta comúnmente dos tipos de elementos:

- Matriz
- Refuerzo

Las propiedades de estos elementos individualmente y el tipo y calidad de unión que se produzcan entre ellos, propician las propiedades del material compuesto en conjunto. Además de estos dos tipos de elementos se pueden componer de otros llamados aditivos o cargas que doten al material de una característica particular que puede ser de utilidad para realizar su función final o para facilitar de alguna forma su fabricación.

<b>Tipos de fibras</b>
Fibras cerámicas (Carburo de silicio, alúmina)
Fibras metálicas
Fibras inorgánicas (Carbono, vidrio)
Fibras orgánicas (Aramida, polietileno)

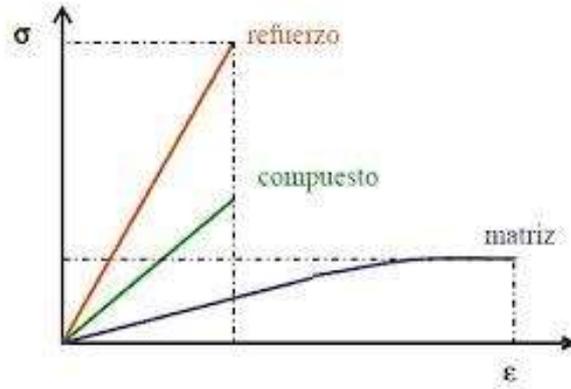


Figura 2.1. Diagrama tensión – deformación de un material compuesto [7]

Existen numerosos tipos de materiales compuestos en función de la naturaleza de los elementos que lo componen.

Tabla 2-1. Distintos tipos de fibras y compuestos

matrices en materiales

<b>Tipos de matrices</b>
Matrices termoestables (Epoxi, polieteramida)
Matrices termoplásticas (polipropileno, policarbonato)
Matrices inorgánicas (Yeso, cemento)

El refuerzo en un material compuesto aporta la resistencia mecánica y la rigidez y será la parte determinante en las propiedades del producto compuesto final.

La matriz en cambio será la parte de unión entre los refuerzos y cuya función principal será la de transmitir los esfuerzos a través de los refuerzos. La densidad de la matriz debe ser baja para asegurar que el producto final sea ligero.

## 2.2.Fibras

Las fibras deben aportar rigidez y resistencia al material, por lo tanto, su resistencia a la tracción debe ser alto al igual que su módulo de Young. [8]

Se pueden clasificar dependiendo de su origen en:

- Fibras de origen mineral: fibras cerámicas, fibras metálicas...
- Fibras de origen orgánicos: Aramida. Polietileno...

Dependiendo de las condiciones a las que sea sometida la pieza final, estos refuerzos pueden estar dispuestos en el material de diferente forma. Pueden disponerse en forma de fibras, ya sean cortas o largas o disponerse de forma unidireccional o aleatoria.

Este parámetro determinará la forma de trabajo de la pieza en las diferentes direcciones que se dispongan. Por ello, se dispondrán de uno u otra manera dependiendo de la función a realizar.

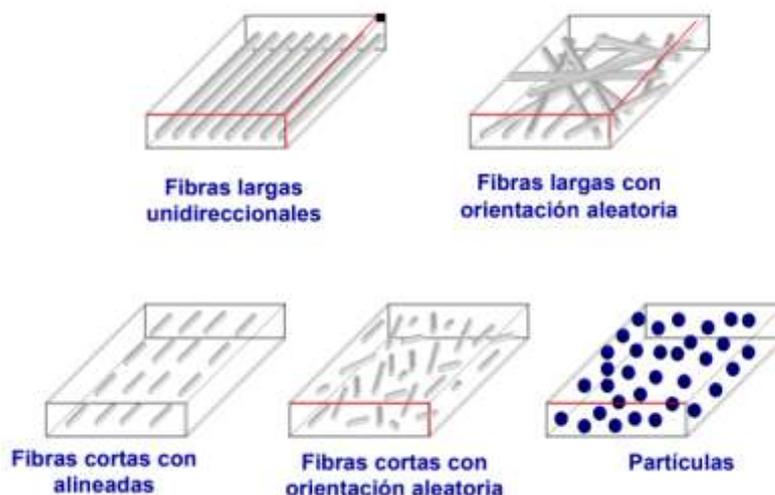


Figura 2.2. Esquema de diferentes tipos de fibras [9]

### 2.2.1. Fibras de carbono

Las fibras de carbono ya fueron utilizadas en el siglo XIX como filamento de bombillas y como material compuesto moderno, se fechan sus primeros trabajos en los años 70 en Japón.

Las fibras de carbono son de mucha utilidad en aplicaciones estructurales ya que es muy poco sensible a la fatiga o cargas cíclicas variantes. También tiene muy buen comportamiento estático debido a su alto módulo y resistencia.

Estas buenas propiedades mecánicas unido a su baja densidad ( $1.6 \text{ Kg/dm}^3$ ) hacen que la fibra de carbono se utilice en numerosas aplicaciones del ámbito aeroespacial y de transporte. El coste de la fibra de carbono, debido al aumento de la demanda en numerosas disciplinas, está bajando de forma sustancial.

#### 2.2.1.1. Tipos de fibras de carbono

Se distinguen principalmente tres tipos de fibra de carbono en función del calentamiento:

- Fibra de carbono (III): Tiene la rigidez más baja que los siguientes tipos pero también es la más barata debido a necesitar una menor temperatura en su fabricación.
- Fibra de carbono de alta resistencia (HR): Fibra con mayor dureza que el resto de los tipos y se carboniza a una temperatura que le proporciona la mayor resistencia a tracción.
- Fibra de carbono de alto módulo (HM): Fibra que requiere la mayor temperatura de calentamiento, hecho que provoca que sea la fibra más rígida de las tres.

#### 2.2.1.2. Propiedades de la fibra de carbono

La fibra de carbono posee unas buenas propiedades mecánicas que la hacen ideal para muchas aplicaciones.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- Posee un módulo de elasticidad y una resistencia a la tracción elevadas en comparación sobre todo con su baja densidad.
- La expansión térmica es muy leve si la matriz usada es una de tipo termostable.
- Las fibras de carbono no trabajan en régimen elástico, coincidiendo su límite de rotura con el límite elástico.
- Elevado coste de fabricación y, por tanto, de producto final.
- Baja resistencia al impacto.

Tabla 2-2. Tipos de fibras de carbono

Tipo de fibra	Alto módulo (HM)	Alta resistencia (HR)	Tipo III
Diámetro de hilo (µm)	7	8	7
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	1810-1870	1740-1760	1820
Resistencia a tracción (GPa)	2.1-2.7	2.6-5	3.1
Módulo de elasticidad (GPa)	390	230	290
Coefficiente expansión térmica (10 <sup>-6</sup> *°C <sup>-1</sup> )	2.56	2.56	2.56

### 2.2.1.3. Procesamiento de la fibra de carbono

Las fibras de carbono se fabrican mediante una descomposición de precursores de diferentes fibras orgánicas. Este proceso se llama pirólisis, y consiste en la descomposición térmica en una atmósfera exenta de oxígeno.

Se pueden distinguir principalmente tres tipos de precursores, que darán diferentes tipos de fibras de carbono:

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- Precursores de alquitrán: Las fibras que se producen son las más baratas, ya que la transformación suele tener un rendimiento alto.
- Precursores de Rayón: Deriva de materiales provenientes de la celulosa y prácticamente en la actualidad este proceso no es utilizado debido a la mala transformación que se da, incrementando el coste del proceso.
- Precursores PAN: La transformación que produce estas fibras tiene un rendimiento bastante alto y en la actualidad, la mayoría de las fibras se fabrican a partir de este precursor.

El procedimiento para seguir para lograr fibras de carbono a partir de los diferentes tipos de precursores es similar. Primeramente, un filamento del precursor se oxida a baja temperatura para luego someterlo a un proceso de carbonización. Este proceso consiste en someter al filamento a una temperatura mucho mayor (800°C aproximadamente) en una atmósfera libre de oxígeno. Tras este proceso se produce un nuevo calentamiento a una temperatura muy superior, cercana a los 2000°C, donde se produce una mejora en la orientación de los cristales y el tamaño de los mismos aumenta.

Para finalizar el proceso, la fibra puede someterse a tratamientos superficiales dependiendo del objetivo final requerido.

### 2.2.2. Fibras de vidrio

La fibra de vidrio es en la actualidad el refuerzo más usado debido a sus buenas propiedades mecánicas, su alta disponibilidad y su bajo coste de fabricación.

Los primeros trabajos relacionados con los materiales compuestos en el ámbito de la ingeniería se realizaron con refuerzos de fibra de vidrio.

El módulo de elasticidad, así como la resistencia a tracción son menores que en la hace que este refuerzo sea usado en múltiples campos para cargas no demasiado exigentes.

#### 2.2.2.1. Tipos de fibras de vidrio

- Vidrio E: Tiene muy buenas propiedades eléctricas.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- Vidrio A: Menos resistente que el anterior vidrio pero tiene muy buena resistencia química.
- Vidrio AR: Puede estar presente junto con el cemento o el hormigón. Esta propiedad hace que este vidrio esté muy presente en elementos estructurales.
- Vidrio C: Se utiliza como aislante de la corrosión por su gran resistencia química.
- Vidrio R, vidrio S: Vidrios empleados en elementos estructurales en ámbitos como la aeronáutica. Este tipo de vidrio presenta muy buenas propiedades mecánicas contra la fatiga.
- Vidrio D: Tipo de vidrio con buenas propiedades dieléctricas.
- Vidrio B: Vidrio con buenas propiedades eléctricas.

### 2.2.2.2.Principales propiedades de la fibra de vidrio

La fibra de vidrio consiste fundamentalmente en la asociación de diversos óxidos que pasan posteriormente por estriado. La fibra de vidrio tiene principalmente las siguientes características:

- Alta resistencia mecánica
- No propaga la llama. Incombustible
- Escasa conductividad eléctrica
- Alta flexibilidad
- Ofrece buena adherencia con la matriz
- Bajo coste de fabricación y obtención. Material que resulta más barato que la fibra de carbono, siendo esta su principal ventaja.

Tabla 2-3. Tipos de fibras de vidrio

Designación	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (µm)	5-13	10-20	10	10
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2500	2580	2480	2590
Resistencia a	3.1	3.4	4.59	3.4-4.4

tracción (GPa)				
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72.5	86	85
Coefficiente de expansión térmica ( $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	8.6	5	5.1	5

### 2.2.3. Fibras de Boro

El boro es un elemento químico que tiene propiedades semiconductoras, posee una gran dureza y tiene una temperatura de fusión alta.

#### 2.2.3.1. Tipos de fibra de boro dependiendo del modo de obtención

Dependiendo del sustrato usado para obtener la fibra, podemos distinguir dos tipos de fibras de boro:

- Fibras de boro obtenidas por deposición en sustrato de tungsteno: Método usado desde los años 60. Se obtiene la fibra dejando sobre un alambre de tungsteno boro en estado vapor. Al alambre se le somete a un calentamiento en una atmósfera específica de hidrógeno.

El boro se deposita sobre el alambre después de producirse la descomposición del tricloruro de boro.

Este proceso de fabricación tiene un elevado coste debido al alto precio que tiene el tungsteno. Sin embargo, este proceso en la actualidad, es el más utilizado.

- Fibras de boro por deposición en sustrato de carbono: Este proceso de fabricación es más económico que el anterior, ya que el sustrato tiene menor coste.

Pese a esto, no es el procedimiento más usado debido a la complejidad que conlleva realizarlo. Durante la deposición del boro en el alambre, existen unos esfuerzos internos residuales debido al crecimiento de las deformaciones de los sustratos.

### 2.2.3.2. Propiedades de la fibra de boro

Tabla 2-4. Propiedades de la fibra de boro

Designación	Fibra de boro
Diámetro del hilo (pm)	100-140
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2570
Resistencia a la tracción (GPa)	3.6
Módulo de elasticidad (GPa)	400
Coefficiente de expansión térmica (10 <sup>-6</sup> *°C <sup>-1</sup> )	4.9

### 2.2.4. Fibras metálicas

La densidad y el coste de este tipo de fibras son mayores que el del resto de fibras aquí mencionadas. Sin embargo, este tipo de fibras puede presentar una característica que la haga ideal para una función determinada. Son fibras que normalmente se envuelven en una matriz también metálica.

Las principales fibras metálicas y su principal característica se presentan a continuación:

- Aceros inoxidables: Presenta buenas propiedades frente a la corrosión.
- Cobre: Buena conductividad.
- Aluminio: Relativa baja densidad y buen conductor térmico y eléctrico.
- Hierro: Buenas propiedades mecánicas. Tiene un alto módulo elástico y buena resistencia a la tracción.

## 2.3. Matrices

Las matrices dentro de un material compuesto son la parte encargada de transmitir los esfuerzos entre fibras y mantener cohesionado al conjunto.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Existen diferentes matrices en función de su naturaleza, tal y como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 2-5. Tipos de matrices en materiales compuestos

Inorgánicas	Matrices cerámicas, matrices metálicas, cemento.	
Orgánicas	Termoestables	Matriz epoxi, poliéster, polieteramida.
	Termoplásticas	Polipropileno (PP), poliestireno (PS).

Las matrices más usadas son las de origen orgánico, que a su vez se dividen en matrices termoestables y termoplásticas.

### 2.3.1. Matrices termoestables

Matrices que, al incrementar la temperatura, no sufren un cambio en su estado, es decir, no pueden variar su estado de sólido a líquido.

#### 2.3.1.1. Resinas epoxi

Son un tipo de matrices termoestables, es decir, un incremento de temperatura no cambia el estado físico de la misma. Las primeras matrices de resinas epoxi en aplicaciones de materiales compuestos data de los años 50. Destacan por su buena adhesión con diferentes fibras como las de carbono o vidrio.

Estas resinas tienen buenas propiedades mecánicas, eléctricas y sobretodo térmicas, ya que solo se contrae durante su curado alrededor de un 4%, mientras que los poliésteres pueden llegar al 10%. En cambio, las resinas epoxi no trabajan tan bien como los poliésteres a altas temperaturas y su coste suele ser mayor.

### 2.3.1.2. Tipos de resinas epoxi

Existen dos principales tipos de resina en función de dos estructuras químicas diferentes:

- TGMDA: Componente principal de resinas enfocadas a materiales compuestos que cumplan funciones muy específicas de alta tecnología.
- Bisfenol A: Resina más común en todos los ámbitos. Las propiedades mecánicas son menores que las resinas TGMDA aunque tiene mayor deformación a rotura y menor porcentaje de absorción de agua.

Tabla 2-6. Tipos de resinas epoxi

	TGMDA	Bisfenol A
Módulo de Young (GPa)	3.8-4.5	2.7-3.4
Deformación a rotura (%)	1-2	5-8
Absorción de agua (%)	4-6	2-3

### 2.3.2. Resinas viniléster

Las resinas viniléster son bastante recientes y han tenido un desarrollo bastante importante desde entonces. Este tipo de resinas tiene buenas propiedades mecánicas, por ser, sobre todo, muy poco sensibles a la fatiga.

Posee buenas cualidades de adhesión a las distintas fibras de refuerzo y ofrece una buena resistencia a la corrosión.

### 2.3.3. Resinas de esteres cianato

Tipo de matrices que ofrecen resistencia y dureza altas además de buenas propiedades eléctricas y resistencia a la corrosión. Son endurecidas comúnmente con termoplásticos y su curado es más sencillo que el proceso que se lleva a cabo para la producción de las resinas epoxi.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Tabla 2-7. Propiedades de resinas esteres cianato

Densidad (kg/dm <sup>3</sup> )	1.25
Resistencia a tracción (MPa)	35
Módulo de Young (MPa)	3000
Elongación (%)	2

### 2.4. Matrices termoplásticas

Matrices que pueden plastificar o fundir si se exponen a un incremento suficiente de temperatura.

Estas matrices se desarrollan para obtener materiales compuestos que resistan altas temperaturas y conseguir una resistencia más alta ante impacto. Además, el coste de fabricación de este tipo de resinas es menor que el de las resinas termoestables. Esta razón, unida a su facilidad de reciclaje, hace que este tipo de resinas estén en pleno desarrollo.

#### 2.4.1. Policloruro de vinilo (PVC)

El PVC admite numerosos aditivos, algunos son indispensables y otros se añaden en función de las características buscadas. Este motivo provoca que este producto tenga gran popularidad en diversos ámbitos que requieran funciones específicas.

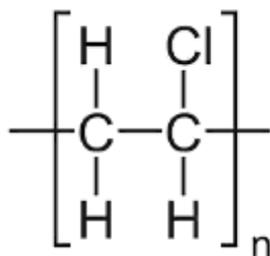


Figura 2.3. Estructura molecular del PVC

Esta matriz no destaca por sus propiedades mecánicas pero posee una buena resistencia química y un buen comportamiento a agentes externos.

#### 2.4.2. Polietileno (PE)

El polietileno destaca por su flexibilidad, buena resistencia química y dieléctrica, por lo que una de sus principales aplicaciones es la de aislamientos de cables.

#### 2.4.3. Polipropileno (PP)

El polipropileno presenta una especial característica, en cierta orientación permite una flexión casi ilimitada (efecto bisagra). Permite moldear numerosos objetos de una sola pieza.

### 2.5. Concepto de lámina

Los materiales compuestos forman láminas que posteriormente se agrupan para dar lugar a diversos laminados en función de las propiedades, cantidad y orientación de cada lámina.

Las características de la lámina vienen dadas en función de las propiedades del refuerzo y la matriz y la cantidad presente de cada una.

Dependiendo de la orientación y forma de la fibra, se pueden identificar tres tipos de láminas:

- Lámina tipo mat: las fibras son de pequeño tamaño y su orientación es aleatoria. Las propiedades de este tipo de láminas se consideran isótropas, es decir, que no dependen de la dirección de ensayo.
- Lámina en forma de tejido: las fibras son de gran tamaño y se orientan en dos direcciones perpendiculares entre sí. Este tipo de lámina se considera que posee propiedades ortotrópicas.
- Lámina unidireccional: las fibras largas se orientan en una única dirección, haciendo que esta tenga unas propiedades mejores que la dirección perpendicular. Se considera un material anisótropo.

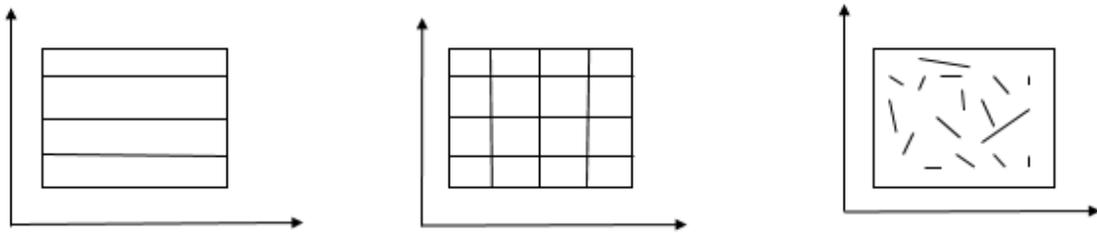


Figura 2.4. Tipos de orientación de las fibras en los materiales compuestos

## 2.6. Conceptos y características de la lámina

- Contenido volumétrico de refuerzo y de matriz: es el volumen que representa una de las dos partes del material frente al total. Se indica en tanto por uno.

$$V_f = \frac{\text{Volumen de fibras}}{\text{Volumen total}} \quad (2.1)$$

$$V_m = \frac{\text{Volumen matriz}}{\text{Volumen total}} \quad (2.2)$$

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.3)$$

- Densidad del compuesto: la densidad de la lámina depende de la densidad de sus constituyentes y de la proporción presente de cada uno de ellos (Regla de las mezclas).

$$\rho = \rho_m * v_m + \rho_f * v_f \quad (2.4)$$

- Nivel de porosidad: indica el porcentaje de poros presentes en la lámina. Esta característica es determinante en aspectos como la resistencia a cortadura o fatiga.
- Hipótesis propiedades de la fibra: las fibras se tratan como materiales homogéneos, elásticos lineales e isótropos. Además los refuerzos se suponen en todos momentos homogéneamente repartidos por la lámina.
- Hipótesis propiedades matriz: el material de la matriz se considera, al igual que el de las fibras, isótropo, elástico lineal y homogéneo.

- Hipótesis láminas unidireccionales: se considera como un material ortótropo con una unión de los elementos perfecta y no se considera en ningún momento la porosidad que pudiera estar presente.
- Obtención del módulo de Young en la dirección principal: igual que pasa con la densidad de la lámina, el módulo de Young en la dirección principal depende de los módulos de los constituyentes y de su presencia volumétrica en la lámina.

$$E = E_m * (1 - v_f) + E_f * v_f \quad (2.5)$$

### 2.7. Concepto de laminado

Los laminados son un conjunto de láminas superpuestas normalmente con diferente orientación. Permitiendo lograr unas propiedades de laminado específicas para cada requerimiento.

Las láminas se orientan usualmente en tres direcciones principalmente:

- 0°: los ejes locales y globales coinciden. Este tipo de lámina trabaja óptimamente en la dirección principal.
- 90°: los ejes locales y globales son perpendiculares. La lámina trabaja de forma óptima dirección trasversal a la principal.
- ±45°: los ejes locales y globales forman 45° y trabajan de igual manera en la principal y la trasversal a esta. Se pueden orientar formando 45° positivos o negativos.

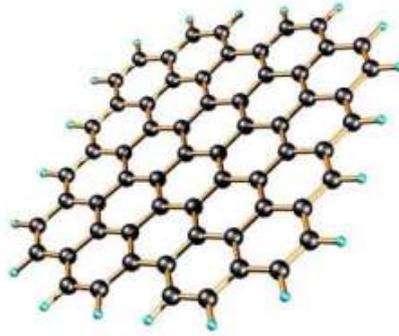
Mediante una combinación de láminas conseguimos un conjunto con mejores propiedades mecánicas, y además, debido a la formación de laminados con partes de distintas orientaciones, se puede crear un material con buenas propiedades mecánicas en distintas direcciones. De esta forma se conseguimos que el material trabaje de forma óptima bajo varios tipos de requerimientos.

### 3. Grafeno

#### 3.1. Introducción

El grafeno, al igual que el grafito, es un alótropo del carbono. Se trata de una única capa de átomos de carbono en formación hexagonal. [10]

El grafeno fue aislado por primera vez por los físicos Andre K. Geim y Konstantin S. Novoselov a partir del grafito en 2004, pero fue más tarde, cuando en 2010 los descubridores de este material, ganaron el Nobel de física.



*Figura 3.1. Esquema grafeno [11]*

Este material en la actualidad está en pleno desarrollo debido a sus sorprendentemente buenas propiedades tanto eléctricas como térmicas y mecánicas.

