

# Trabajo Fin de Master Master en Ingeniería Industrial

Prediseño y Análisis Numérico de un  
prototipo de cuadro de bicicleta en CFRP

**Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación**  
**Dep. Elasticidad y Resistencia de Materiales**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# **Prediseño y Análisis Numérico de un prototipo de cuadro de bicicleta en CFRP**

Autor:

Pedro Cañizares Gómez de Terreros

Tutor:

Carpóforo Vallellano Martín

José Cañas Delgado

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Dep. Elasticidad y Resistencia de Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Máster: Prediseño y Análisis Numérico de un prototipo de cuadro de bicicleta en CFRP

Autor: Pedro Cañizares Gómez de Terreros

Tutores: Carpóforo Vallellano Martin y José Cañas Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

La realización de este trabajo ha sido gracias a muy buenas personas allegadas a mí que al contarles mis ideas descabelladas en vez de decirme que me quitase esos pájaros de la cabeza, creyeron y valoraron mis ideas y me dieron cada uno un pequeño empujón para que siguiese trabajando en ellas.

Gracias a todos ellos, he trabajado, desarrollado, y aprendido acerca de aquello que me ilusiona y me motiva, por ese motivo, al menos, dedicarles estas breves líneas.

Para comenzar, a mis tutores, a Foro y Pepe con los que espero no perder mi relación con ellos tras terminar mis estudios.

A mis compañeros, en especial a Fátima, Adalid, y Luis tras tantos años de amistad y trabajo, los que quedan...

A Irene le vuelvo a agradecer estos años, su paciencia, su apoyo, y todo el amor que me ha demostrado y sigue demostrándome a pesar de las adversidades.

A mis padres, que son el motivo y el soporte de haberme convertido en la persona que soy hoy.





# Resumen

---

El objeto del proyecto que a continuación se expone es el pre-diseño de un cuadro de bicicleta en fibra de carbono, su análisis estructural y a fatiga a través de elementos finitos.

El diseño es totalmente novedoso y no convencional ya que está íntimamente relacionado con el desarrollo de un nuevo proceso de fabricación de materiales compuestos.

La finalidad de las simulaciones es, determinar el espesor mínimo para los tubos del cuadro, que haga resistir al conjunto todos los ensayos estudiados.

En el proyecto se estudian los antecedentes, tipologías y los diferentes componentes de las bicicletas para disponer de una visión global a la hora de diseñar el cuadro. También se exponen los diferentes materiales, sus características y propiedades convencionalmente empleados en la fabricación de cuadros de bicicletas.

Centrándose en los requisitos de seguridad y calidad, hay que considerar la normativa vigente de la Asociación Española de Normalización y Certificación. En ella, es especialmente relevante considerar el fallo del cuadro debido a fatiga, por lo tanto se ha indagado en el estudio de la misma para materiales compuestos.

En conclusión, se ha conseguido validar un pre-diseño innovador de una bicicleta.



# Abstract

---

The purpose of the project exposed is the pre-design of a carbon fiber bicycle frame, structural and fatigue analysis by finite elements.

The design is totally new and unconventional as it is closely related to the development of a new manufacturing process of composites.

The purpose of the simulations is to determine the minimum thickness for the frame tubes, which make the whole resist all trials studied.

In the project, the background, types and the different components of the bikes have been studied to have a global vision when designing the frame. Different materials, their characteristics and properties conventionally used in the manufacture of bicycle frames are also on display.

Focusing on safety and quality requirements, consider the current regulations of the Spanish Association for Standardization and Certification. It is especially important to consider the failure due to fatigue therefore has delved into the study of it for composites.