### 3.2. Fabricación del grafeno

Se trata de un proceso complejo, ya que hay que separar una única capa de carbono a partir del grafito.

- Exfoliación mecánica: la primera manera de obtención de grafeno consiste en pegar un celo en una superficie de grafito, para así extraer una capa de carbono. Esta técnica conseguía extraer grafeno a partir de grafito altamente orientado, pero tenía muchas limitaciones como la imposibilidad de controlar el tamaño y la orientación de las láminas.
- Solución de exfoliación: en esta técnica se parte de polvos de grafito, que son oxidados y posteriormente centrifugados obteniéndose así el llamado “óxido de grafeno reducido”. Este proceso produce numerosas impurezas debido a las oxidaciones y reducciones incompletas.
- Crecimiento epitaxial utilizando SiC como catalizador: el grafeno que se obtiene mediante este proceso tiene láminas con alta movilidad pero las condiciones de síntesis son muy estrictas por lo que este método no está muy extendido en la producción a gran escala.

### 3.3. Características y propiedades del grafeno

El grafeno tiene unas propiedades muy diversas e interesantes para muchos tipos de aplicaciones en ámbitos muy distintos. Dependiendo del modo de producción utilizado, se puede obtener grafeno con propiedades variadas dependiendo del uso al que esté destinado.

#### 3.3.1. Propiedades térmicas

El grafeno es un material con una conductividad muy alta de en torno a 5000 W/m.k.

#### 3.3.2. Propiedades eléctricas

El grafeno es un material con un alto desarrollo en el ámbito de la electrónica, ya que el grafeno tiene una muy alta conductividad térmica y eléctrica.

Debido a su estructura de hibridación  $sp^3$ , los electrones pueden moverse libremente por toda la lámina.

#### 3.3.3. Propiedades químicas

El grafeno posee una alta resistencia contra la corrosión. Resiste a ataques microbianos y a la oxidación de manera eficaz.

Debido a esta propiedad, y a que se trata de una muy fina capa de material, se podría utilizar como capa protectora de otros materiales sin modificar en exceso las propiedades del material protegido. Esto si ocurre con otras capas protectoras fabricadas con otros materiales, que la capa es de mayor espesor.

#### 3.3.4. Propiedades mecánicas

El grafeno posee muy buenas propiedades mecánicas. Esto es debido al tipo de enlace entre carbonos que contiene, que permite incluso la auto reparación.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Se trata de un material con un grosor aproximado de 0.34 nm y su densidad es muy baja.

El módulo de Young de este material es de 1 Terapascal. Esta propiedad unida a su baja densidad sitúa al grafeno como un material cien veces más resistente que el acero y seis veces más ligero aproximadamente.

### 3.4. Problemas de producción y coste del grafeno

Se puede producir grafeno por distintos métodos, más o menos costosos. Pero darán lugar a grafeno de distinta calidad.

El grafeno de menor calidad se puede producir en mayor volumen, pero es también un proceso complejo y costoso.

Actualmente existen alternativas al grafeno como es el óxido de grafeno o de los copos de grafeno. La producción de estas alternativas es menos compleja y costosa aunque sus propiedades no son tan destacadas.

## 4. Modelado del cuadro en Solid Edge

En este apartado se tratan los aspectos importantes en los que se basa el diseño del cuadro.

En la actualidad existen numerosos tipos de cuadros para distintas las disciplinas del ciclismo, pero también, dentro de una misma disciplina, se pueden encontrar distintos tipos de cuadros dependiendo del nivel del deportista y del tipo de especialidad que realice, ya sea por ejemplo, escalador, rodador o sprinter.

Debido a las propiedades del grafeno, material del cuadro que más en profundidad se quiere estudiar, se realiza un cuadro aerodinámico y ligero.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

El cuadro pretende ser ligero para afrontar con ventaja las subidas a la par que aerodinámico. Estos son dos conceptos que en la actualidad no se dan juntos, ya que si pretendemos que sea muy ligero, no puede ser aerodinámico y viceversa.

### 4.1. Modelos actuales en los que basar el modelo

El modelo pretende ser aerodinámico, y en la actualidad existen numerosos modelos con esta característica, ya que cada vez se da más importancia a la misma.

Los modelos actuales en los que se basa el modelo son los siguientes:

- Trek Madone SLR 8: Se trata de un modelo del año 2019 construido en fibra de carbono. Por la geometría del cuadro, esta bicicleta entra dentro del tipo aerodinámicas.



*Figura 4.1. Bicicleta Trek Madone SLR 8 [12]*

Los tubos son de perfil aerodinámicos y los cables están ocultos por el interior de los tubos para minimizar al extremo el rozamiento con el aire.

Este tipo de bicicletas por lo tanto, priman la competitividad al máximo y se dirigen por tanto a un mercado ciclista semiprofesional o profesional. Por esta razón se toma como referencia para el diseño del cuadro, ya que también, está enfocado a un mercado profesional debido a su ligereza y precio.

- Orbea OMX: Modelo, al igual que la Trek Madone SLR 8, enfocado a la aerodinámica y al rendimiento en decremento de la comodidad y el confort.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

El cuadro que monta este modelo contiene tubos con perfiles aerodinámicos pero pretendiendo ser también un cuadro muy ligero y con un perfil escalador.



*Figura 4.2. Bicicleta Orbea OMX [13]*

Además, de este modelo también destaca la unión de las vainas traseras con el tubo vertical, que se unen en una posición más baja que la mayoría de modelos. Esto parece ser una tendencia en los modelos del próximo año y los cuadros ofrecen unos mejores resultados en rigidez torsional.

- Bicicleta Merida Reacto Disc 4000 2019: Modelo de bicicleta que monta un cuadro aerodinámico con tubos de sección variable. El modelo a diseñar basa sus tubos diagonal y vertical en este modelo Merida Reacto.



*Figura 4.3. Bicicleta Merida Reacto [14]*

#### 4.2. Diseño del cuadro a ensayar

Para realizar el diseño, se utiliza el software Solid Edge 2020 (Siemens). Este software permite diseñar un modelo para posteriormente fabricarlo o exportarlo a otro programa para realizar una simulación por elementos finitos.

Lo primero que se debe tener en cuenta cuando se pretende diseñar un cuadro de bicicleta es concretar la función que se va a realizar con él.

En este caso la bicicleta estará destinada al mercado del ciclismo profesional debido a las buenas propiedades del grafeno. Debido a esto, el modelo que se debe realizar debe cumplir con las expectativas del mercado actual.

La tendencia de todos los fabricantes en la actualidad es abandonar el sistema de frenos tradicional (zapata) e incorporar en los modelos el sistema de frenado con disco. Esto modifica el cuadro, ya que se deben colocar acoples cerca del eje de cada rueda y no se considerarán agujeros en la parte superior de las ruedas, donde iría el sistema de frenos tradicional.

También se tendrá en cuenta la importancia que recae sobre la aerodinámica actualmente. Los fabricantes de cuadros de bicicleta, realizan los modelos de alta gama de acuerdo a pruebas en túneles de viento y simuladores de resistencia al aire.

Por esta razón, los tubos del cuadro, que habitualmente se realizaban con forma cilíndrica, ya no se fabrican de esta manera. Se construyen en la actualidad en su mayoría con secciones variables y formas complejas para, además de ser más

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

aerodinámicos, estar más optimizados en peso. Ya que, en las zonas más requeridas se debe poner un mayor diámetro equivalente y en las zonas menos requeridas basta con un menor diámetro. De esta manera el diseño cumple las expectativas de un mercado profesional que demanda por igual aerodinámica y ligereza.

Además de las propiedades mencionadas anteriormente, sobre las que recaerá la mayor importancia, también se debe tener en cuenta aspectos como la estética y la ergonomía.

### 4.2.1. Dimensiones del cuadro de bicicleta

Un aspecto de mucha importancia en el ciclismo profesional es la biomecánica y la ergonomía.

Una buena posición sobre la bicicleta no solo hace que aumente el confort del ciclista, que debe permanecer muchas horas sobre la bicicleta, sino que, se puede lograr una mayor aerodinámica y una mayor eficiencia del pedaleo con una correcta posición en la pedalada.

La bicicleta se debe adaptar a la fisionomía de cada ciclista y los fabricantes elaboran cada modelo en distintas tallas, normalmente desde la 47 a la 60, pero depende de cada fabricante y modelo dentro del mismo.

Por esta razón, se tendrán muy en cuenta las medidas del cuadro a diseñar. Estas medidas se hacen en base a las tallas y medidas del fabricante Orbea, ya que cada uno de los fabricantes varía las medidas de cada talla.

Las medidas del cuadro se describen a continuación:

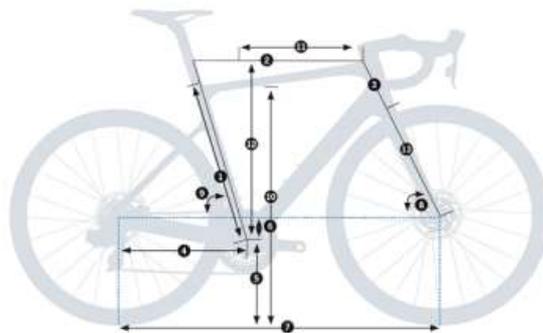


Figura 4.4. Esquema medidas bicicleta [13]

1. Medida del tubo vertical. Tubo vertical que une el eje de pedalier con el tubo horizontal. Este tubo, en su parte superior contiene la tija del sillín.

2. Medida del tubo horizontal. Tubo horizontal que une la pipa de la dirección con el tubo vertical. Medida notablemente importante para el ajuste del grado de inclinación de la espalda del ciclista. Normalmente esta medida será mayor si la bicicleta está enfocada a la competición para lograr una mayor aerodinámica y menor si se trata de un uso recreativo para aumentar el confort del usuario.

3. Medida de la pipa de dirección. Tubo corto vertical que contiene en su interior la horquilla de dirección. A este tubo se le conoce por dicho motivo como pipa de dirección. Este tubo, al estar en la parte más adelantada del cuadro de la bicicleta, tiene una gran importancia en la aerodinámica, por lo que los perfiles de esta pieza se han perfeccionado mucho.

4. Medida de las vainas traseras. Par de tubos que sostienen el eje de la rueda trasera y lo unen con el tubo del eje de pedalier.

Medida con una gran importancia, ya que, si las vainas son cortas, la bicicleta será más rígida y reactiva, mientras que, si la longitud de los tubos es mayor, la bicicleta será menos reactiva pero el ciclista obtendrá un menor confort.

5. Altura desde el suelo hasta el eje de pedalier. Esta distancia carece de la importancia de otras medidas, aunque si puede variar la posición del ciclista y la aerodinámica del conjunto bicicleta- ciclista. También hace que el ciclista esté a una mayor o menor altura respecto del suelo, hecho que interviene en la seguridad del usuario, que ante un imprevisto, necesitará una mejor reacción si la altura es mayor.

6. Altura desde el eje de pedalier hasta el eje de las ruedas. Al igual que la anterior medida. Una mayor o menor medida influirá en la posición del usuario sobre la bicicleta.

7. Longitud de los ejes de las ruedas. Medida de alta importancia para definir el comportamiento de la bicicleta. Si este parámetro es corto, la bicicleta será más rígida y explosiva y en cambio, con una medida mayor, la bicicleta no será tan rígida y se obtendrá un mayor confort. Por esta razón, las bicicletas enfocadas a la competición, tienden a tener una longitud cada vez menor.

8. Ángulo de la pipa de la dirección respecto del eje horizontal. Cuanto menor sea este ángulo, mayor será la estabilidad de la bicicleta, pero también se incrementa la longitud entre ejes. En competición el ángulo es mayor pero suficiente para que la rueda delantera no choque con el tubo diagonal.

9. Ángulo del tubo vertical. Con el fin de disminuir la distancia entre los ejes de la rueda, el tubo vertical se inclina ligeramente a la izquierda. Así, la proyección del ciclista caerá sobre la rueda trasera y la bicicleta podrá ser sensiblemente más corta.

10. Altura desde el suelo hasta el tubo horizontal. Distancia que modifica el grado de seguridad del usuario. Cuanto mayor sea esta altura, mayor debe ser la destreza o altura del ciclista.

11. Distancia horizontal desde la pipa de dirección hasta el eje de pedalier. Medida de mucha importancia para la postura del usuario, cuanto mayor sea la distancia, la inclinación de la espalda será mayor. Y por tanto, el cuadro estará más enfocado a la competición.

12. Distancia vertical desde el eje de pedalier hasta la pipa de dirección. Distancia que modifica la inclinación de la espalda del usuario.

13. Longitud de la horquilla delantera. Medida que depende de la cubierta que a posterior, se va a instalar en la bicicleta, pero que, por si misma, no varía el comportamiento de la bicicleta ni la posición del usuario.

#### 4.2.2. Medidas del cuadro diseñado

Las medidas del cuadro tienen mucha importancia para poder crear un cuadro que sea ergonómica y que permita al usuario tener una óptima posición.

De acuerdo a las medidas de las bicicletas de la marca Orbea, se realiza el modelo de acuerdo a una talla 51, usualmente usada por ciclistas profesionales.

Los datos de las medidas de cada parte del cuadro se detallan a continuación:

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Tabla 4-1. Dimensiones del cuadro a desarrollar

Longitud tubo vertical	480 mm
Longitud tubo horizontal	535.84 mm
Longitud pipa de dirección	129.6 mm
Longitud vainas	408 mm
Altura eje de pedalier	264 mm
Altura eje de pedalier-ejes de ruedas	72 mm
Longitud entre ejes	980 mm
Ángulo horquilla delantera	72.2°
Ángulo tubo vertical	73.7°
Altura tubo horizontal	758.48 mm
Distancia horizontal entre pipa de dirección y eje de pedalier	380 mm
Altura entre eje de pedalier y tubo horizontal	533 mm
Longitud horquilla delantera	370 mm

### 4.3. Realización del modelo en Solid Edge

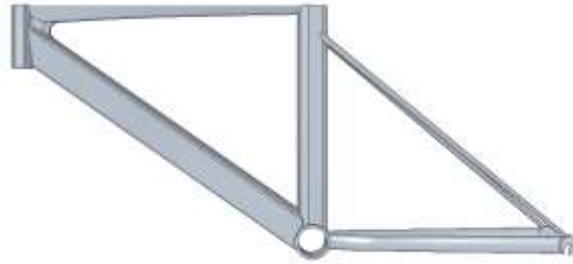
Para la realización del modelo del cuadro en tres dimensiones, se utiliza la herramienta Solid Edge. Se trata de un software de diseño en tres dimensiones de un modelo para que posteriormente se fabrique o se simule.

Además, Solid Edge incorpora una herramienta de análisis de elementos finitos basada en Nastran, pero esta es bastante limitada y no permite el uso de materiales compuestos en sus análisis.

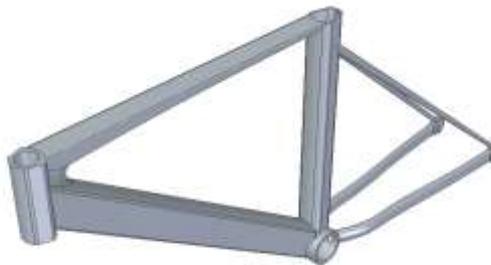
Como se menciona en apartados anteriores, el modelo pretende ser aerodinámico y ligero, de acuerdo con el uso para el que se concibe.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

El modelo está basado en su parte anterior al cuadro que incorpora el modelo de bicicleta Trek Madone SLR 8. Para ello, la pipa de dirección no es cilíndrica, sino que tiene un perfil aerodinámico, así como los tubos horizontales y diagonal. Para lograr estos perfiles poco comunes, se utiliza la herramienta incluida en Solid Edge ST 10 llamada secciones por barrido.



*Figura 4.5. Alzado del modelo desarrollado en Solid Edge*



*Figura 4.6. Vista isométrica del cuadro desarrollado en Solid Edge*

Antes de usar esta herramienta y para completar un tubo de sección variable, se deben dibujar las secciones deseadas en cada plano auxiliar perpendicular al eje longitudinal del tubo. Posteriormente se utiliza esta herramienta y el programa, una las secciones anteriormente dibujadas mediante un tubo de sección variable.

Esta herramienta es usada en los tubos horizontales y diagonal, intentando además formar una mayor sección donde el cuadro, durante su posterior uso se vea más requerido.

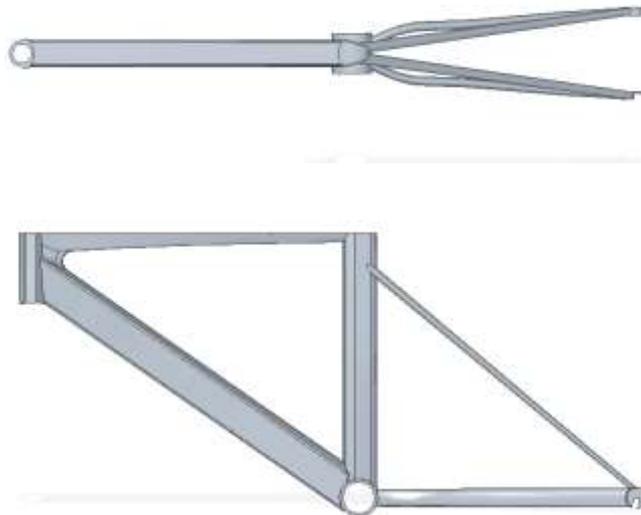
## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

En cambio, el tubo vertical y el de la pipa de la dirección son de sección constante, ya que, por lo general, sufrirán una carga constante de compresión, por lo que se utilizará la herramienta de extruir desde un boceto dibujado anteriormente.

La parte posterior del modelo está basada sobre todo en el modelo de cuadro que incorpora la Orbea Omx.

Las vainas traseras del modelo diseñado se basan en dicha bicicleta. Estos tubos se unen al tubo vertical en la zona media y no en la parte superior.

Este cambio supone mejoras en el cuadro en cuanto a rigidez y reactividad, por lo que parece adecuado para nuestro modelo, dirigido a un mercado profesional.



*Figura 4.7. Vista de alzado y planta del modelo desarrollado*

## 5. Análisis

En este apartado, mediante el software de elementos finitos Ansys Mechanical Apdl, se realizan los ensayos descritos por la normativa requerida para ciclos.

Este software de elementos finitos permite la resolución de problemas complejos en otros más simples que sí se pueden resolver. La solución a la que se llega con este método es aproximada, ya que no se resuelve el problema real, si no, una simplificación

del mismo. Los elementos finitos permiten generar un modelo matemático que permite discretizar un medio continuo en elementos finitos con el fin de poder resolver el problema.

Este método es muy popular en el ámbito de la ingeniería, ya que permite ensayar prototipos de una manera económica y rápida. Los ensayos que se analizan, se realizan con el software de elementos finitos Ansys.

Mediante este software se resuelve el problema de forma estática, es decir, se resuelve los dos casos de carga y aplicando posteriormente el criterio de Goodman se comprueba la validez del diseño en los diferentes materiales de fabricación de cuadros de ciclos.

La fatiga consiste en la aplicación de cargas alternantes sobre una estructura de forma cíclica. Existen numerosas teorías de fatiga, que indican las condiciones que se tienen que producir en el material para que se produzca el fallo del mismo.

### 5.1. Fatiga de un material

Se define la fatiga como la aplicación de cargas de forma cíclica, es decir, cargas variantes en el tiempo que se repiten completando un ciclo. Por ejemplo, si aplicamos a una viga una carga de 1 kN durante un segundo y posteriormente se le somete a una carga de 2 kN durante otro segundo.

Se podría pensar que la carga mayor (en este caso la de 2 kN) es la que determina la vida útil de la pieza ya que es la que produce mayor tensión en esta pero no es así.

El fallo en la pieza se puede dar en fatiga sin que se supere el límite elástico o el límite de rotura de este. La explicación es que el límite elástico o de rotura del material se reduce conforme se aplican los ciclos de carga, llegando así incluso a producirse el fallo cuando se aplica una carga menor a la crítica del material en el instante inicial bajo una carga constante.

Las propiedades del material determinan la curva S-N del mismo, que es una representación del decremento de la tensión máxima de fallo del material en función del número de ciclos a los que se le someta.

## 5.2. Curva S-N

La curva tensión – número de ciclos represente la variación de la resistencia del material en función del número de ciclos de cargas a los que se ha sometido.

Esta curva depende de las propiedades mismas del material y de la forma de aplicación sobre la pieza o estructura a analizar.

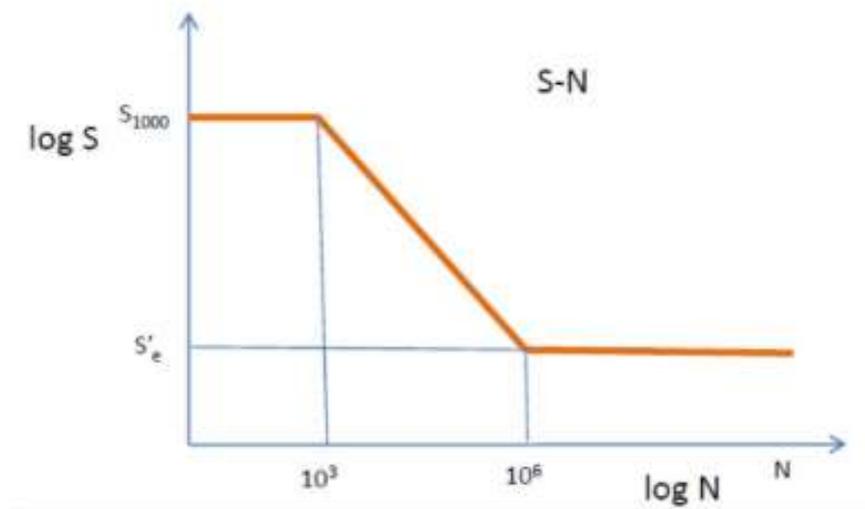


Figura 5.1. Curva tensión-deformación [15]

### 5.2.1. Parámetros modificativos del límite de fatiga

Para un correcto análisis de las piezas o estructuras estudiadas, se corrige el límite de fatiga del propio material aplicando unos coeficientes debidos a distintos factores.

El límite de fatiga corregido se calcula mediante la ecuación de Marin (5.1)

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f * S_e' \quad (5.1)$$

La curva S-N del material, se realiza a partir de una probeta en un ensayo a unas determinadas condiciones que pueden diferir en mayor o menor medida de las condiciones en las que posteriormente tendrá que trabajar la pieza.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Así, se tiende hacia el lado de la seguridad y dependiendo de la aplicación de la pieza, se toman los siguientes factores:

- Factor de acabado superficial (Ka):

El acabado de la pieza a analizar puede diferir del acabado fino de la probeta analizada, por lo que, dependiendo del acabado, se tomarán los valores de los parámetros “a” y “b” para poder calcular el coeficiente Ka.