In conclusion, it has been possible pre-validate an innovative design of a bicycle.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>7</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>9</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>11</b>
<b>Índice</b> .....	<b>13</b>
Índice de Tablas .....	<b>15</b>
Índice de Figuras.....	<b>17</b>
<b>1 Objeto y Motivación</b> .....	<b>19</b>
<b>2 Antecedentes</b> .....	<b>20</b>
<b>3 Componentes de Bicicleta</b> .....	<b>23</b>
<b>4 Materiales</b> .....	<b>27</b>
4.1 Acero.....	27
4.2 Titanio.....	27
4.3 Scandium.....	28
4.4 Cromoly .....	28
4.5 Aluminio .....	28
4.6 Fibra de Carbono.....	31
<b>5 Normativa</b> .....	<b>35</b>
<b>6 Fatiga</b> .....	<b>37</b>
6.1 <i>Introducción a la Fatiga</i> .....	37
6.2 <i>Fatiga en Materiales Compuestos</i> .....	39
6.3 <i>Métodos de cálculo de vida a fatiga</i> .....	42
6.4 <i>Datos experimentales de vida a fatiga de fibra de carbono</i> .....	50
<b>7 Diseño y Análisis</b> .....	<b>53</b>
7.1 <i>Consideraciones generales en el Diseño</i> .....	54
7.2 <i>Consideraciones generales en el Cálculo</i> .....	56
7.3 <i>Ensayo con fuerzas de pedaleo</i> .....	58
7.4 <i>Ensayo por fuerzas horizontales</i> .....	62
7.5 <i>Ensayo con una fuerza vertical</i> .....	66
<b>8 Conclusiones y Desarrollos futuros</b> .....	<b>70</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>71</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>72</b>



# Índice de Tablas

---

Tabla 1 – Tipología de bicicletas	21
Tabla 2 – Propiedades de distintas fibras de usos generales y aplicaciones aeroespaciales	34
Tabla 3 – Propiedades para las fibras “pitch”	34
Tabla 4 – Variación del módulo de Young según la dirección considerada en fibras de carbono	34
Tabla 5 – Propiedades mecánicas de tejido fibra de carbono prepeg	50
Tabla 6 – Datos ensayo fuerzas de pedaleo	58
Tabla 7 – Resultados del ensayo fuerzas de pedaleo	59
Tabla 8 – Datos ensayo fuerzas horizontales	62
Tabla 9 – Resultados del ensayo fuerzas horizontales	63
Tabla 10 – Datos ensayo fuerza vertical	66
Tabla 11 – Resultados del ensayo fuerza vertical	67





# Índice de Figuras

---

Ilustración 1 – Primer modelo de bicicleta de Karl Drais	20
Ilustración 2 – Evolución histórica de la bicicleta	21
Ilustración 3 – Componentes de la bicicleta	23
Ilustración 4 – Materiales compuestos	31
Ilustración 5 – Grafica tensión-deformación materiales compuestos	32
Ilustración 6 – Clasificación de materiales compuestos	33
Ilustración 7 – a) Estructura de las fibras de carbono. b) Átomos de carbono en las capas planas de grafeno.	33
Ilustración 8- Ciclos de Carga	37
Ilustración 9 – Curva S-N típica de metales.	38
Ilustración 10 – Zonas de la evolución de los mecanismo de fatiga en metales	38
Ilustración 11 – Rotura de Ejes por Fatiga	38
Ilustración 12 – Etapas en el proceso de fatiga materiales metálicos	39
Ilustración 13 – Mecanismos de daño: a) rotura de las fibras, b) pandeo de fibras por esfuerzos de compresión, c) <i>debonding</i> , d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación.	41
Ilustración 14 – Modos de daño y fractura en un compuesto unidireccional sometido a esfuerzo axial: a) dispersión del daño, b) daño disperso antes del fallo, c) propagación del daño a partir de una entalla inicial	41
Ilustración 15 – Curva S-N	43
Ilustración 16 – Carga cíclica típica	44
Ilustración 17 – Comparación de datos de fatiga biaxial para distintos métodos basados en tensiones equivalentes	45
Ilustración 18 – Curvas de vida constante según la Ley de Goodman para un material de comportamiento simétrico	46
Ilustración 19 – Relación entre tensiones alternas y medias adimensionales para CFRP	48
Ilustración 20 – Dependencia de los parámetros u, v para algunos CFRP	48
Ilustración 21 – Comparación de datos de fatiga para distintos CFRP	49
Ilustración 22 – Grafica tensión – nº de ciclos para probetas 0°/90°	51
Ilustración 23 – Curva adimensionalizada tensión - nº de ciclos	52
Ilustración 24 – Boceto conceptual del diseño del cuadro	54
Ilustración 25 – Diseño del cuadro con Solidedge	55
Ilustración 26 – Modelos del cuadro impresas 3D en FDM	55
Ilustración 27 – Interfaz simulaciones con Ansys WorkBench	56

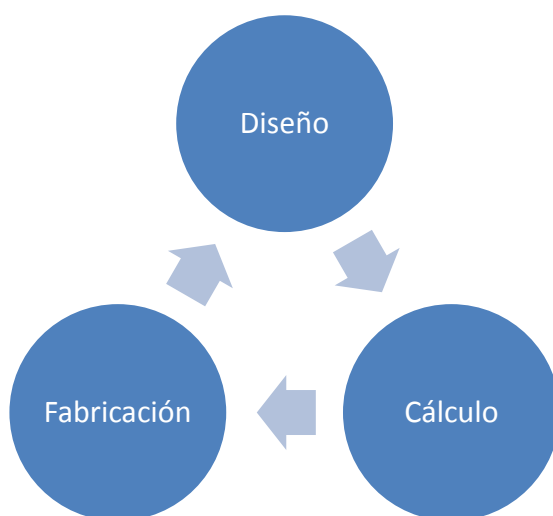
Ilustración 28 – Propiedades de material a introducir	56
Ilustración 29 – Diseño CAD importado a Ansys	57
Ilustración 30 – Cuadro. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo	58
Ilustración 31 – Tensión de Von Mises. Ensayo fuerzas de pedaleo	60
Ilustración 32 – Deformación total. Ensayo fuerzas de pedaleo	60
Ilustración 33 - Deformación elástica. Ensayo fuerzas de pedaleo	60
Ilustración 34 – Vida a fatiga. Ensayo fuerzas de pedaleo	61
Ilustración 35 – Factor de seguridad. Ensayo fuerzas de pedaleo	61
Ilustración 36 – Cuadro. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales	62
Ilustración 37 - Tensión de Von Mises. Ensayo fuerzas horizontales	63
Ilustración 38 - Deformación total. Ensayo fuerzas horizontales	64
Ilustración 39 - Deformación elástica. Ensayo fuerzas horizontales	64
Ilustración 40 - Vida a fatiga. Ensayo fuerzas horizontales	64
Ilustración 41 - Factor de seguridad. Ensayo fuerzas horizontales	65
Ilustración 42 – Cuadro. Ensayo de fatiga por fuerza vertical	66
Ilustración 43 - Tensión de Von Mises. Ensayo fuerza vertical	68
Ilustración 44 - Deformación total. Ensayo fuerza vertical	68
Ilustración 45 - Deformación elástica. Ensayo fuerza vertical	68
Ilustración 46 -Vida a fatiga. Ensayo fuerza vertical	69
Ilustración 47 - Factor de seguridad. Ensayo fuerza vertical	69

# 1 OBJETO Y MOTIVACIÓN

---

**E**n mis años en la escuela, pude aprender muchísimo acerca del fascinante y moderno material que es la fibra de carbono. Material compuesto con unas características extraordinarias de resistencia junto con su ligereza, rompiendo los antiguos esquemas en los que un material resistente era sinónimo de pesado.

Mi intención era aprender a ser capaz de desarrollar las ideas. Desarrollar todo el camino desde la concepción de una idea hasta hacerla físicamente real. Entonces decidí aprender técnicas de **diseño, cálculo y fabricación**. El concepto más importante que se puede aprender de este trabajo es que esas tres fases o etapas del proceso del desarrollo de un producto no son independientes, aunque normalmente en las empresas tradicionales sean departamentos totalmente diferenciados. Este es un círculo realimentado en el cual uno no puede existir o mejor aún buscar el óptimo sin el otro. Para comenzar a diseñar es muy importante tener en mente el concepto de fabricabilidad del producto que se quiere realizar. Su geometría no puede ser arbitraria, hay que ser conscientes de que el diseño hay que fabricarlo. Esto es precisamente lo que se pretende desarrollar en este trabajo.



El proyecto se centra en el diseño y cálculo de un cuadro de bicicleta en material compuesto, concretamente en fibra de carbono ya que es la más empleada en la alta competición del sector del ciclismo. En ese ámbito el objetivo es optimizar al máximo características como: el peso, la aerodinámica, los estados modales, la ergonomía del ciclista, etc.

Indagar en el estudio de este tipo de material es interesante al tener unas características de comportamiento y de fabricación no comparables con materiales metálicos convencionalmente más utilizados.

Los objetivos de familiarizarse con la normativa de diseño y cálculo, así como con los programas de cálculo por elementos finitos se han conseguido gracias al trabajo realizado, el cual queda expuesto en este documento. En cambio, el proceso de fabricación, que se llevará a cabo en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, está fuera del alcance de este proyecto.