Tabla 5-1. Coeficiente Ka de fatiga

Acabado superficial	Coefficiente a	Coefficiente b
Pulido	1	0
Acabado fino	1.58	-0.085
Mecanizado sin acabar/estirado en frio	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
forjado	272	-0.995

- Coeficiente de tamaño (Kb):

Cuando la pieza es de mayor tamaño, se puede producir con mayor facilidad el inicio de una grieta.

En piezas sometidas a flexión y torsión, este valor se puede calcular como:

$$Kb = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133} \quad \text{Para diámetros entre 2.79 mm y 51 mm} \quad (5.2)$$

$$Kb = 1.189 * d^{-0.097} \quad \text{Para diámetros entre 52 mm y 250 mm} \quad (5.3)$$

- Coeficiente de confiabilidad (Kc):

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Este coeficiente se toma en función del grado de confiabilidad que se desee en el correcto funcionamiento de la pieza dentro de su vida útil. Este coeficiente viene determinado en gran medida por la aplicación de la pieza, ya sea más o menos crítica en el correcto funcionamiento del conjunto o en el peligro que acarree la rotura de la pieza.

Tabla 5-2. Coeficiente  $K_c$  de fatiga

Confiabilidad	Factor $K_c$ de confiabilidad
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753
0.9999	0.702
0.99999	0.659

- Coeficiente de temperatura ( $K_d$ ):

Este coeficiente tiene en cuenta la diferencia de temperatura entre el ensayo realizado para obtener la curva S-N del material y la temperatura a la que la pieza trabaja.

$$K_d = 1 \quad \text{Para } T < 450^\circ \quad (5.4)$$

$$K_d = 1 - 5.8 * 10^{-3} * (T - 450) \quad \text{Para } 450 < T < 550 \quad (5.5)$$

- Coeficiente de concentración de tensiones ( $K_e$ ):

Dependiendo de la forma de la pieza o de si contiene agujeros o no, se tomará un valor del coeficiente de concentración de tensiones.

En zonas como ranuras o agujeras se producen mayores tensiones que en zonas sin estos elementos. Se debe tener en cuenta la geometría de la pieza o de

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

determinadas partes de la misma para realizar un correcto límite a fatiga de dichas partes.

El valor de  $K_e$ , se calcula mediante la ecuación 5.6.

$$K_e = \frac{1}{R_f} \quad (5.6)$$

Donde:

- $R_f$ : Factor de reducción de la resistencia en caso de fatiga
- $q$ : Factor de sensibilidad a las ranuras

$$q = \frac{R_f - 1}{K_t - 1} \quad (5.7)$$

- Coeficiente de efectos diversos ( $K_f$ ):

El coeficiente  $K_f$  tiene en cuenta otras características del material o condiciones de funcionamiento de la pieza que no se han tenido anteriormente en cuenta con otros coeficientes.

Las uniones soldadas se tienen en cuenta en este coeficiente y se usará dicho coeficiente de acuerdo con la tabla 6.3.

Tabla 5-3. Coeficiente  $K_f$  de fatiga

Tipo de nudo		Cordones	Montantes	Diagonales
Nudos con separación	K	1.5	1	1.3
	N ; KT	1.5	1.8	1.4

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Nudos con solape	K	1.5	1	1.2
	N ; KT	1.5	1.65	1.25

El valor de Kf se obtiene mediante la ecuación 111.1.

$$Kf = \frac{1}{cf} \quad (5.8)$$

### 6.2.2. Tipos de tensiones en fatiga

La forma de aplicación de las cargas, como se ha visto anteriormente, determina también la vida útil de la pieza.

A continuación, se definen el tipo de tensiones que determinan la fatiga.

- Tensión alternante: Se define como la mitad de la resta entre la tensión máxima del material y la tensión mínima. Cuanto mayor sea este valor, menor será la vida útil del material.

$$\sigma a = \frac{\sigma \text{ máx} - \sigma \text{ mín}}{2} \quad (5.9)$$

- Tensión media: Se define como la mitad de la suma entre la tensión máxima y la tensión mínima. Cuanto mayor sea este valor, menor será la vida útil de la pieza.

$$\sigma m = \frac{\sigma \text{ máx} + \sigma \text{ mín}}{2} \quad (5.10)$$

Estos dos factores de carga determinan la tensión equivalente mediante teorías de fatiga, que se definen a continuación.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- Teoría de Goodman: la teoría de Goodman valida las piezas que se encuentren dentro del área que encierra una línea recta entre el límite a fatiga modificado ( $S_e$ ) en el eje de esfuerzo alternante y el límite de resistencia última ( $S_{ut}$ ).

$$\frac{\sigma a}{S_e} + \frac{\sigma m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (5.11)$$

-Donde:

- $\sigma a$  = esfuerzo alternante aplicado sobre la pieza
- $S_e$  = límite de fatiga modificado
- $\sigma m$  = esfuerzo medio aplicado sobre la pieza
- $S_{ut}$  = límite de resistencia última de la pieza
- $n$  = coeficiente de seguridad aplicado para el dimensionamiento de la pieza.

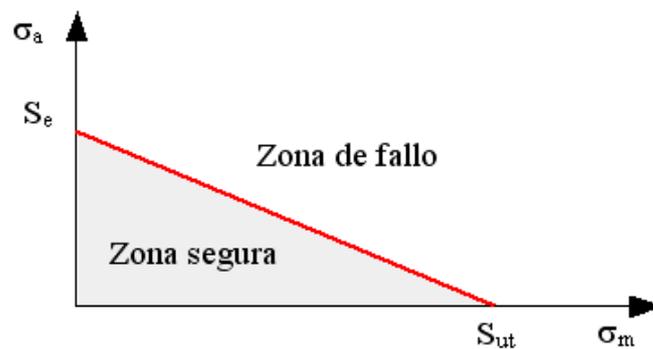


Figura 5.2. Gráfica teoría de Goodman [16]

- Teoría de Soderberg: la teoría de Soderberg valida las piezas que se encuentran a la derecha de la línea recta que une el límite de fatiga modificado ( $S_e$ ) en el eje de tensión alternante con el límite de fluencia del material ( $S_y$ ) en el eje de la tensión media.

$$\frac{\sigma a}{S_e} + \frac{\sigma m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (5.12)$$

- Donde:
- $\sigma a$  = tensión alternante aplicada sobre la pieza

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- $\sigma_m$  = tensión media aplicada sobre la pieza
- $S_e$  = límite de fatiga corregido
- $S_y$  = límite de fluencia
- $n$  = coeficiente de seguridad

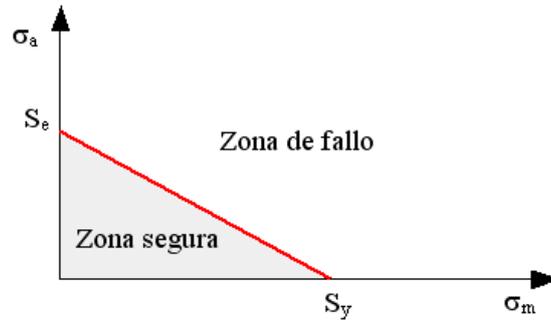


Figura 5.3. Gráfica teoría de Soderberg [16]

- Teoría de Gerber: la teoría de Gerber valida toda aquella pieza que se encuentre en el área encerrada por una parábola desde el límite de fatiga corregido ( $S_e$ ) situado en el eje de la tensión alternante hasta el límite de rotura ( $S_{ut}$ ) situado en el eje de la tensión media.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = \frac{1}{n} \quad (5.13)$$

-Donde:

- $\sigma_a$  = tensión alternante sometida sobre la pieza
- $\sigma_m$  = tensión media sometida sobre la pieza
- $S_e$  = límite de fatiga corregido
- $S_{ut}$  = límite de rotura
- $n$  = coeficiente de seguridad

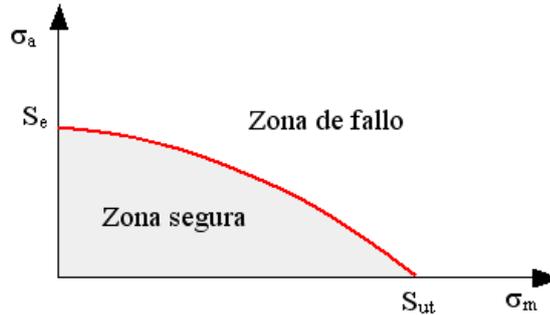


Figura 5.4. Gráfica teoría de Gerber [16]

Mediante la tensión equivalente calculada con las teorías de fatiga, se puede conocer la vida útil del material mediante la curva tensión-número de ciclos.

## 5.2. Tipos de ensayo

En este apartado se describen los ensayos marcados por la norma ISO 4210 a los que se someten los cuadros de los ciclos para asegurar la seguridad de los mismos durante su uso a lo largo del tiempo.

### 5.2.1. Ensayo de fuerza vertical

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ISO 4210 sobre ciclos. Esta norma establece las condiciones para la realización del ensayo.

El cuadro se fija en los ejes de las ruedas, de forma que se permita la rotación de los apoyos en el eje trasero (apoyo simple) y el desplazamiento horizontal en los apoyos del eje delantero (apoyo deslizante).

Para la realización del ensayo se utilizará una horquilla con un valor de resistencia y rigidez superior a la que se instalará en la bicicleta a modo de horquilla falsa.

Para la aplicación de la fuerza se dispone de una tija que se introduce 75 mm en el tubo vertical. Esta tija de tener una altura de 250 mm y un retroceso de 70 mm con el fin de simular una situación crítica de un usuario sentado sobre el sillín del ciclo.



Los apoyos se consideran como apoyo simple en el caso del eje trasero y de apoyo deslizante en el caso del eje delantero. Para realizar estos apoyos en Ansys se aplican en estos puntos dos clases de desplazamientos:

- Tipo de desplazamiento eje delantero: en este apoyo se permite la rotación respecto al eje “Y” y el desplazamiento horizontal a lo largo del eje X. El resto de movimientos se restringen.
- Tipo de desplazamiento eje trasero: en este apoyo se permite la rotación respecto al eje “Y” y los demás posibles movimientos se restringen.

### 5.2.2. Ensayo de fuerzas horizontales

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ISO 4210 sobre ciclos.

Este ensayo establece las condiciones de contorno que se deben aplicar y que en este proyecto, se simula en el software Ansys. Al cuadro se le añade una falsa horquilla que debe tener siempre una igual o mayor rigidez que la que posteriormente se instale en el ciclo.

Esta horquilla, en el soporte del eje delantero, se fija a un rodillo, permitiendo así su desplazamiento a lo largo del eje “X”. Este rodillo desliza en un carril, teniendo así restringido el movimiento en el eje “Y”. El soporte del eje de la rueda trasera está limitado tanto en movimiento vertical como horizontal pero se permite la rotación en la dirección del eje “Z”. Las fuerzas se aplican en el soporte de la rueda delantera. Se realizan ciclos con la fuerza en sentido del eje “X” y en sentido negativo del mismo.

Al tratarse de un cuadro enfocado a la competición, el cuadro se debe ensayar con unas fuerzas de 600 N y un número de ciclos igual a 100000 como se indica en la tabla 6.1.

Para poder modelizar el ensayo en Ansys de una manera precisa, se crean unos elementos tipo viga asociados a un material de muy alta rigidez colocados en el tubo de la pipa de la dirección con el fin de permitir la transmisión de la carga desde el punto central de dicho tubo al tubo de la pipa de la dirección y por consiguiente al conjunto del cuadro.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Tabla 5-4. Fuerzas en ensayo de fuerzas horizontales (2)

Tipo de bicicleta	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Fuerza hacia delante, $F_2$ N	450	450	1 200	600
Fuerza hacia detrás, $F_3$ N	450	450	600	600
Ciclos de ensayo, $C_1$	100 000	100 000	50 000	100 000



### Leyenda

- 1 Rodillo guiado que puede girar libremente
- 2 Montura pivotante rígida para el punto de fijación del eje trasero

Figura 5.6. Esquema ensayo fuerzas horizontales

### 5.2.3. Ensayo de fuerzas de pedaleo

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma ISO 4210 referente a la seguridad de los ciclos. Este ensayo establece las condiciones en las cuales se debe colocar el cuadro para realizar una correcta simulación de las cargas que se producen al pedalear.

El ensayo e debe realizar con una falsa horquilla que debe tener una rigidez mayor o igual a que posteriormente se instale en el cuadro. El soporte del eje de la rueda delantera está restringido su movimiento, se considera un empotramiento, igual que el soporte del eje trasero. En el tubo del eje de pedalier se instala un soporte que simula las bielas y los pedales de una bicicleta. Este soporte atraviesa el eje de pedalier y la fuerza se aplica en los dos lados de este. Esta fuerza se ejerce en el soporte a una distancia del centro del eje de pedalier de 150 mm y forma 45 ° con la horizontal.

A su vez, la fuerza incide en el soporte con un ángulo respecto a la vertical de 7,5 °.

### Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Este ensayo se modeliza en el software Ansys, transportando las fuerzas y los momentos resultantes a los centros de los huecos del eje de pedalier. La fuerza y momentos resultantes en los centros del hueco del eje de pedalier se calculan de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

- Hueco derecho del eje de pedalier:

$$M_z = Fxd = 1100 \times 0.123 = 135 \text{ Nm} \quad (5.16)$$

$$M_x = Fxd = 1100 \times 0.1 = 110 \text{ Nm} \quad (5.17)$$

$$F_y = -1100 \times \cos(7,5^\circ) = -1090 \text{ N} \quad (5.18)$$

$$F_z = 1100 \times \sin(7.5^\circ) = 143 \text{ N} \quad (5.19)$$

- Hueco izquierdo del eje de pedalier:

$$M_z = Fxd = 1100 \times 0.123 = 135 \text{ Nm} \quad (5.20)$$

$$M_x = Fxd = -1100 \times 0.1 = -110 \text{ Nm} \quad (5.21)$$

$$F_y = -1100 \times \cos(7,5^\circ) = -1090 \text{ N} \quad (5.22)$$

$$F_z = -1100 \times \sin(7.5^\circ) = -143 \text{ N} \quad (5.23)$$

Tabla 5-5. Cargas aplicadas en el hueco de pedal derecho

Cargas aplicadas en el hueco de pedal derecho	
F <sub>y</sub>	-1090 N
F <sub>z</sub>	143 N
M <sub>x</sub>	110 Nm
M <sub>z</sub>	135 Nm

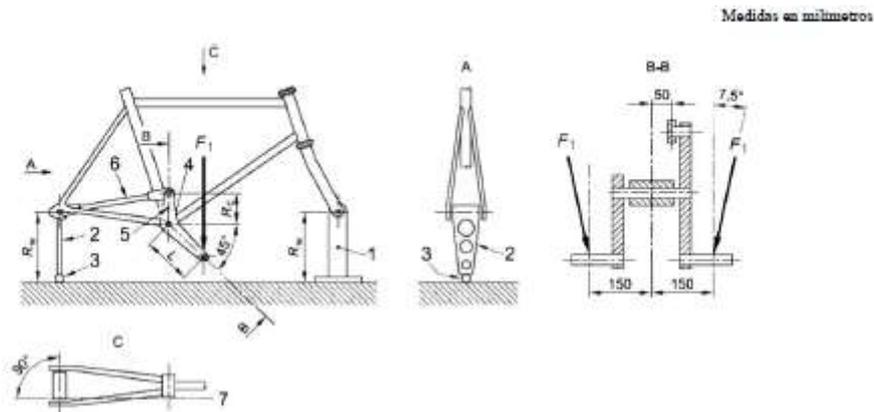
## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Tabla 5-6. Cargas aplicadas en el hueco de pedal izquierdo

Cargas aplicadas en el hueco de pedal izquierdo	
Fy	-1090 N
Fz	-143 N
Mx	-110 Nm
Mz	135 Nm

Tabla 5-7. Fuerzas ensayo fuerzas de pedaleo

Tipo de bicicleta	Fuerzas en newtons			
	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
Fuerza, $F_1$	1 000	1 000	1 200	1 100



### Leyenda

- $R_v$ : Altura del dispositivo de fijación rígida y unión vertical
- $R_{c1}$ : Longitud del brazo vertical (75 mm)
- $L$ : Longitud de la biela (175 mm)
- 1: Montaje rígido
- 2: Unión vertical
- 3: Rótula
- 4: Montaje adaptador
- 5: Brazo vertical
- 6: Tirante
- 7: Eje del tirante

Figura 5.7. Esquema ensayo fuerzas de pedaleo

### 5.3. Materiales de construcción de los cuadros en los ensayos

En este apartado se describen los materiales que se utilizan en los ensayos para realizar una comparación entre ellos y también, posteriormente, analizar las ventajas o inconvenientes del uso del grafeno como material de construcción de cuadros de bicicleta.

#### 5.3.1. Cuadro de acero

El acero se caracteriza por poseer un alto módulo de Young y también alto límite elástico. Este hecho, convirtió al material en uno de los más usados en la construcción de bicicletas. Su principal desventaja es su alta densidad. Las propiedades del acero utilizado para realizar la simulación se describen en la tabla 5.8.

Tabla 5-5-8. Propiedades del acero

Material	Acero
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7850
Módulo de Young (GPa)	210
Coefficiente de Poisson	0.3
Límite elástico (MPa)	480
Límite de rotura (MPa)	600

- Valor del límite de fatiga corregido:

El límite de rotura del acero es de 600 MPa, por lo que el valor del límite de fatiga ( $S_e$ ) es de valor 300 MPa, como se indica en la ecuación 5.24.

$$S_e = 0.5 \times S_y = 0.5 \times 480 = 240 \text{ MPa} \quad (5.24)$$

- Factor de corrección Ka: se fabrica mediante extrusión y estirado en frío.

Tabla 5-9. Factor de corrección Ka del acero

Parámetro a	4.51
Parámetro b	-0.265
Coefficiente Ka	0.828

- Factor de corrección Kb: el tubo de mayor tamaño y por lo tanto más desfavorable es el tubo vertical, cuyo diámetro es de 19 mm.

$$Kb = \left(\frac{19}{7.62}\right)^{-0.1133} = 0.901 \quad (5.25)$$

- Factor de confiabilidad; por la aplicación de la estructura analizada en este proyecto, se aplica un factor de confiabilidad de 0.868, que se corresponde con un 95 % de confiabilidad según la tabla...
- Factor de temperatura; la estructura analizada en el proyecto, trabaja en unas condiciones de temperatura ambientales, por lo que el factor de temperatura es igual a 1.
- Factor de concentrador de tensiones; en el cuadro analizado no existen agujeras o ranuras que puedan ser concentradores de tensión por lo que el coeficiente de concentrador de tensiones Ke tendrá el valor de 1.
- Factor de efectos diversos; la estructura de acero, está formada por tubos soldados entre sí, por lo que el valor del coeficiente Kf tiene un valor de 0.6667.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

El valor del límite elástico corregido se calcula con la ecuación de Marin:

$$Se = KaKbKcKdKeKfSe' = 108.8 \text{ MPa}$$

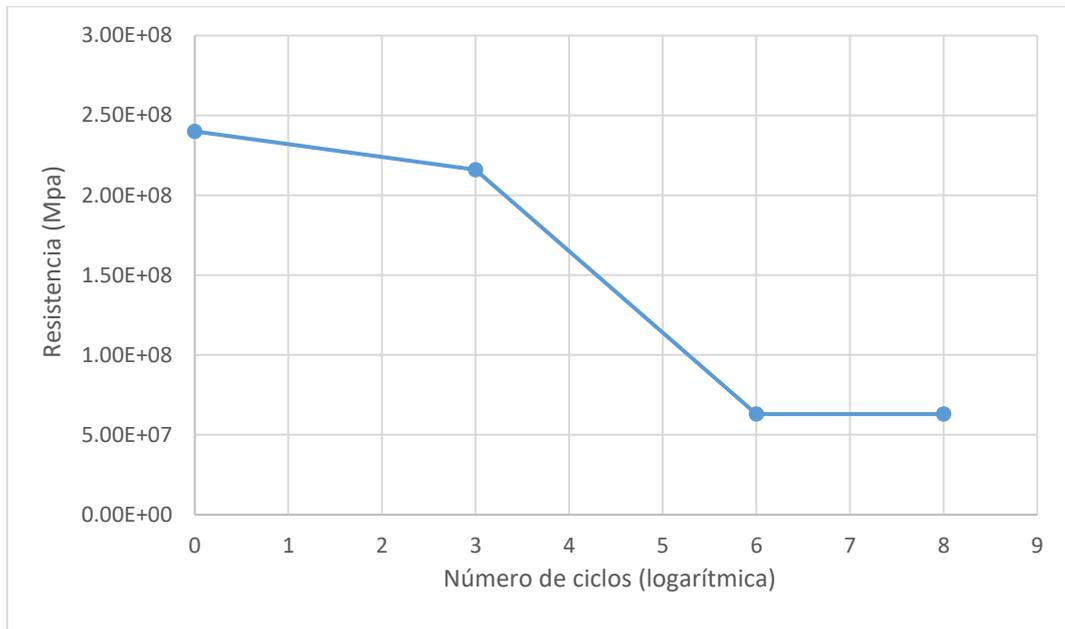


Figura 5.8. Curva S-N del acero

### 5.3.2. Cuadro de aluminio

Tabla 5-10. Propiedades del aluminio

Material	Aluminio
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2810
Módulo de Young (GPa)	71
Coefficiente de Poisson	0.33
Límite elástico (MPa)	215

- Valor del límite de fatiga corregido:

El límite de rotura del acero es de 600 MPa, por lo que el valor del límite de fatiga ( $Se$ ) es de valor 300 MPa, como se indica en la ecuación 11.1.

$$Se' = 0.5 \times Sy = 0.5 \times 215 = 107.5 \text{ MPa}$$

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- Factor de corrección Ka: el aluminio para la fabricación de cuadros de bicicleta se somete a varios tratamientos térmicos.

Tabla 5-11. Factor de corrección Ka del aluminio

Parámetro a	1.58
Parámetro b	-0.085
Coefficiente Ka	1

- Factor de corrección Kb: el tubo de mayor tamaño y por lo tanto más desfavorable es el tubo vertical, cuyo diámetro es de 19 mm.

$$Kb = \left(\frac{19}{7.62}\right)^{-0.1133} = 0.901 \quad (5.25)$$

- Factor de confiabilidad; por la aplicación de la estructura analizada en este proyecto, se aplica un factor de confiabilidad de 0.868, que se corresponde con un 95 % de confiabilidad según la tabla...
- Factor de temperatura; la estructura analizada en el proyecto, trabaja en unas condiciones de temperatura ambientales, por lo que el factor de temperatura es igual a 1 según la tabla....
- Factor de concentrador de tensiones; en el cuadro analizado no existen agujeras o ranuras que puedan ser concentradores de tensión por lo que el coeficiente de concentrador de tensiones Ke tendrá el valor de 1.
- Factor de efectos diversos; la estructura de acero, está formada por tubos soldados entre sí, por lo que el valor del coeficiente Kf tiene un valor de 0.6667.