## 2 ANTECEDENTES

---

La bicicleta es un vehículo de transporte personal cuyos componentes básicos son dos ruedas generalmente de igual diámetro y dispuestas en línea, un sistema de transmisión a pedales, un cuadro metálico que le da la estructura e integra los componentes, un manillar para controlar la dirección y un sillín para sentarse. El desplazamiento se obtiene al girar con las piernas la caja de los pedales que a través de una cadena hace girar un piñón que a su vez hace girar la rueda trasera sobre el pavimento. El diseño y configuración básica de la bicicleta ha cambiado poco desde el primer modelo de transmisión de cadena. [1]

Alrededor de 1817, Karl Drais von Sauerbronn inventó la draisiana, que acabaría dando lugar a la bicicleta. No tenía pedales, el usuario se empujaba con los pies, como si fuese patinando.



Ilustración 1 – Primer modelo de bicicleta de Karl Drais

La construcción de la primera bicicleta con pedales se atribuye al escocés Kirkpatrick Macmillan, en el año 1839. Nunca patentó el invento, y posteriormente fue copiado en 1846 por Gavin Dalzell de Lesmahagow, quien lo difundió tan ampliamente que fue considerado durante cincuenta años el inventor de la bicicleta.

Cerca de 1890, John Boyd Dunlop inventó una cámara de tela y caucho, que se inflaba con aire y se colocaba en la llanta. Para evitar pinchazos, Dunlop inventó además una cubierta también de caucho. Estos inventos de Dunlop casi no han sufrido variaciones significativas desde su invención.

En la siguiente imagen se puede ver ver cuál ha sido la evolución, desde la draisiana hasta la bicicleta que usamos actualmente.

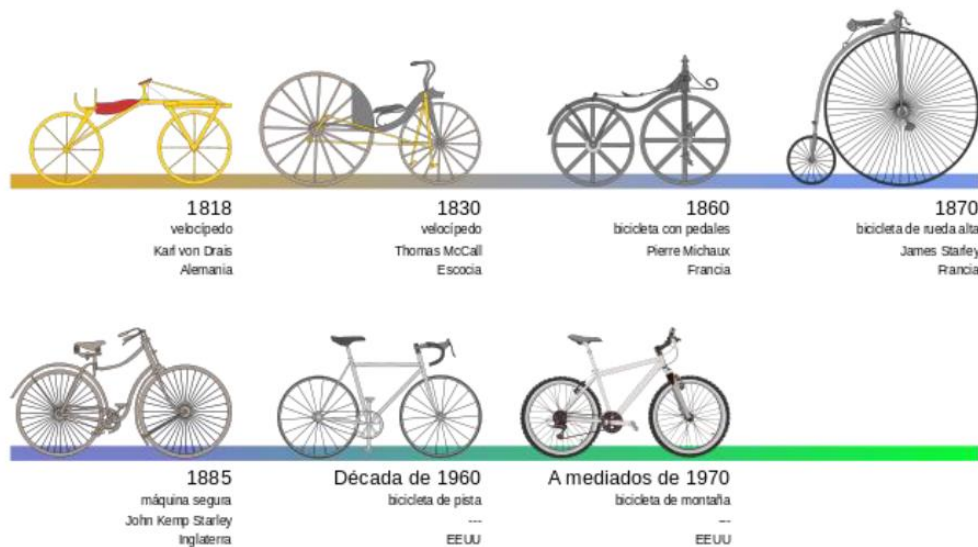


Ilustración 2 – Evolución histórica de la bicicleta

Actualmente la bicicleta es considerada uno de los medios de transporte más empleados a nivel mundial. Las características más relevantes como vehículo pueden ser: su ligereza, agilidad y versatilidad las cuales permiten realizar desplazamientos en cualquier tipo de terrenos. La bicicleta sigue en continua evolución debido al desarrollo de nuevas tecnologías y nuevos materiales, y así sus diseños van variando aun manteniendo constantes ciertos parámetros de diseño.

Distintas clasificaciones pueden realizarse a los distintos tipos de bicicletas, se considera que según su funcionalidad puede ser el más relevante. Seguidamente se muestra una tabla con una clasificación con varias características generales.

Tipo de Bicicleta	Usos	Materiales del cuadro	Propulsión	Fotografía
Mountain Bike	Todoterreno	Aluminio y/o Fibra de Carbono	Humana	
Ruta	Carretera	Fibra de carbono	Humana	
Paseo	Ciudad y caminos	Aluminio	Humana	
Plegable	Ciudad	Acero	Humana	
Trial	Bosque y triales	Aluminio	Humana	
BMX	Skateparks	Aluminio	Humana	
Eléctrica	Ciudad y carretera	Aluminio	Humana combinada con un motor eléctrico	

Tabla 1 – Tipología de bicicletas

Analizando la tabla anterior se puede observar claramente las similitudes de todos los tipos de bicis, diferenciándose en geometría, diseño o elementos en función de la aplicación o entorno concreto en la que será empleada. Podemos también apreciar el dominio claro del empleo del aluminio en la actualidad gracias al equilibrio de sus características de densidad-resistencia-precio.

# 3 COMPONENTES DE BICICLETA

Antes de comenzar con el diseño es conveniente explicar los componentes de los que se compone una bicicleta para así conocer los requisitos funcionales del diseño del cuadro.

Se ha elegido exponer los componentes de una bicicleta de montaña ya que es el tipo de modelo que se puede componer por más elementos. El resto de tipos de bicicletas varían en topología y son compuestas por menos elementos, como pueden ser las suspensiones. A continuación, se enumeran y describen los componentes que se pueden apreciar en la siguiente imagen.



Ilustración 3 – Componentes de la bicicleta

### **1. Sillín**

Está compuesto por dos partes a su vez, los raíles que es la parte que se agarra a la tija, y el sillín. Los raíles están hechos normalmente de acero, aluminio, titanio ó fibra de carbono, siendo estos dos últimos los materiales utilizados en la gama alta.

### **2. Tija**

Es el componente que conecta el sillín con el resto de la bici, permite regular la altura a la que se coloca el sillín dependiendo de la estatura del usuario de la bicicleta. De este componente podemos encontrar diferentes tamaños en el mercado, tanto de diámetro de tubo como de longitud. Además de diferentes materiales, tales como: acero, aluminio, titanio, fibra de carbono y Scandium.

### **3. Cuadro**

Parte principal de la bicicleta, o estructura sobre la cual se van montando las diferentes partes o piezas que la componen. Existen básicamente dos tipos de cuadros, atendiendo a si llevan suspensión trasera o no: rígidos y dobles. Esta parte de la bicicleta podemos encontrarla en el mercado hecha con acero, aluminio, fibra de carbono o titanio, siendo el aluminio el material más utilizado y utilizado hoy en día, aunque la fibra de carbono comienza a introducirse en el mercado.

### **4. Potencia.**

Pieza que se utiliza para mantener la horquilla y el manillar sujetos al cuadro, de este componente al igual que en el caso de la tija podemos encontrar diferentes medidas tanto de longitud, como de ángulo de inclinación. Las potencias pueden estar hechas de acero, aluminio, Scandium, fibra de carbono y fibra de carbono.

### **5. Horquilla**

Una de las piezas más importantes de la bici ya que en ella se coloca la rueda delantera y se fija mediante un cierre rápido. Esta pieza está compuesta a su vez de muchas otras. Su misión es la de amortiguar los posibles obstáculos que nos encontramos en un camino, así como absorber la fuerza que se ejerce en el frenado al utilizar el freno delantero. Normalmente las botellas (parte móvil) están hechas de algún metal recubierto con un baño protector, para evitar que se rayen y aumente su durabilidad. La parte fija o cuerpo está hecho con aluminio o acero, aunque también se pueden encontrar hechas con fibra de carbono. El tubo de dirección está hecho normalmente de aluminio o de fibra de carbono. Las horquillas pueden ser mecánicas (con elastómeros y muelles), con aceite, con aire y una combinación de aire y aceite.

### **6. Cubierta**

Parte de la bicicleta que se coloca en la llanta, está hecha de caucho al igual que las ruedas de una moto o un automóvil, aunque su tamaño sea más pequeño (diámetro 26 pulgadas) y su grosor también, aunque de este último podemos encontrar varios según sea la bicicleta y para que uso.

### **7. Disco de freno**

Componente de la bicicleta utilizado como superficie para frenar la bici al accionar los frenos, normalmente suelen estar hechos de aceros aleados, ya que son piezas que están continuamente expuestas a cambios de temperatura debido al roce de las pastillas de freno. Existen diferentes diámetros, que van desde los 140 mm hasta los 220 mm, que dependen del uso de la bicicleta, aunque el tamaño más extendido es el de 160 mm.