El valor del límite elástico corregido se calcula con la ecuación de Marin:

$$Se = KaKbKcKdKeKfSe' = 67 \text{ MPa}$$

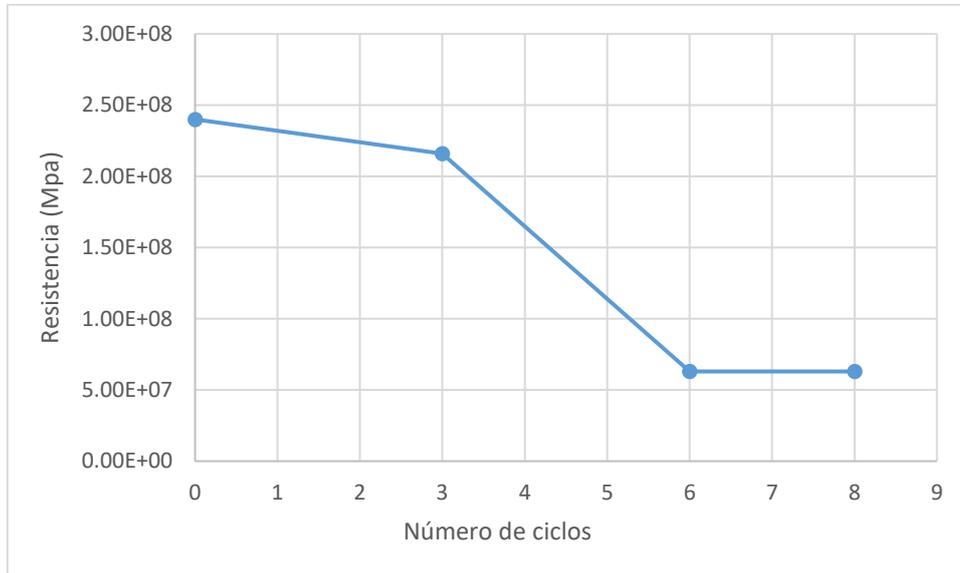


Figura 5.9. Curva S-N del aluminio

### 5.3.3. Cuadro de titanio

Tabla 5-12. Propiedades del Titanio

Material	Titanio
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	4520
Módulo de Young (GPa)	115
Coefficiente de Poisson	0.33
Límite elástico (MPa)	240

- Valor del límite de fatiga corregido:

El límite de rotura del acero es de 600 MPa, por lo que el valor del límite de fatiga ( $Se$ ) es de valor 300 MPa, como se indica en la ecuación 5.26.

$$Se = 0.5 \times Sy = 0.5 \times 240 = 120 \text{ MPa} \quad (5.26)$$

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- Factor de corrección Ka: se considera un acabado fino.

Tabla 5-13. Factor de corrección Ka del titanio

Parámetro a	1.58
Parámetro b	-0.085
Coefficiente Ka	0.99

- Factor de corrección Kb: el tubo de mayor tamaño y por lo tanto más desfavorable es el tubo vertical, cuyo diámetro es de 19 mm.

$$Kb = \left(\frac{19}{7.62}\right)^{-0.1133} = 0.901 \quad (5.27)$$

- Factor de confiabilidad; por la aplicación de la estructura analizada en este proyecto, se aplica un factor de confiabilidad de 0.868, que se corresponde con un 95 % de confiabilidad según la tabla...
- Factor de temperatura; la estructura analizada en el proyecto, trabaja en unas condiciones de temperatura ambientales, por lo que el factor de temperatura es igual a 1.
- Factor de concentrador de tensiones; en el cuadro analizado no existen agujeras o ranuras que puedan ser concentradores de tensión por lo que el coeficiente de concentrador de tensiones Ke tendrá el valor de 1.
- Factor de efectos diversos; la estructura de acero, está formada por tubos soldados entre sí, por lo que el valor del coeficiente Kf tiene un valor de 0.6667.

El valor del límite elástico corregido se calcula con la ecuación de Marin:

$$Se = KaKbKcKdKeKfSe' = 63 \text{ MPa} \quad (5.28)$$

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

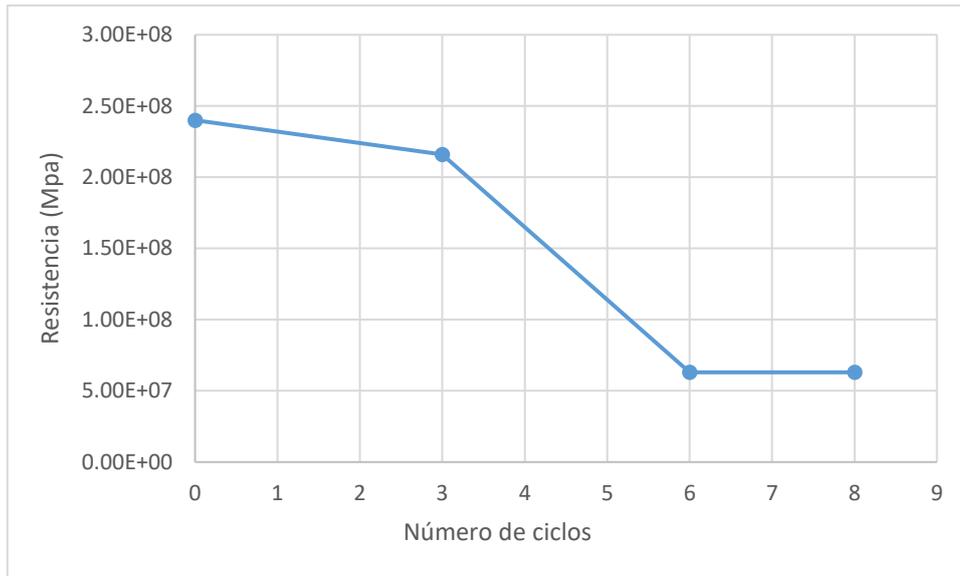


Figura 5.10. Curva S-N del Titanio

### 5.3.4. Cuadro de fibra de carbono

Tabla 5-14. Propiedades de la fibra de carbono.

Material	Fibra de carbono
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1800
Módulo de Young 1	59.1 GPa
Módulo de Young 2	58.9,2 Gpa
Coefficiente de poisson 12	0,21
Coefficiente de Poisson 23	0,21
Modulo cortante 12	6300 Mpa
Límite elástico 0°	1006 MPa
Límite elástico 90 °	858 MPa

En el caso de la fibra de carbono, no se puede tomar la aproximación a la fatiga que se ha tomado en cuadros con materiales convencionales. Los materiales compuestos reforzados mediante fibras de carbono, sufren en menor medida el fenómeno de la fatiga.

Se tomará como aproximación la figura 6.1

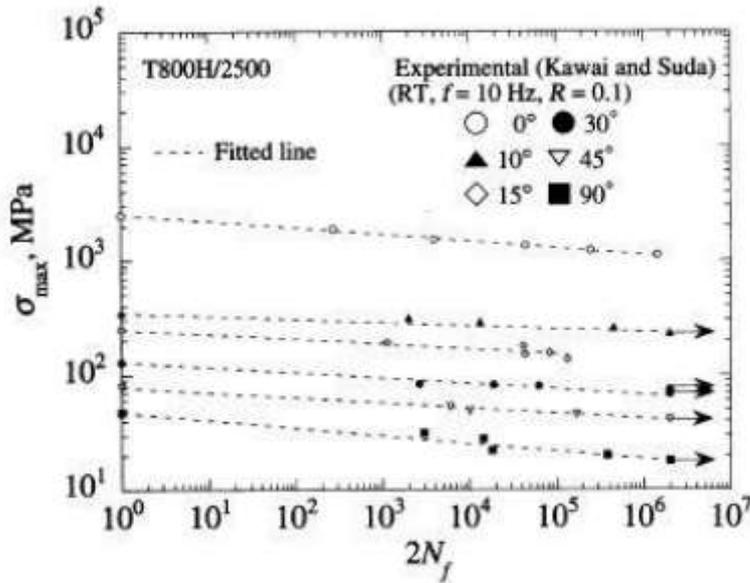


Figura 5.11. Curva S-N fibra de carbono

Como se puede observar, el límite de fatiga cae en torno al 24%.

Por lo que, aplicando este porcentaje al material compuesto utilizado para este análisis, el límite de fatiga sin corregir es de 744 MPa.

- Factor de corrección Ka: se considera un acabado fino.

Tabla 5-15. Factor de corrección Ka fibra de carbono

Parámetro a	1.58
Parámetro b	-0.085
Coefficiente Ka	0.99

- Factor de corrección Kb: el tubo de mayor tamaño y por lo tanto más desfavorable es el tubo vertical, cuyo diámetro es de 19 mm.

$$Kb = \left(\frac{19}{7.62}\right)^{-0.1133} = 0.901 \quad (5.29)$$

### Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

- Factor de confiabilidad; por la aplicación de la estructura analizada en este proyecto, se aplica un factor de confiabilidad de 0.868, que se corresponde con un 95 % de confiabilidad según la tabla...
- Factor de temperatura; la estructura analizada en el proyecto, trabaja en unas condiciones de temperatura ambientales, por lo que el factor de temperatura es igual a 1.
- Factor de concentrador de tensiones; en el cuadro analizado no existen agujeras o ranuras que puedan ser concentradores de tensión por lo que el coeficiente de concentrador de tensiones  $K_e$  tendrá el valor de 1.
- Factor de efectos diversos; no se tiene en cuenta ningún efecto diverso debido a que la fabricación es por moldeo y no por soldadura, por lo que  $K_f$  tiene un valor de 1.

El valor del límite elástico corregido se calcula con la ecuación de Marin:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e' = 581.9 \text{ MPa} \quad (5.30)$$

#### 5.3.5. Cuadro de fibra de carbono con GO

El límite del material compuesto de fibras de carbono reforzado con óxido de grafeno, se incrementa en torno a un 15 % respecto a un material compuesto únicamente con fibras de carbono. Pero no afecta en una medida importante al módulo de Young, por lo que se toma el mismo valor que la fibra utilizada en el cuadro de fibra de carbono.

El límite elástico aumenta conforme se incrementa la proporción de GO dentro del material compuesto.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

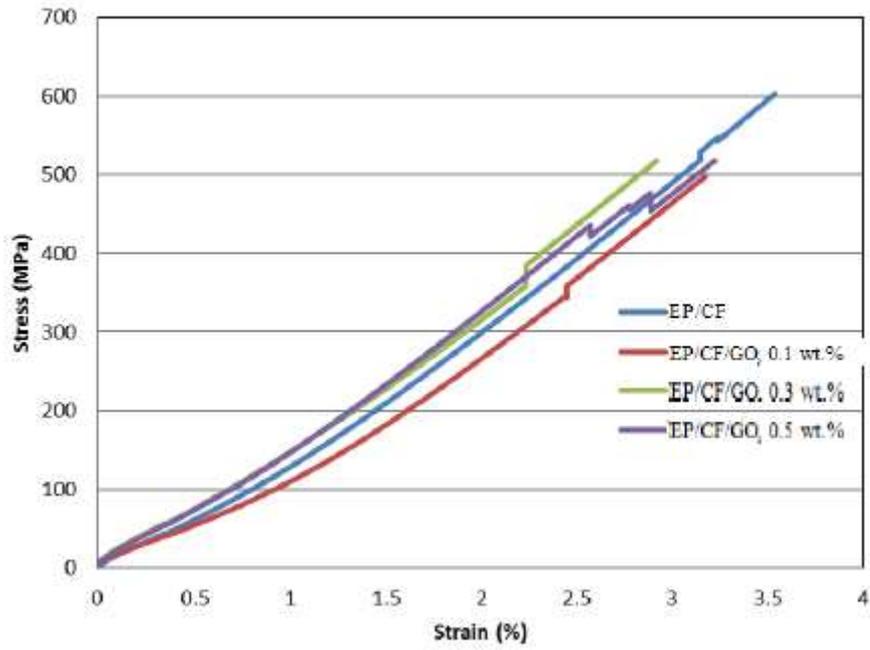


Figura 5.12. Comparación módulo de Young [17]

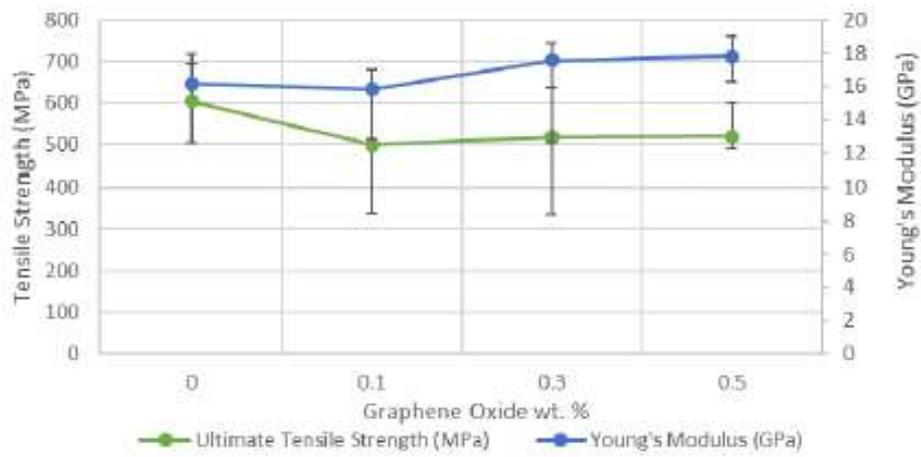


Figura 5.13. Variación módulo de Young y límite elástico [17]

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Tabla 5-16. Propiedades fibra de carbono reforzada con GO

Material	Fibra de carbono reforzado con GO
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1800
Módulo de Young 1	59.1 GPa
Módulo de Young 2	58.9,2 Gpa
Coefficiente de poisson 12	0,21
Coefficiente de Poisson 23	0,21
Modulo cortante 12	6300 MPa
Límite elástico 0°	1106 MPa
Límite elástico 90 °	943.8 MPa

- Factor de corrección Ka: se considera un acabado fino.

Tabla 5-17. Coeficiente de corrección ka para fibra de carbono reforzada con GO

Parámetro a	1.58
Parámetro b	-0.085
Coefficiente Ka	0.99

- Factor de corrección Kb: el tubo de mayor tamaño y por lo tanto más desfavorable es el tubo vertical, cuyo diámetro es de 19 mm.

$$Kb = \left(\frac{19}{7.62}\right)^{-0.1133} = 0.901 \quad (5.31)$$

- Factor de confiabilidad; por la aplicación de la estructura analizada en este proyecto, se aplica un factor de confiabilidad de 0.868, que se corresponde con un 95 % de confiabilidad según la tabla...

- Factor de temperatura; la estructura analizada en el proyecto, trabaja en unas condiciones de temperatura ambientales, por lo que el factor de temperatura es igual a 1.
- Factor de concentrador de tensiones; en el cuadro analizado no existen agujeras o ranuras que puedan ser concentradores de tensión por lo que el coeficiente de concentrador de tensiones  $K_e$  tendrá el valor de 1.
- Factor de efectos diversos; la estructura de acero, está formada por tubos soldados entre sí, por lo que el valor del coeficiente  $K_f$  tiene un valor de 1

El valor del límite elástico corregido se calcula con la ecuación de Marin:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e' = 600 \text{ MPa} \quad (5.32)$$

#### 5.4. Metodología para la resolución de los análisis

Mediante el software de elementos finitos Ansys se resuelve el caso de carga máxima y mínima de cada ensayo y así obtener la tensión máxima y mínima en cada nodo.

Una vez obtenidos los casos de tensión más desfavorables, se analizan los doscientos nodos más desfavorables para cada caso con el fin de estudiar los casos críticos además de valorar la validez de los mismos.

Una vez obtenidos los doscientos puntos más críticos en los dos casos de carga, se calculan las tensiones medias y alternantes de cada uno y posteriormente se calcula la diferencia y la suma de la tensión alternante y la media.

Así se pueden plasmar los datos en un diagrama que relaciona la tensión media con la tensión media +/- tensión alternante par así, después de calcular el criterio de Goodman poder comprobar que nuestros puntos son válidos y asegurar el cumplimiento del ensayo a fatiga, mediante la resistencia a la fatiga resultante de acuerdo al número de ciclos del ensayo de acuerdo a las curvas S-N de los materiales obtenidas en el apartado anterior.

## 6. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados. Primeramente se analizan los resultados de los ensayos estáticos y posteriormente se analizan los resultados de los ensayos a fatiga.

### 6.1. Ensayo a fuerzas verticales

A continuación se exponen los resultados de los ensayos a fatiga para los cuadros fabricados en los diferentes materiales descritos anteriormente.

#### 6.1.1. Ensayo cuadro fabricado en acero

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de acero sometido a fuerzas verticales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 440 MPa correspondiente a 50000 ciclos según la tabla 5.8.

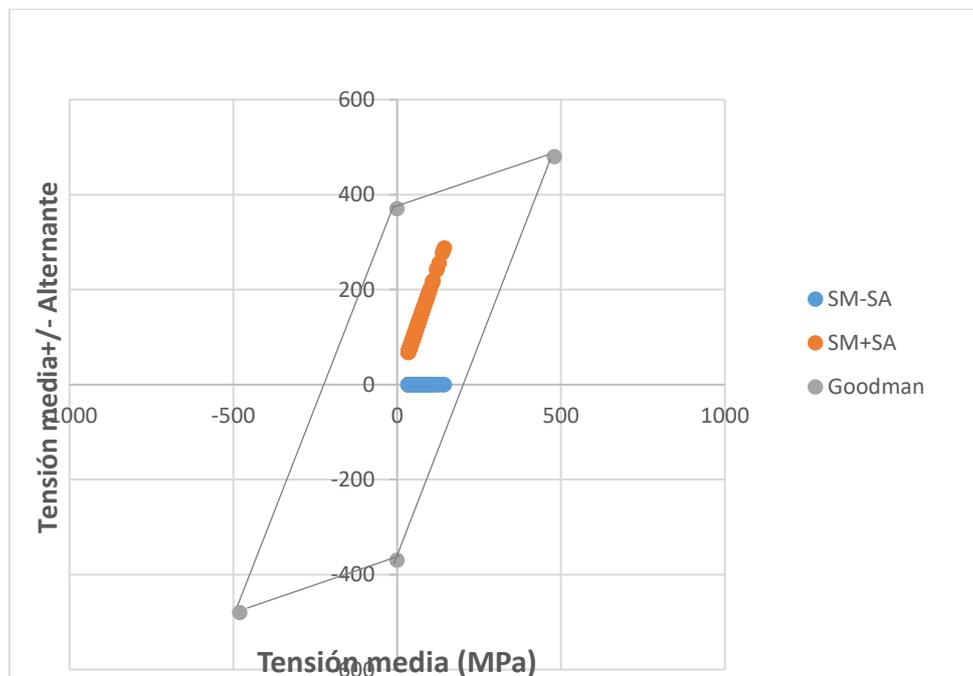


Figura.6.1. Validación Goodman cuadro acero con fuerzas verticales



Figura 6.2. Tensión de Von Mises cuadro acero con fuerzas verticales

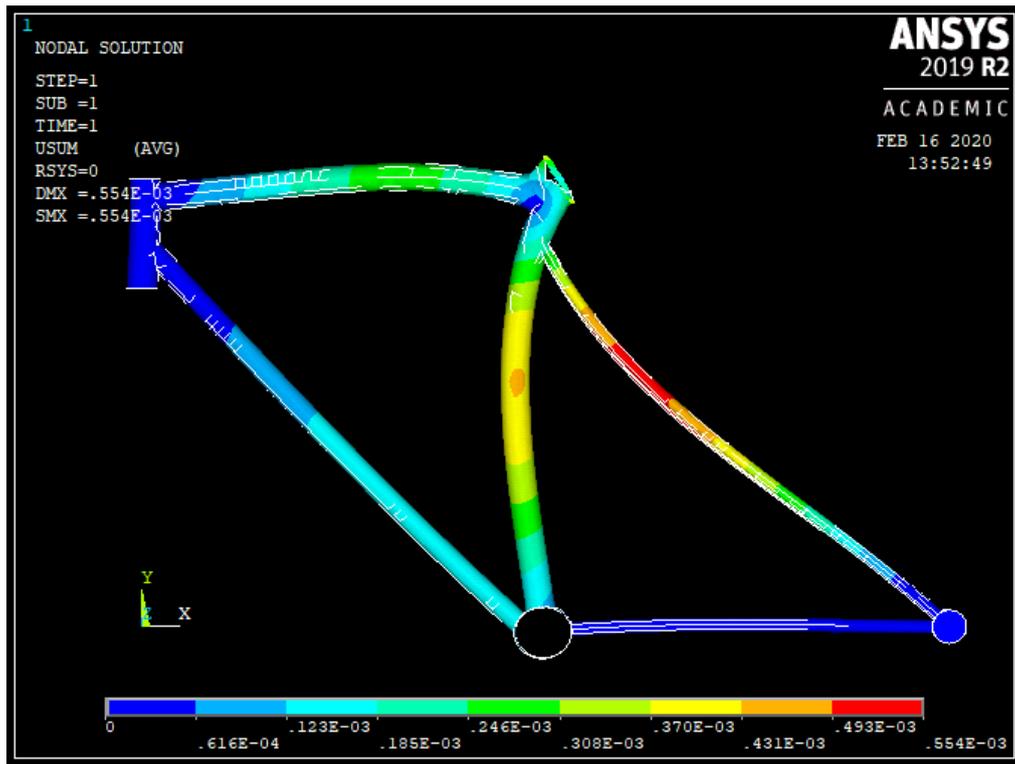


Figura 6.3. Deformación acero con fuerzas verticales

Tabla 6-1. Resultados acero con fuerzas verticales

Tensión máxima (MPa)	304
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	0.554E-3
Peso (kg)	6.5

### 6.1.2. Ensayo cuadro fabricado en aluminio

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de aluminio sometido a fuerzas verticales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 280 MPa correspondiente a 50000 ciclos según la tabla 5.9.

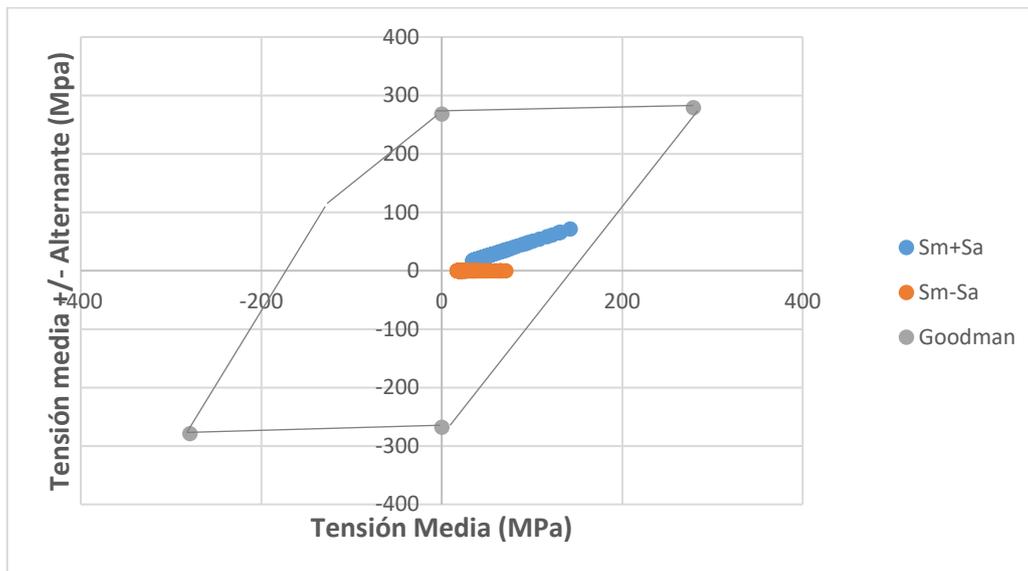


Figura 6.4. Validación Goodman cuadro aluminio con fuerzas verticales

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

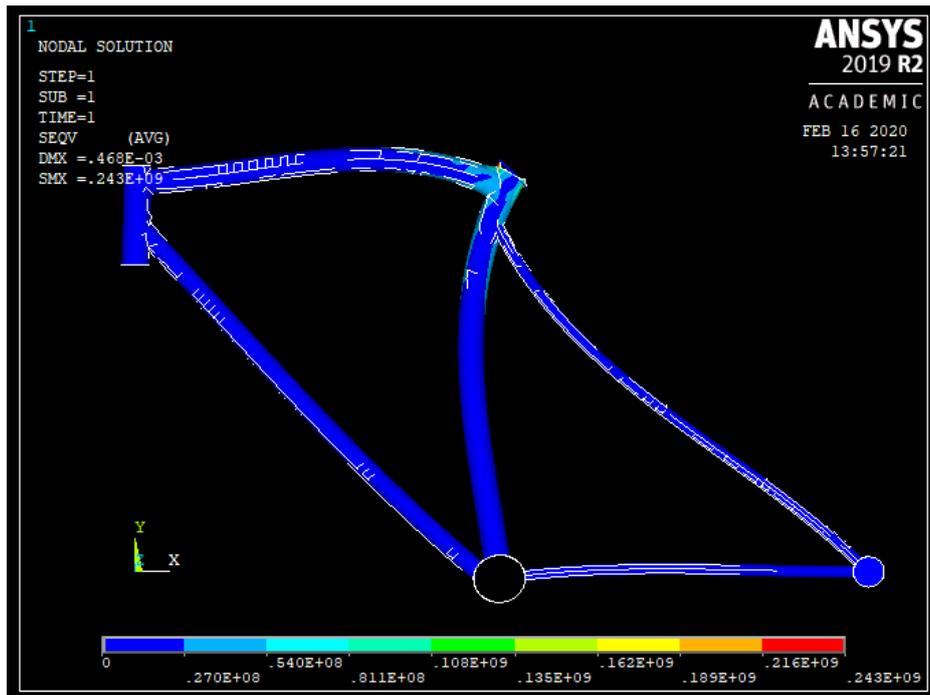


Figura 6.5. Tensión Von Mises aluminio con fuerzas verticales

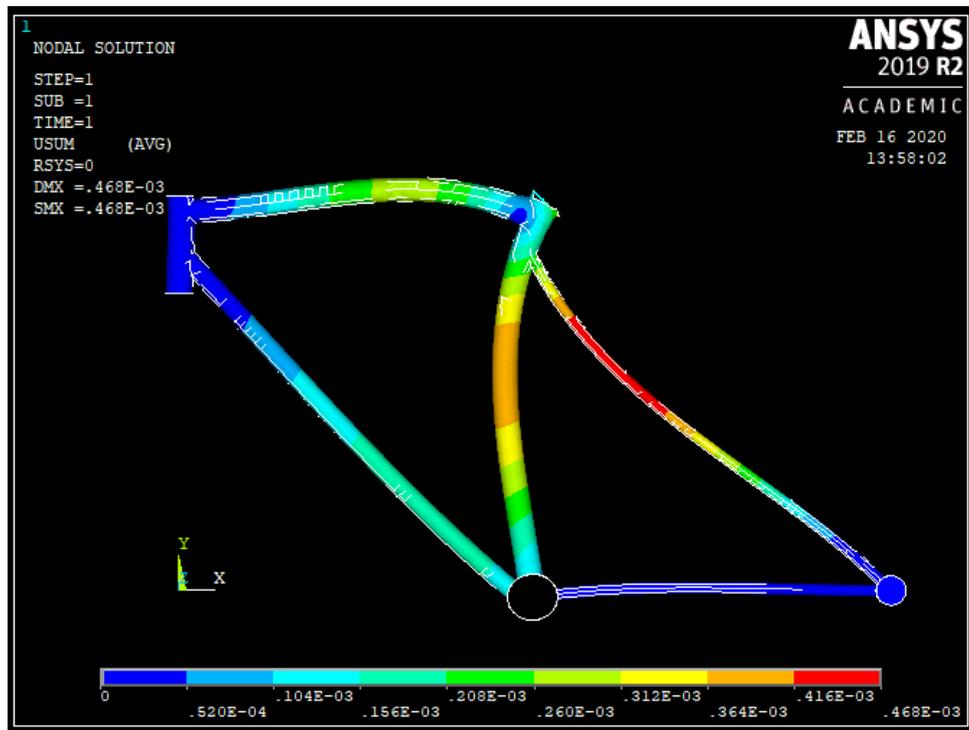


Figura 6.6. Deformación aluminio con fuerzas verticales

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Tabla 6-2. Resultados cuadro aluminio fuerzas verticales

Tensión máxima (MPa)	243
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	0.468E-3
Peso (kg)	4.61

### 6.1.3. Ensayo cuadro fabricado en titanio

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de titanio sometido a fuerzas verticales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 203 MPa correspondiente a 50000 ciclos según la tabla 5.10.

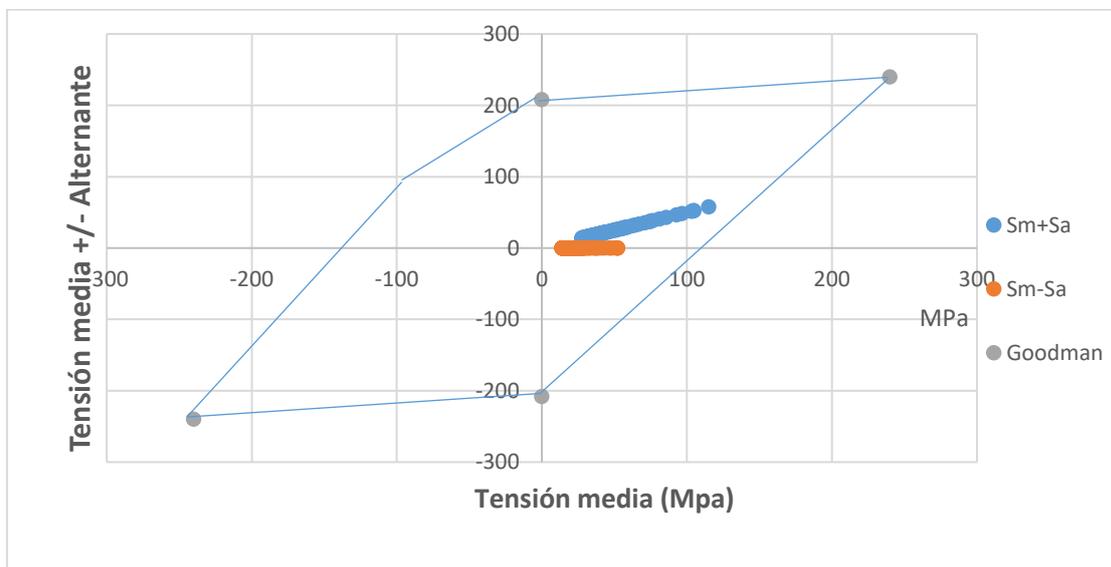


Figura 6.7. Validación Goodman cuadro titanio con fuerzas verticales

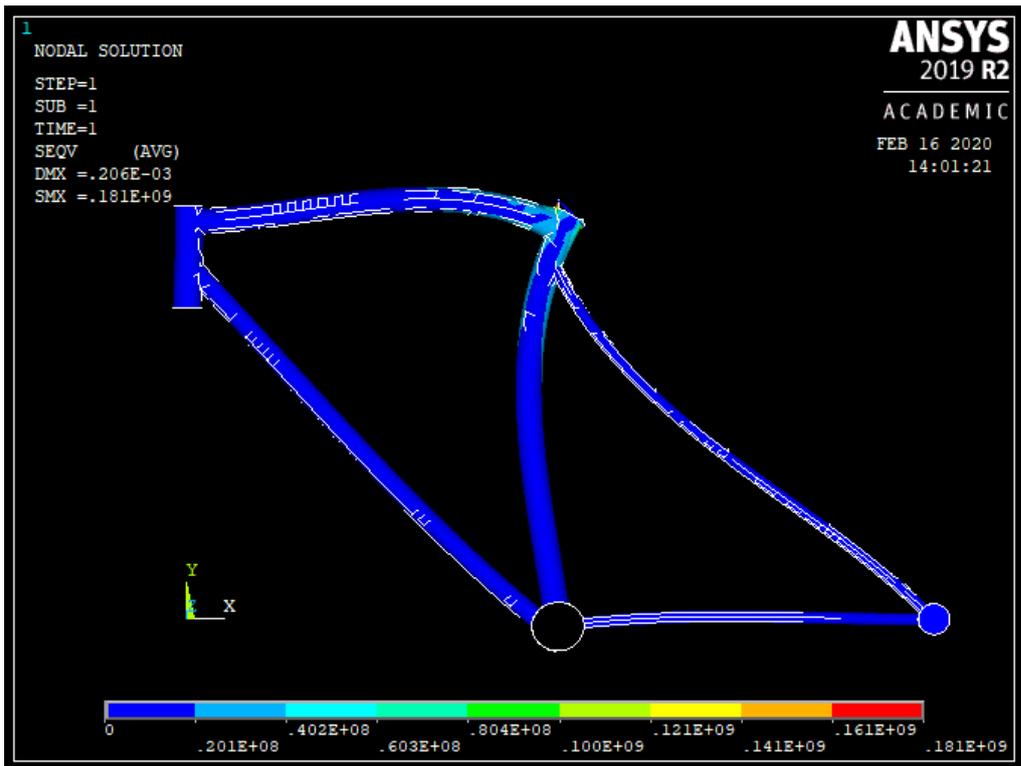


Figura 6.8. Tension de Von Mises titanio con fuerzas verticales

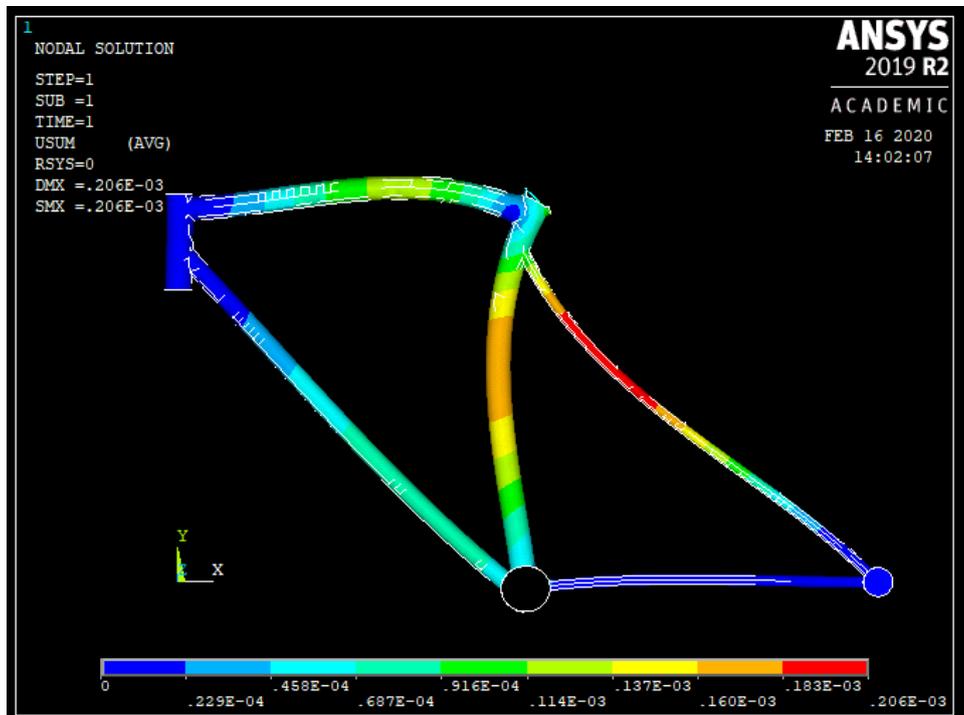


Figura 6.9. Deformación cuadro titanio con fuerzas verticales

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

*Tabla 6-3. Resultados cuadro titanio con fuerzas verticales*

Tensión máxima (MPa)	181
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	0.206E-3
Peso (kg)	7.4

### 6.1.4. Ensayo cuadro fabricado con fibras de carbono

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de fibra de carbono sometido a fuerzas verticales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 550 MPa correspondiente a 50000 ciclos según la tabla 5.10.

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

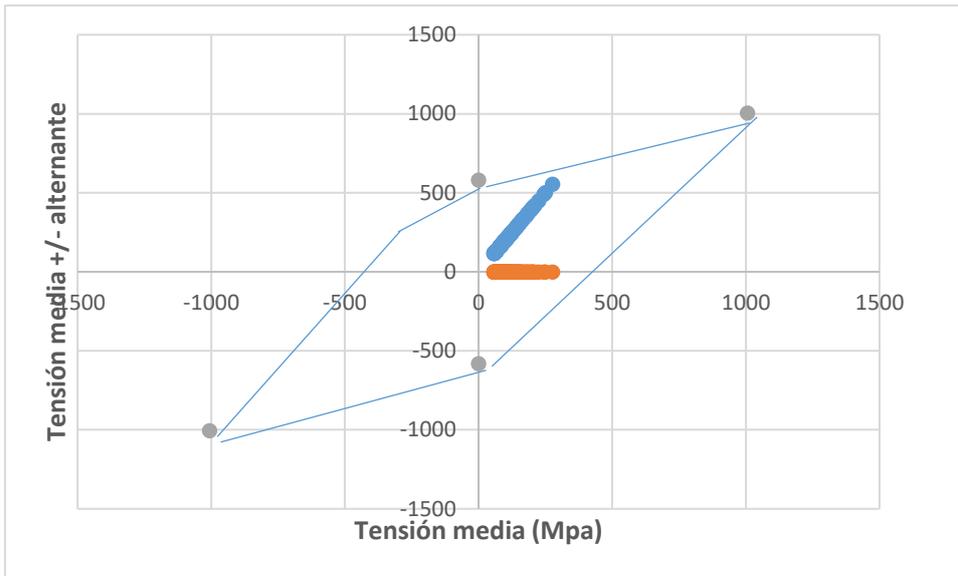


Figura 6.10. Validación Goodman fibra de carbono con fuerzas verticales



Figura 6.11. Tensión Von Mises cuadro fibra carbono con fuerzas verticales

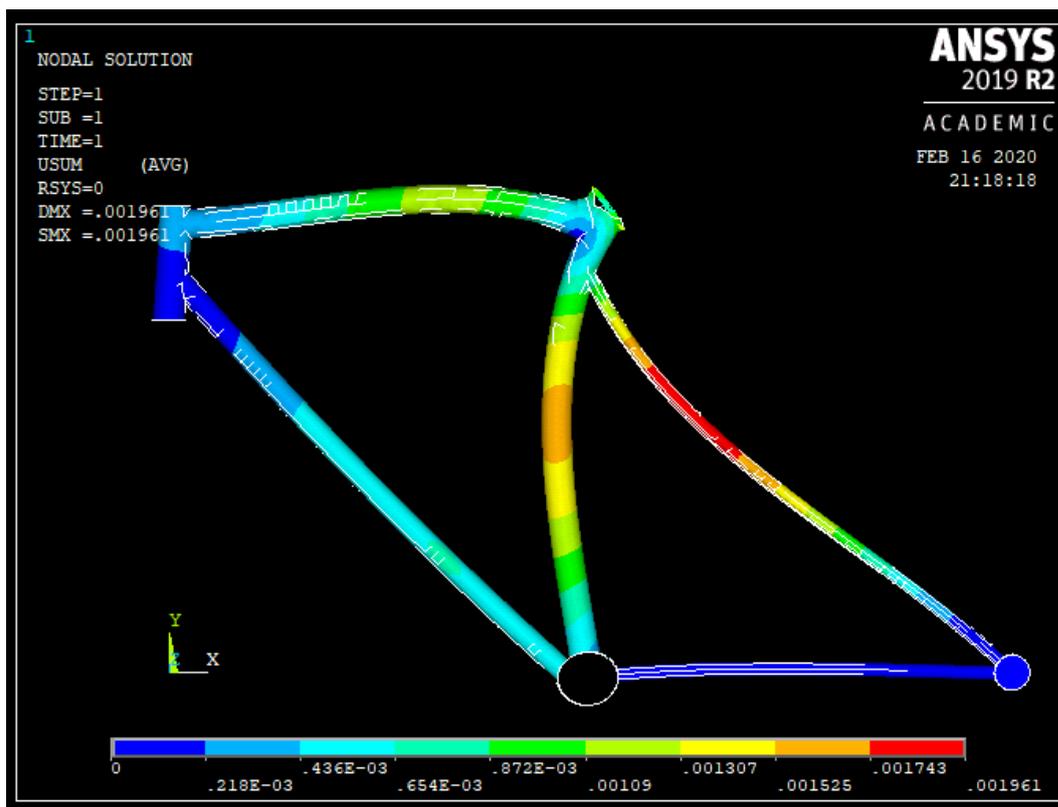


Figura 6.12. Deformación fibra de carbono con fuerzas verticales

Tabla 6-4. Resultados cuadro de fibra de carbono con fuerzas verticales

Tensión máxima (MPa)	585
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación	1.961E-3
Peso	1.98

### 6.1.5. Ensayo cuadro fabricado con fibras de carbono reforzadas con GO

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de fibra de carbono reforzada con GO sometido a fuerzas verticales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 580 MPa correspondiente a 50000 ciclos según la tabla 5.10.

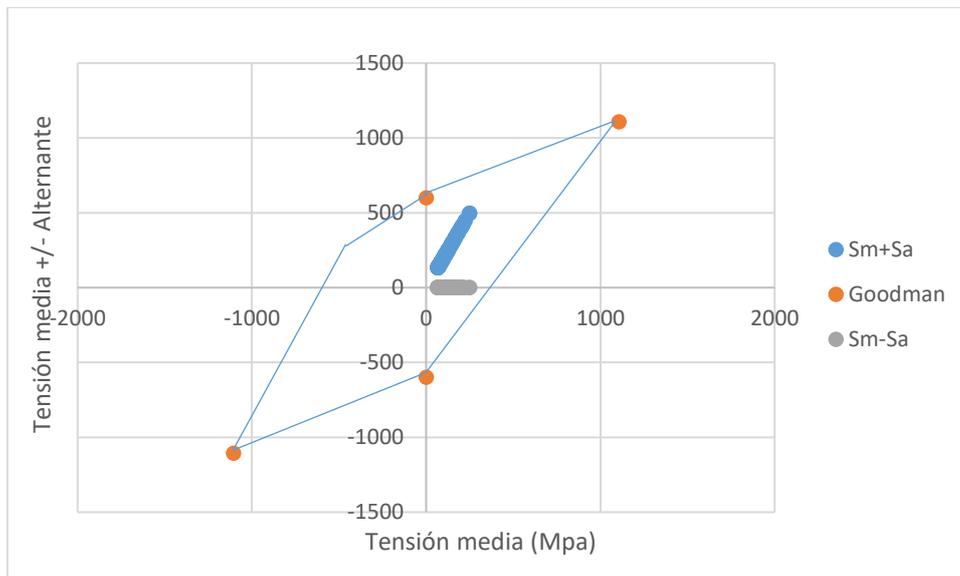


Figura 6.13. Validación Goodman fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales



Figura 6.14. Tensión Von Mises cuadro de fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales

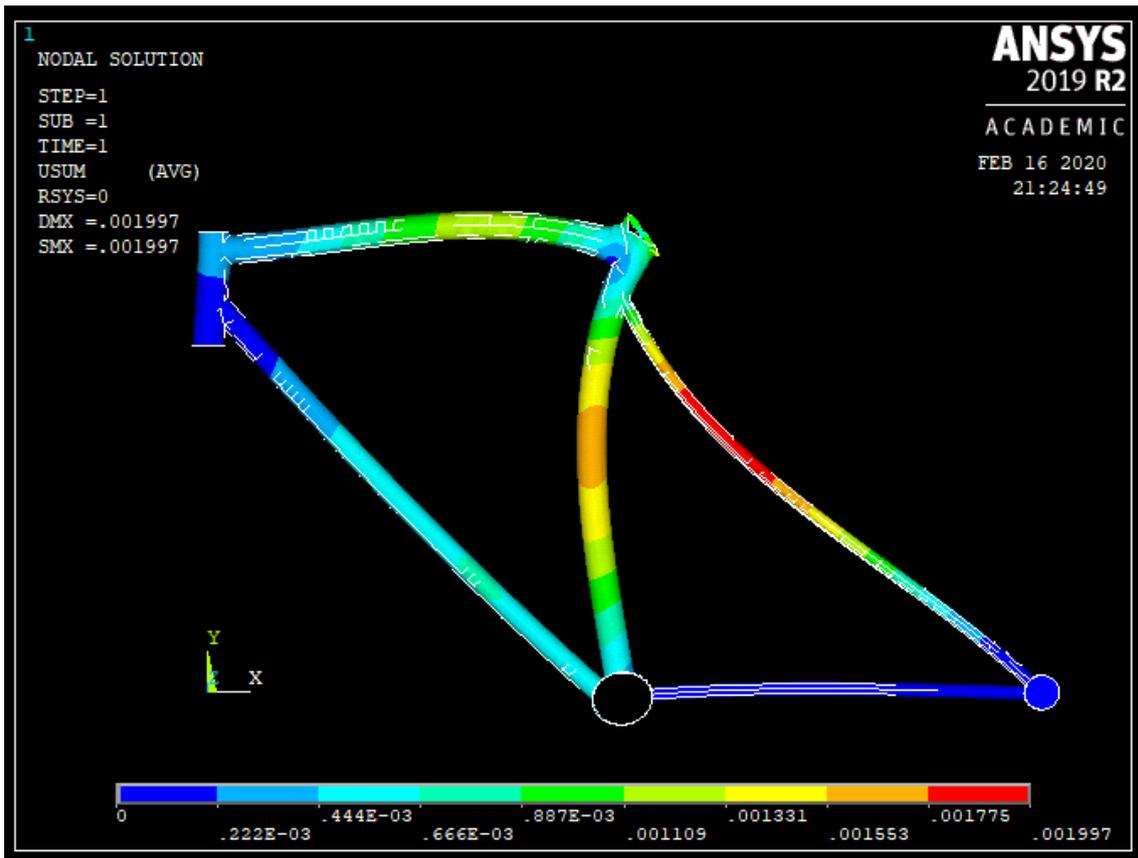


Figura 6.15. Deformación fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales

Tabla 6-5. Resultados cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas verticales

Tensión máxima (MPa)	598
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación	1.997E-3
Peso	1.75

## 6.2. Ensayo a fuerzas de pedaleo

### 6.2.1. Ensayo cuadro fabricado en acero

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de acero sometido a fuerzas de pedaleo.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 372 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.8.

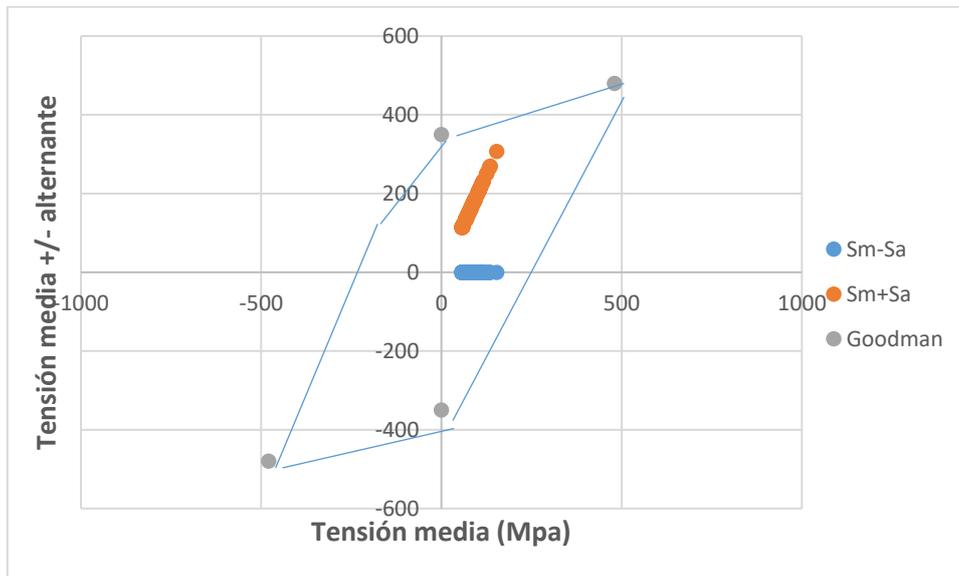


Figura 6.16. Validación Goodman cuadro acero con fuerzas de pedaleo

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

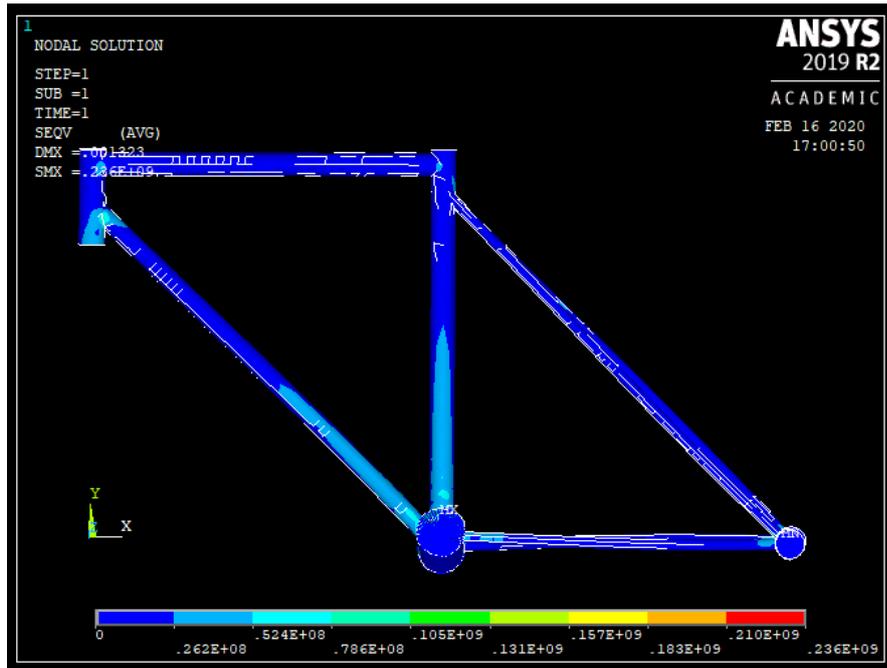


Figura 6.17. Tensión Von Mises cuadro acero con fuerzas de pedaleo

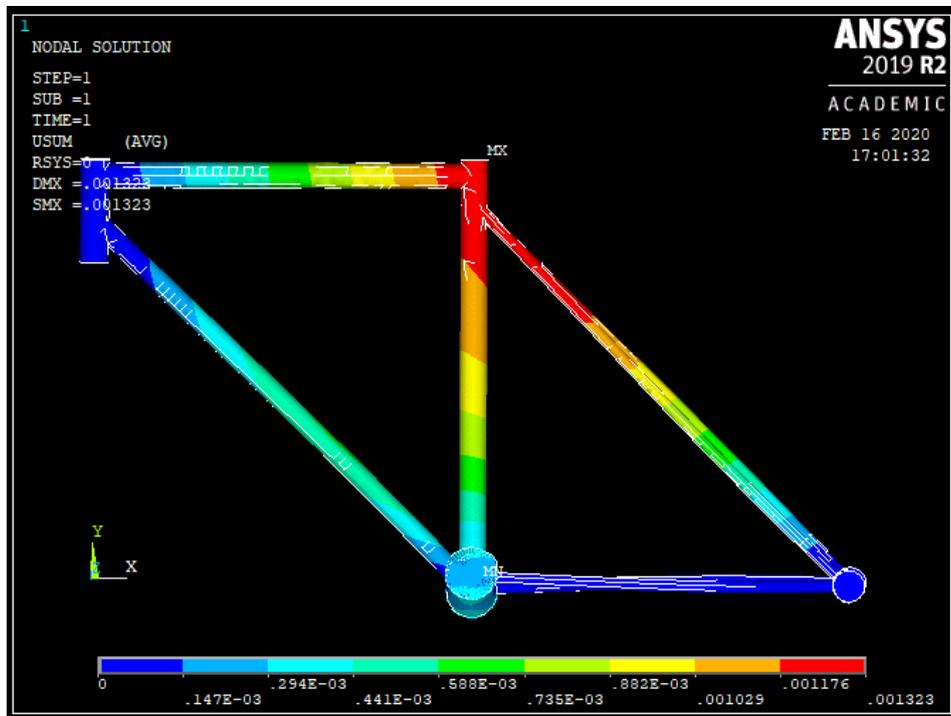


Figura 6.18. Deformación cuadro acero con fuerzas de pedaleo

Tabla 6-6. Resultados cuadro acero con fuerzas pedaleo

Tensión máxima (MPa)	236
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	1.3E-3
Peso (kg)	6.5

#### 6.2.2. Ensayo cuadro fabricado en aluminio

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de aluminio sometido a fuerzas de pedaleo.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 270 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.9.

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

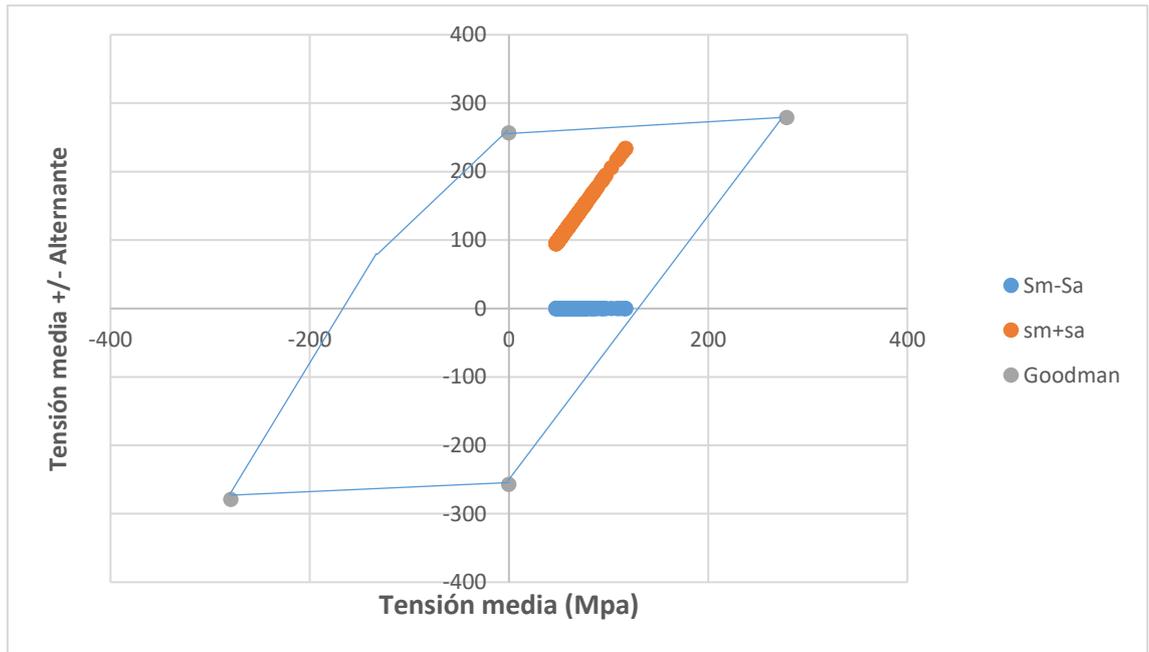


Figura 6.19. Validación Goodman cuadro aluminio con fuerzas de pedaleo

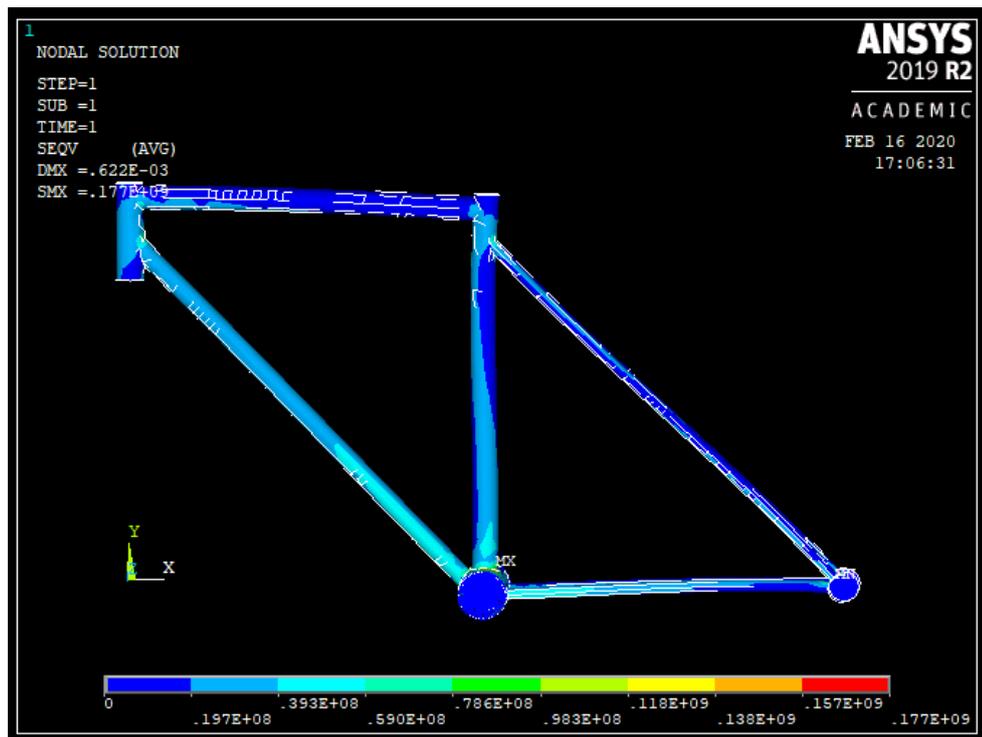


Figura 6.20. Tensión Von Mises cuadro aluminio con fuerzas de pedaleo

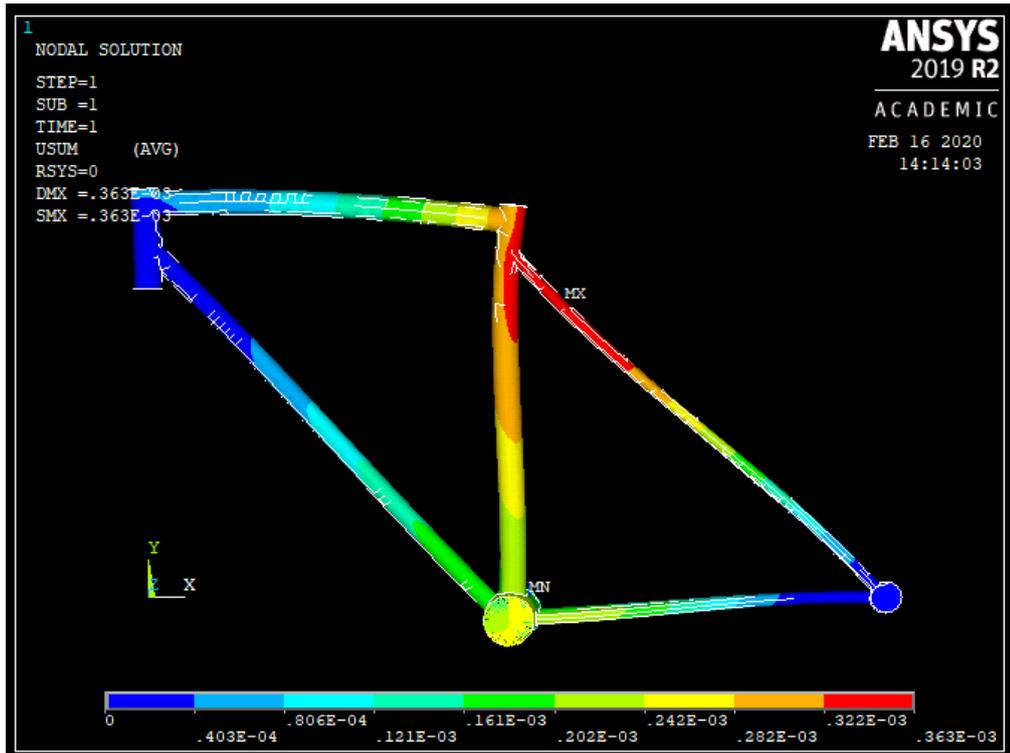


Figura 6.21. Deformación cuadro aluminio con fuerzas de pedaleo

Tabla 6-7. Resultados cuadro acero con fuerzas de pedaleo

Tensión máxima (MPa)	177
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	0.363E-3
Peso (kg)	4.61

### 6.2.3. Ensayo cuadro fabricado en titanio

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de titanio sometido a fuerzas de pedaleo.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 198 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.10.

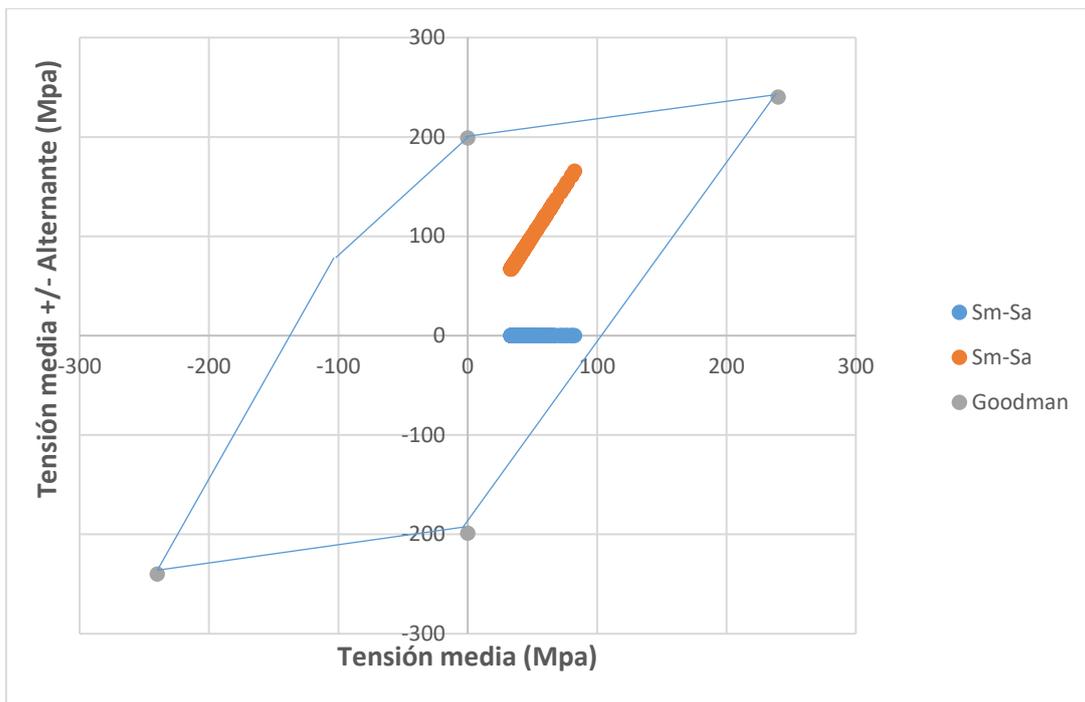


Figura 6.22. Validación cuadro titanio con fuerzas de pedaleo

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

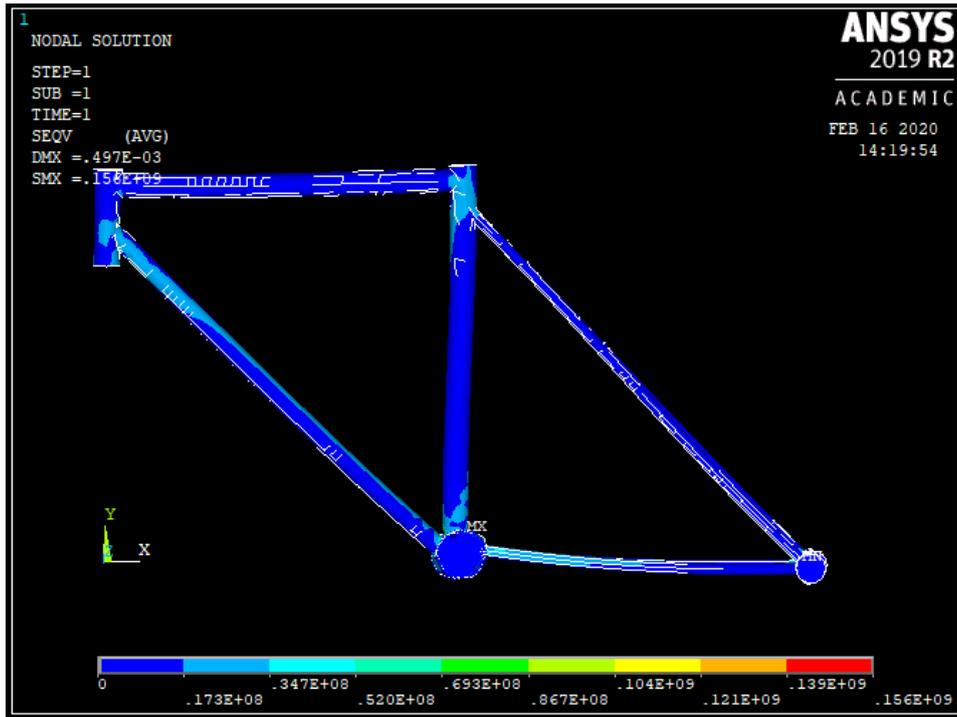


Figura 6.23. Tensión Von Mises cuadro titanio con fuerzas de pedaleo

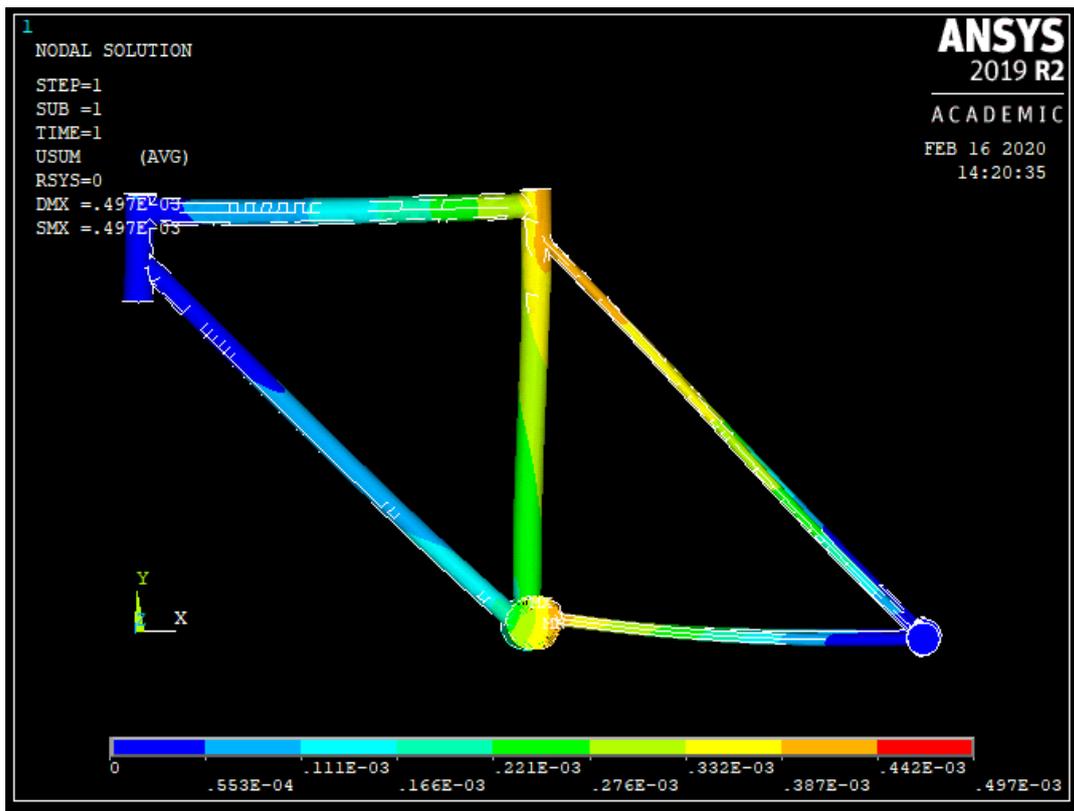


Figura 6.24. Deformación cuadro titanio con fuerzas de pedaleo

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

*Tabla 6-8. Resultados cuadro titanio con fuerzas de pedaleo*

Tensión máxima (MPa)	156
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	0.497E-3
Peso (kg)	7.4

#### 6.2.4. Ensayo cuadro fabricado con fibra de carbono

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de fibra de carbono sometido a fuerzas de pedaleo.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 530 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.11.

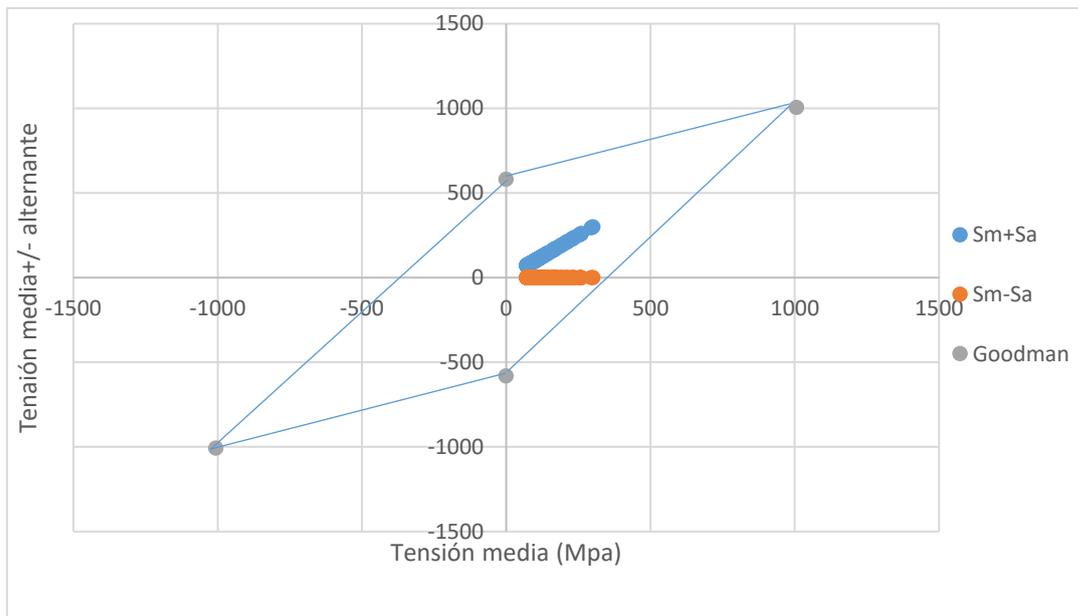


Figura 6.25. Validación Goodman cuadro de fibra de carbono con fuerzas de pedaleo

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

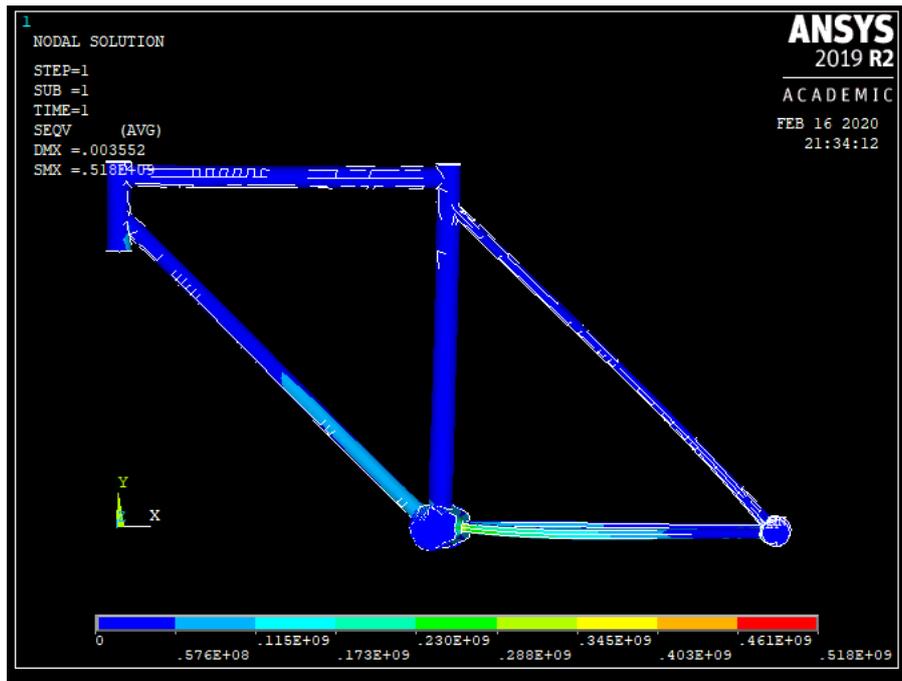


Figura 6.26. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono con fuerzas de pedaleo

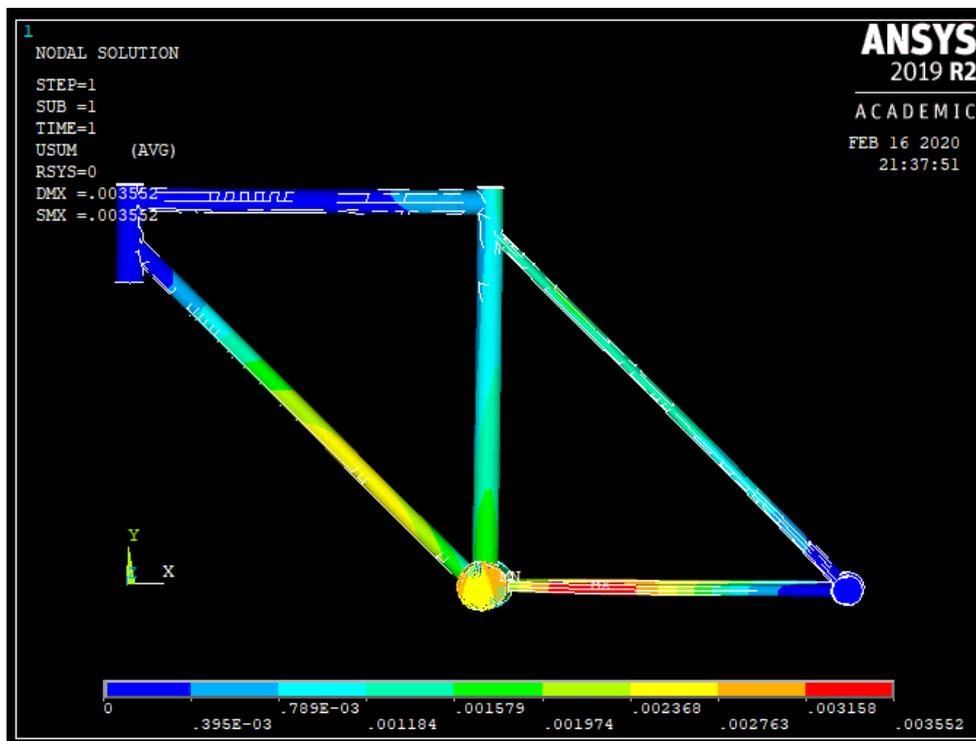


Figura 6.27. Deformación fibra de carbono con fuerzas de pedaleo

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Tabla 6-9. Resultados cuadro fibra de carbono con fuerzas de pedaleo

Tensión máxima (MPa)	518
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación	3.5E-3
Peso	1.98

### 6.2.5. Ensayo cuadro fabricado con fibras de carbono reforzadas con GO

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de fibra de carbono sometido a fuerzas de pedaleo.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia Sf de 530 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.11.

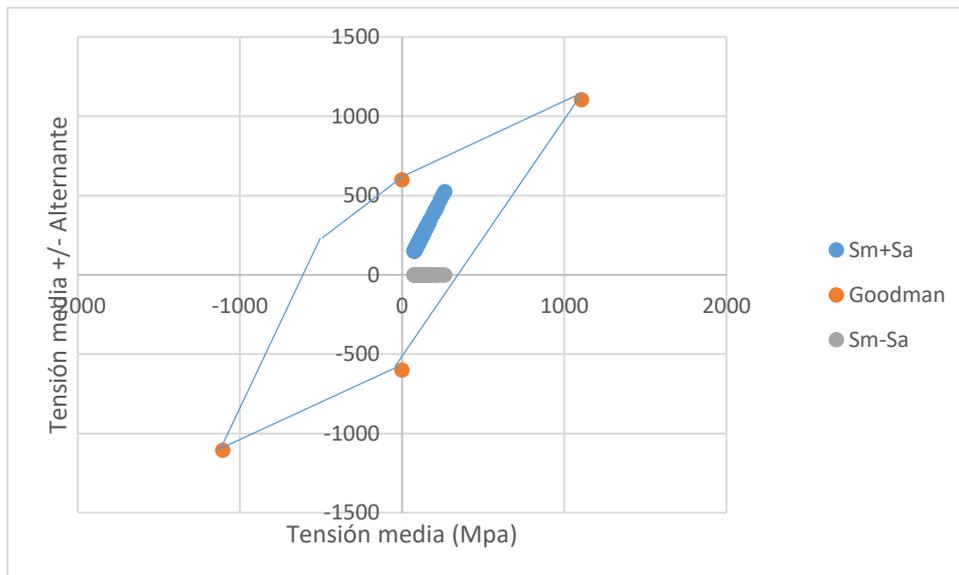


Figura 6.28. Validación Goodman fibra de carbono reforzada con Go con fuerzas de pedaleo

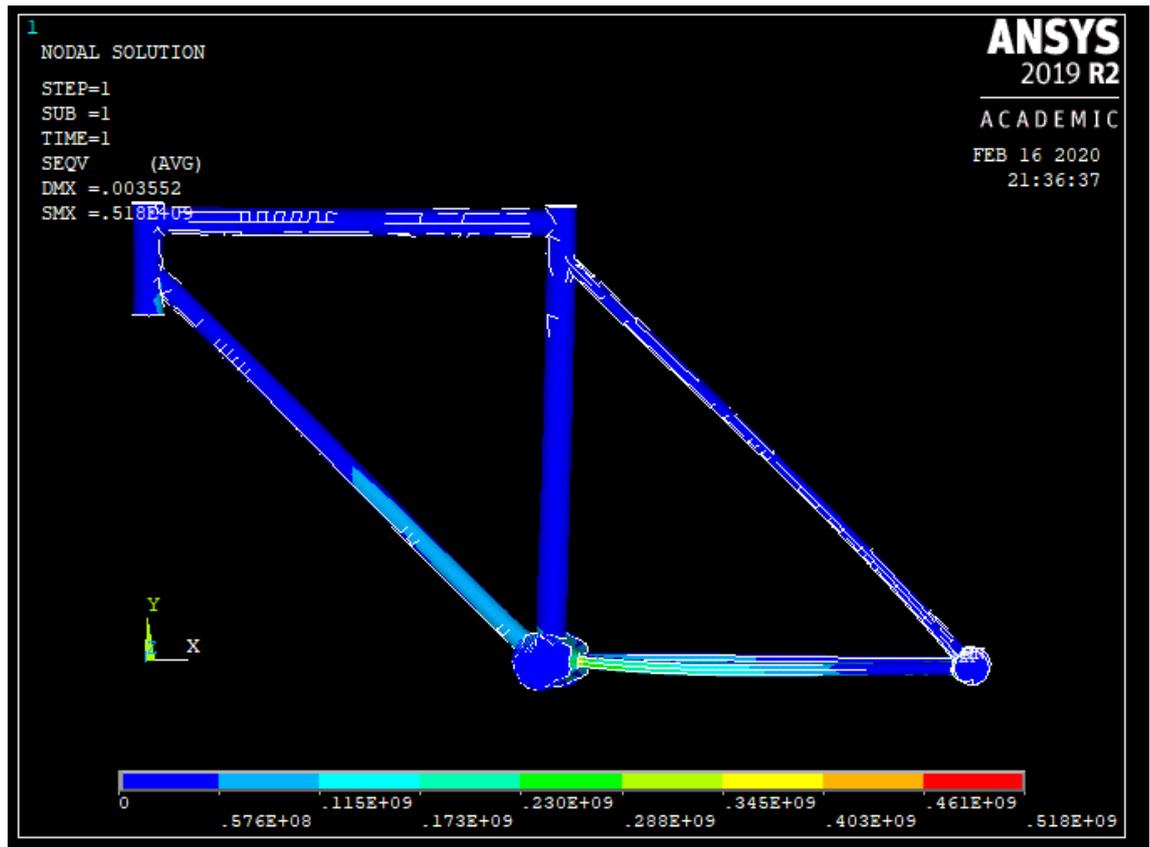


Figura 6.29. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono reforzada con Go con fuerzas de pedaleo

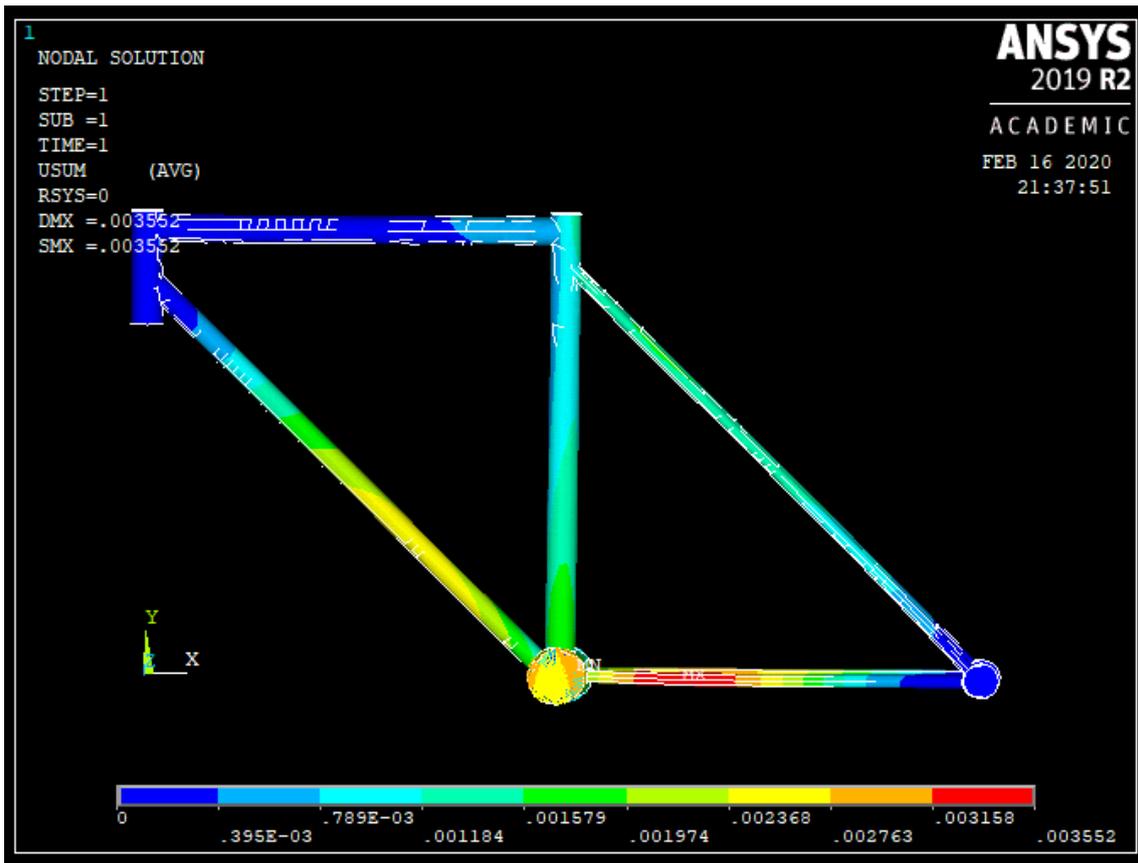


Figura 6.30. Deformación cuadro fibra de carbono reforzada con Go con fuerzas de pedaleo

Tabla 6-10. Resultados cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas de pedaleo

Tensión máxima (MPa)	518
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación	3.5E-3
Peso	1.75

### 6.3. Ensayo a fuerzas horizontales

#### 6.3.1. Ensayo cuadro fabricado en acero

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de acero sometido a fuerzas horizontales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 372 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.8.

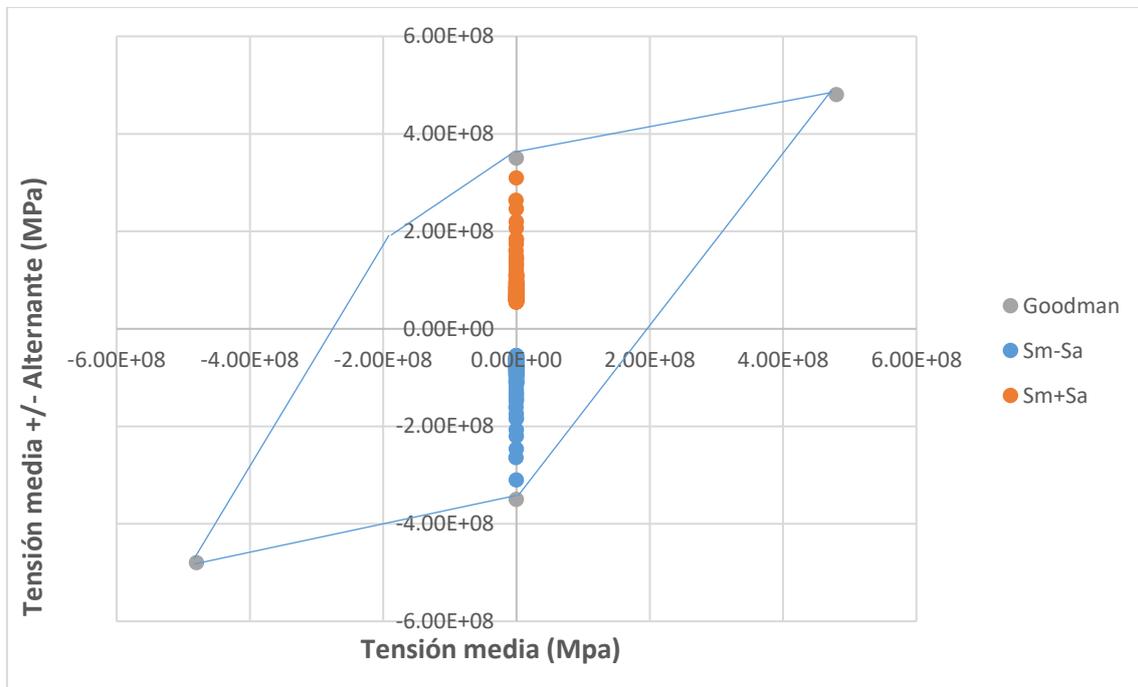


Figura 6.31. Validación Goodman cuadro acero con fuerzas horizontales

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

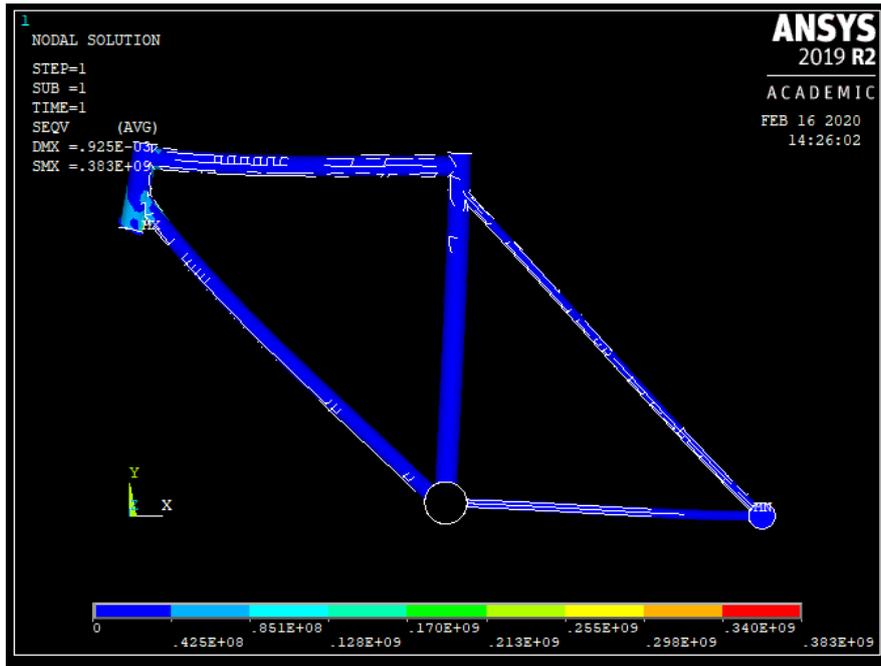


Figura 6.32. Tensión Von Mises cuadro acero con fuerzas horizontales

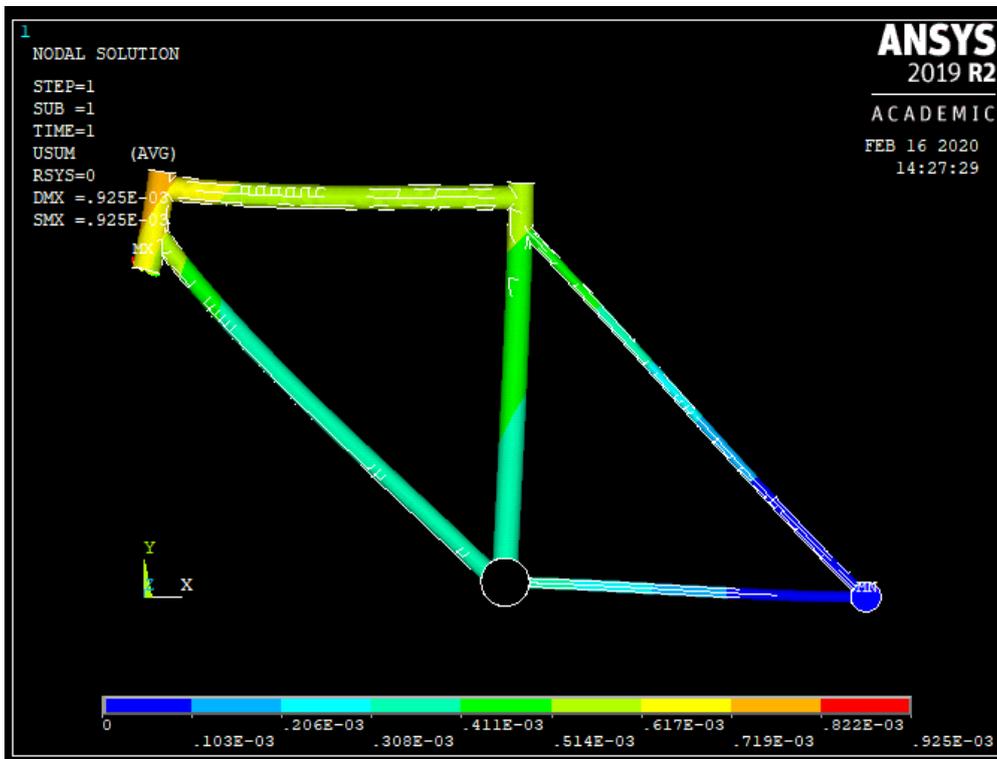


Figura 6.33. Deformación cuadro acero con fuerzas horizontales

Tabla 6-11. Resultados cuadro acero con fuerzas horizontales

Tensión máxima (MPa)	383
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	0.925E-3
Peso (kg)	6.5

### 6.3.2. Ensayo cuadro fabricado en aluminio

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de aluminio sometido a fuerzas horizontales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia Sf de 270 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.9.

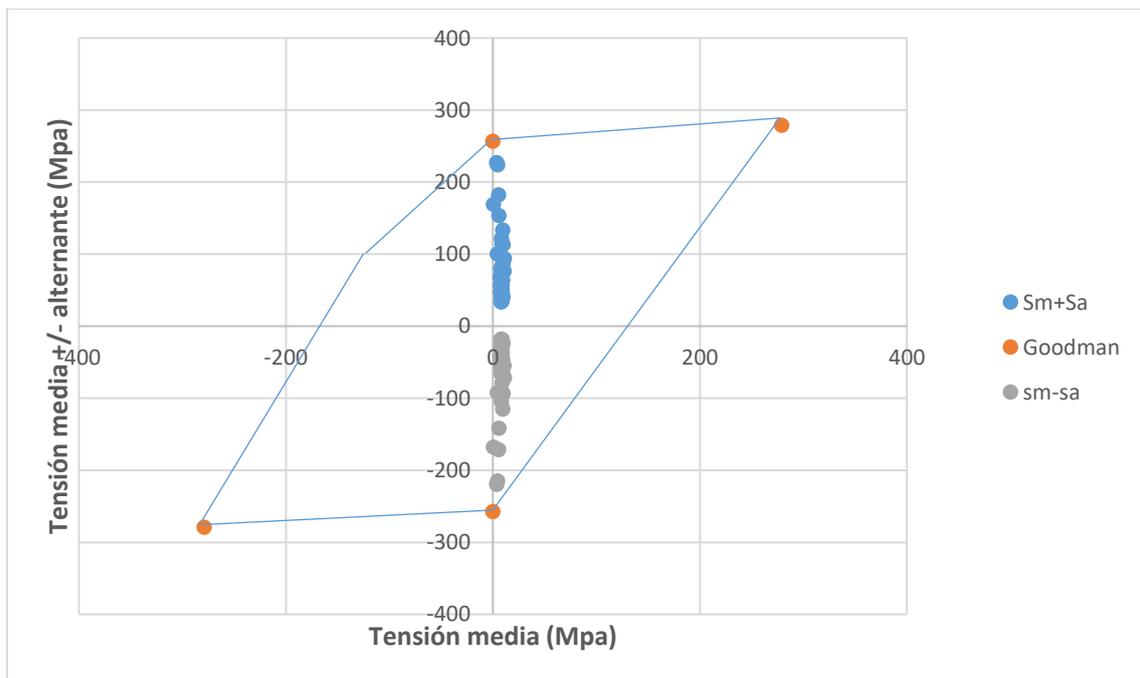


Figura 6.34. Validación cuadro aluminio con fuerzas horizontales



Figura 6.35. Tensión Von Mises cuadro aluminio con fuerzas horizontales

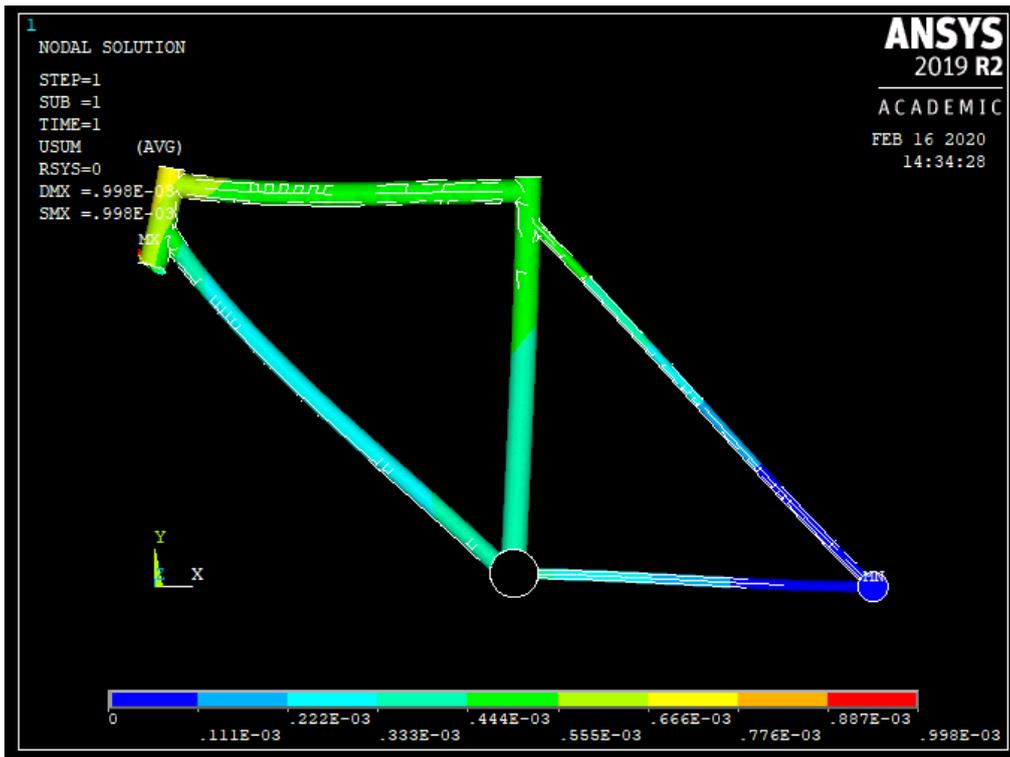


Figura 6.36. Deformación cuadro aluminio con fuerzas horizontales

Tabla 6-12. Resultados cuadro aluminio con fuerzas horizontales

Tensión máxima (MPa)	254
Tensión mínima (MPa)	0
Deformación máxima	0.990E-3
Peso (kg)	4.61

### 6.3.3. Ensayo cuadro fabricado en titanio

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de titanio sometido a fuerzas de pedaleo.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia Sf de 198 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.10.

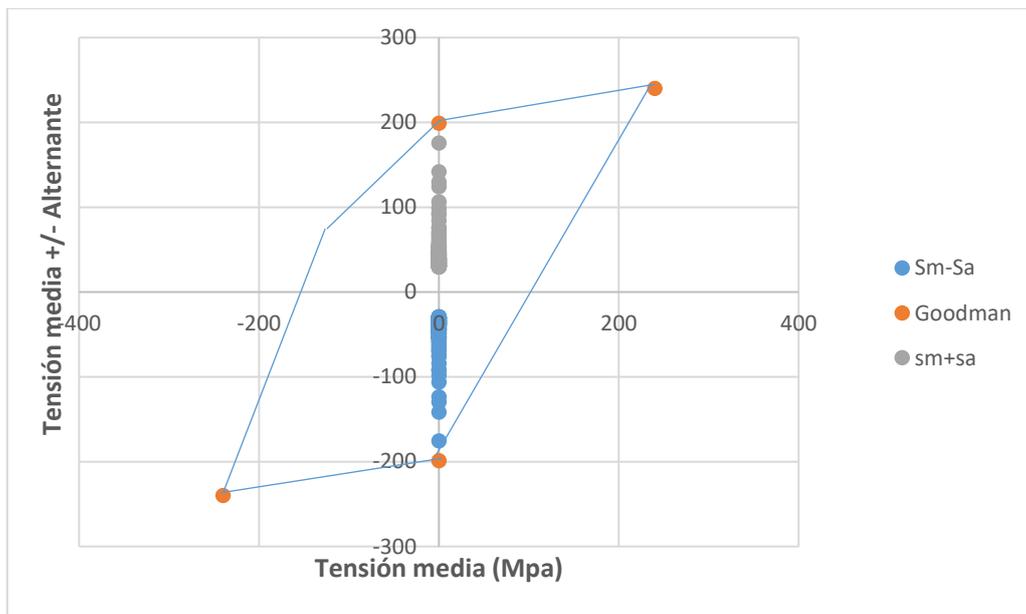


Figura 6.37. Validación Goodman cuadro titanio con fuerzas horizontales

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno



Figura 6.38. Tensión Von Mises cuadro titanio con fuerzas horizontales



Figura 6.39. Deformación cuadro titanio con fuerzas horizontales

Tabla 6-13. Resultados cuadro titanio con fuerzas horizontales

Tensión máxima (MPa)	177
Tensión mínima (MPa)	-177
Deformación máxima	0.450E-3
Peso (kg)	7.4

#### 6.3.4. Ensayo cuadro fabricado con fibra de carbono

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de fibra de carbono sometido a fuerzas horizontales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 530 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.11.

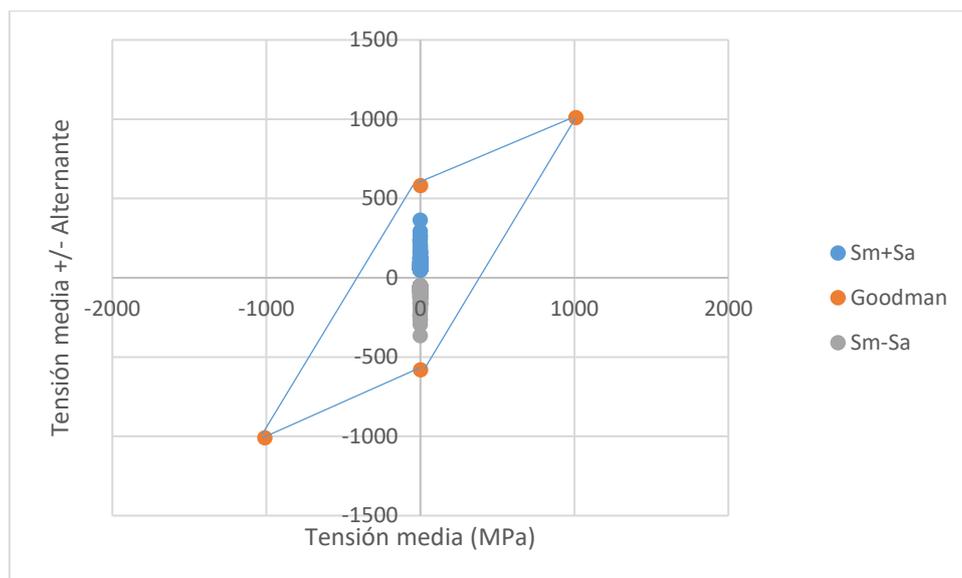


Figura 6.40. Validación cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales



Figura 6.41. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales

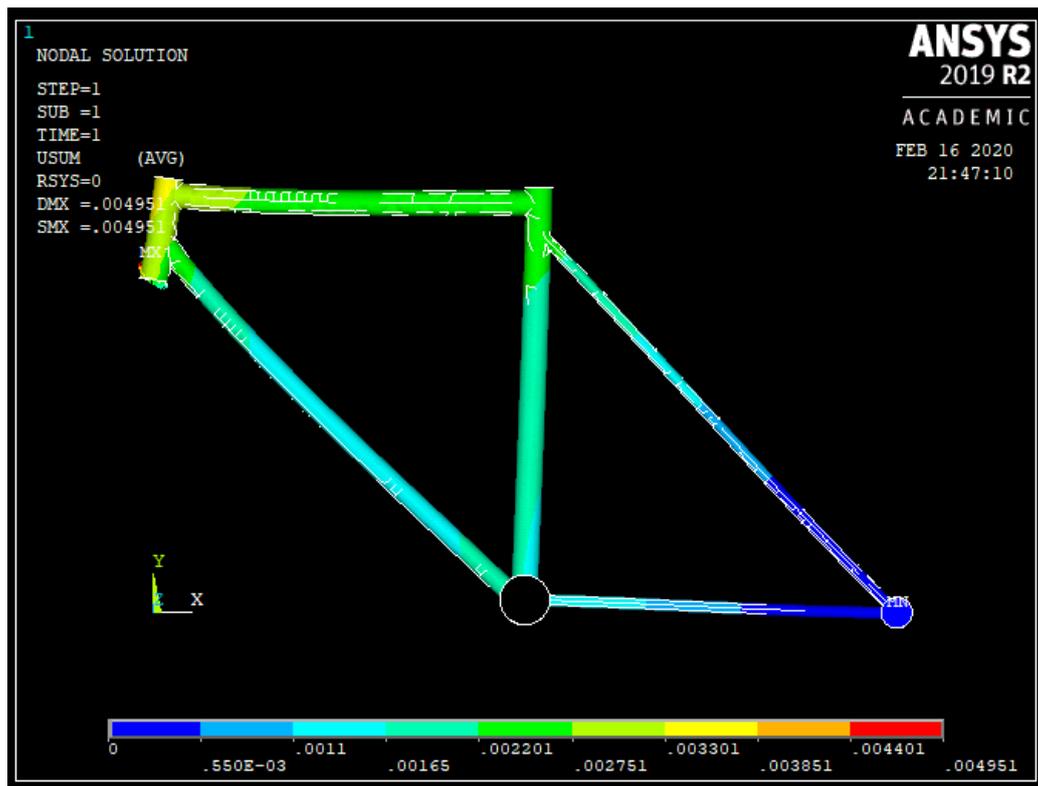


Figura 6.42. Deformación cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales

Tabla 6-14. Resultados cuadro fibra de carbono con fuerzas horizontales

Tensión máxima (MPa)	456
Tensión mínima (MPa)	-456
Deformación	4.9E-3
Peso (kg)	1.98

### 6.3.5. Ensayo cuadro fabricado con fibra de carbono reforzado con GO

A continuación se exponen los resultados para el ensayo del cuadro de fibra de carbono reforzada con GO sometido a fuerzas horizontales.

Se exponen los resultados de validación de la teoría de Goodman a fatiga y los resultados de tensión de Von Mises y deformación.

Para construir la línea de validación de Goodman se aplica una resistencia  $S_f$  de 530 MPa correspondiente a 100000 ciclos según la tabla 5.11.

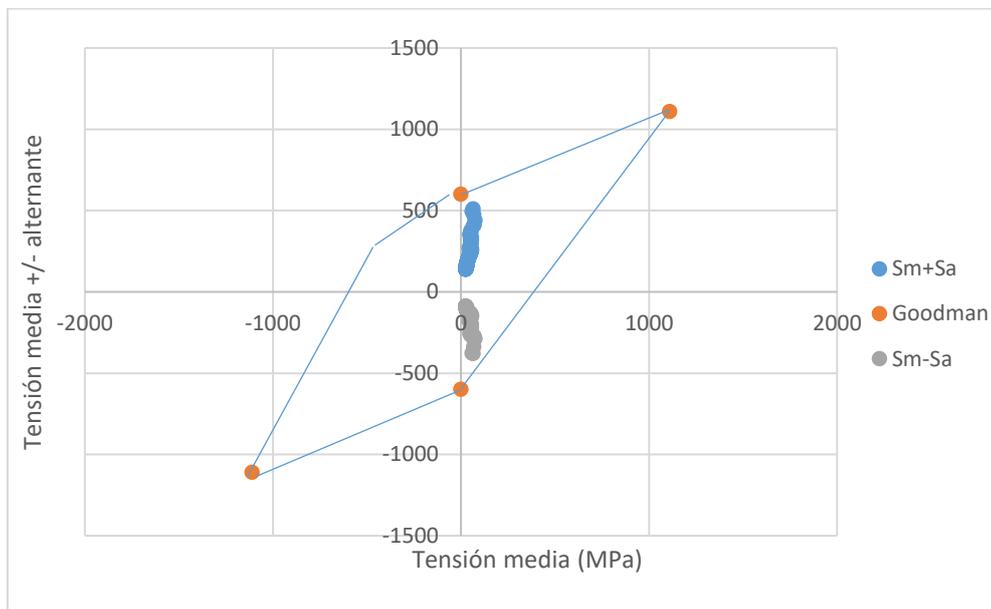


Figura 6.43. Validación Goodman cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno



Figura 6.44. Tensión Von Mises cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales



Figura 6.45. Deformación cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

*Tabla 6-15. Resultados cuadro fibra de carbono reforzada con GO con fuerzas horizontales*

Tensión máxima (MPa)	507
Tensión mínima (MPa)	-507
Deformación	4.95E-3
Peso (kg)	1.75

## 7. Presupuesto

Se exponen en este apartado las principales partidas del presupuesto que conlleva la elaboración del presente proyecto.

Tabla 7-1. Presupuesto proyecto

	Recurso	Coste unitario (€)	Medición	Coste total (€)
Hardware	Equipo informático	500	1	500
Software	Licencia Ansys	3.28	200	656
	Licencia Office	1.04	150	156
	Licencia Solid Edge	69	100 h	4
Normativa	Recurso	Coste unitario	Medición	Coste total
	UNE EN ISO 4210-1	42	1	42
	UNE EN ISO 4210-6	52	1	52
Personal	Horas trabajadas	10	450	4500
Total				5910

## 8. Conclusiones

Como se puede observar, el cuadro de bicicleta fabricado con fibra de carbono reforzadas con óxido de grafeno, es el cuadro con el menor peso debido a la mayor resistencia a tracción que permite disminuir el espesor del laminado.

Esta es la principal respecto a los demás materiales utilizados para realizar la comparación, por ejemplo es un 74 % más ligero que el acero (material más usado entre los años 40 y 80 en bicicletas de competición) y un 11.4 % más ligera que el cuadro fabricado con fibra de carbono (material más usado en la actualidad en cuadros de bicicleta de competición).

En cambio, el cuadro fabricado en fibra de carbono reforzada con óxido de grafeno, al igual que pasa con el cuadro fabricado con fibra de carbono, presenta una mayor deformación que los cuadros fabricados con materiales convencionales, por ejemplo, presenta un 215 % de deformación respecto al cuadro fabricado en acero.

Esto se debe al menor módulo de Young de las fibras. Pero esta deformación del cuadro de fibra de carbono reforzada con óxido de grafeno es equivalente a la deformación que presenta el cuadro fabricado con fibra de carbono por lo que no es una desventaja respecto a los cuadros de competición actuales.

En definitiva, el cuadro de fibras de carbono reforzado con óxido de grafeno, supone una disminución del espesor del laminado al aumentar el límite elástico respecto al laminado de fibra de carbono. La principal desventaja y el hecho de que hasta ahora, no se implante este nuevo laminado en los cuadros de bicicleta de competición, es económico, ya que sí se observa un incremento de las propiedades mecánicas respecto a otros materiales.

## Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

### Ensayo por fuerzas verticales

Material	Acero	Aluminio	Titanio	Fibra de carbono	Fibra de carbono reforzada con GO
Tensión (MPa)	304	243	181	585	598
Deformación	0.554E-3	0.468E-3	0.206E-3	1.96E-3	1.99E-3
Peso (kg)	6.5	4.61	7.4	1.98	1.75

### Ensayo por fuerzas de pedaleo

Material	Acero	Aluminio	Titanio	Fibra de carbono	Fibra de carbono reforzada con GO
Tensión (MPa)	236	177	156	518	532
Deformación	1.3E-3	0.363E-3	0.497E-3	3.5E-3	3.5E-3
Peso (kg)	6.5	4.61	7.4	1.98	1.75

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

Ensayo por fuerzas horizontales

Material	Acero	Aluminio	Titanio	Fibra de carbono	Fibra de carbono reforzada con GO
Tensión (MPa)	383	254	177	456	507
Deformación	0.925E-3	0.99E-3	0.45E-3	4.9E-3	4.95E-3
Peso (kg)	6.5	4.61	7.4	1.98	1.75

## Bibliografía

- [1] J. P. R. Palacio, Bicicletas muy antiguas, Susaeta ediciones S.A., 2017.
- [2] «"El material del siglo XXI" [https://verne.elpais.com/verne/2017/04/19/articulo/1492597692\\_626497.html](https://verne.elpais.com/verne/2017/04/19/articulo/1492597692_626497.html) (Último acceso: Noviembre 2019),» 2017.
- [3] «"Bicicletas de carretera Cannondale" <https://www.cannondale.com/es-es/bikes/road#sort=%40msrpraw%20descending> (Último acceso: Diciembre 2019)».
- [4] «"Bicicleta de montaña decathlon" [https://www.decathlon.es/es/browse/b/rockrider/\\_/N-15bccbh](https://www.decathlon.es/es/browse/b/rockrider/_/N-15bccbh) (Último acceso: Septiembre 2019)».
- [5] «"Clasificación bicicletas" <https://labicicleta.info/tipos-de-bicicleta/> (Último acceso: Enero 2020)».
- [6] «"Distintos materiales cuadros de bicicleta" <https://tuvalum.com/blog/guia-materiales-cuadros-bicicleta/> (Último acceso: Octubre 2019)».
- [7] «"Propiedades mecánicas de los materiales" <http://materialesdeingenieria2013.blogspot.com/2013/> (Último acceso: Septiembre 2019)».
- [8] A. Miravete De Marco, E. Larrode Pellicer y L. Castejon, Materiales compuestos, ANTONIO MIRAVETE DE MARCO, 2011.
- [9] «Apuntes de la asignatura "Teoría de estructuras ligeras" Curso: 4º.».
- [10] G. V. Martínez, Fabricación aditiva con materiales compuestos de grafeno. Estudio de la resistencia mecánica a tracción, 2018.
- [11] «"Grafeno, el material del futuro" <http://www.automaticaeinstrumentacion.com/es/notices/2019/03/grafeno-el-material-del-presente-con-mucho-futuro-45301.php> (Último acceso: Enero 2020)».
- [12] «"Bicicletas de carretera Trek" [https://www.trekbikes.com/es/es\\_ES/](https://www.trekbikes.com/es/es_ES/) (Último acceso: Enero 2020)».
- [13] «"Bicicletas de carretera Orbea" <https://www.orbea.com/es-es/> (Último acceso: Diciembre 2019)».
- [14] «"Bicicletas de carretera Merida" <https://www.merida-bikes.es/> (Último acceso: Enero 2020)».
- [15] «Ingemecánicas <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn217.html> (Último acceso: Febrero 2020)».
- [16] «"Mecánica de los materiales" Universidad <http://www.ula.ve/facultad->

Viabilidad del diseño de cuadros de bicicleta de grafeno

ingenieria/images/mecanica/Mecanica\_Materiales/II/TEMA\_III\_2.pdf (Último acceso:Enero 2020)».

- [17] G. Watson, K. Starost, P. Bari, N. Faisal, S. Mishr y J. Njuguna, Tensile and Flexural Properties of Hybrid Graphene Oxide / Epoxy Carbon Fibre Reinforced, 2017.