### **8. Pinza freno de disco**

Componente donde llega la fuerza transmitida desde la maneta de freno hasta las pastillas. La transmisión de esta fuerza se puede hacer bien de manera mecánica (mediante una sierga) o mediante una fuerza ejercida por un fluido (frenos hidráulicos), normalmente aceite, siendo estos últimos los más usados ya que accionan los pistones que mueven las pastillas de freno a cada lado y transmiten más fuerza que los de sierga.



### **9. Amortiguador trasero**

Componente que se utiliza al igual que la horquilla delantera para absorber las imperfecciones del terreno o irregularidades. Hay diferentes tamaños dependiendo del tipo de bici y del uso. Normalmente funcionan con aire o aceite o una combinación de las dos.

### **10. Pedal**

Existen dos tipos: los normales y los automáticos. Los pedales normales son los que todos conocemos y que cualquier bici que veamos por la calle llevan, y los automáticos son los pedales en los que la zapatilla que se utiliza es especial, lleva colocada una pieza de acero o aluminio llamada cala, que es el elemento que mantiene la zapatilla unida al pedal. Los pedales normalmente suelen ser de acero, aluminio, titanio ó Fibra de carbono aunque llevan diferentes piezas hechas con estos materiales, también se pueden encontrar hechos en fibra de carbono y titanio. Los pedales están unidos a las bielas mediante una unión roscada.

### **11. Bielas y platos**

Partes que se coloca en el eje de pedalier, los platos están unidos a las bielas mediante cuatro o cinco tornillos allen. Estas piezas se utilizan para transformar la fuerza que ejercemos con las piernas en un movimiento circular que transmite la fuerza a la rueda trasera mediante una cadena que engrana en los platos y los piñones. Normalmente las bielas están hechas con acero, aluminio, titanio ó fibra de carbono. Y los platos en aleaciones de acero, acero y componente cerámicos.

### **12. Cadena**

Pieza que está compuesta por la unión de unos eslabones mediante unos bulones, es de acero y se utiliza para transmitir la fuerza que ejercemos al pedalear a la rueda trasera donde engrana con los piñones o coronas.

### **13. Cambio trasero**

Es el elemento o parte de la bicicleta que tiene como principal misión el cambio de marcha o de corona, según sea la marcha que llevemos con la bicicleta o del terreno por el que circulemos. Normalmente están hechos de aluminio, titanio o composites. Además de llevar un muelle en su interior que es el que facilita sus movimientos. Esta colocado en la parte trasera, donde hay una rosca para atornillar el cambio mediante un tornillo allen.

### **14. Coronas o piñones**

Es la parte que colocada en el cassette, parte de la rueda trasera que permite transmitir la potencia de los piñones a la rueda, de la rueda trasera transmite el movimiento a la misma para poder mover la bicicleta. Están hechos de aceros aleados, ya que es uno de los componentes de la bicicleta que más desgaste soporta debido al rozamiento con la cadena y agentes externos como barro, polvo, . . . , etc.

### **15. Llanta**

Componente de la bicicleta que junto con los radios y el buje conforma la rueda, la llanta es el componente de la bicicleta donde se monta la cubierta, normalmente suelen estar fabricadas en acero, aluminio, materiales cerámicos y fibra de carbono, siendo este último material el que se ha introducido en el mercado.

### **16. Desviador o cambio delantero**

Es el elemento que se sujeta en el cuadro mediante una abrazadera metálica y su misión es la de cambiar de plato. Normalmente esta hecho de los mismos materiales que el cambio trasero, dependiendo del dinero que cueste o gama en la que este situada dentro del mercado.

### **17. Cierre tija – cuadro.**

Es el elemento que se utiliza para fijar la tija en el cuadro, se sujeta mediante un tornillo allen que se aprieta para mantener en una posición fija la tija. Estos cierres suelen estar fabricados en aceros o aleaciones de diferentes metales, además de titanio. En los cuadros de carbono y tijas de carbono hay que tener especial cuidado porque si al apretar nos pasamos podemos romper el cuadro y la tija.

### **18. Conjunto manillar**

Compuesto por manillar, manetas de freno, manetas de cambio, puños, latiguillos de freno y siergas de cambio.

### **19. Manillar**

Pieza que se sujeta a la potencia y en ella se colocan las manetas de freno y cambio, además de unos puños para mejorar el agarre de las manos al manillar. Con ello conseguimos dirigir la bici. Normalmente la mayoría están hechos con aluminio, aunque también hay de acero, titanio, aluminio, Scandium ó fibra de carbono. Siendo de fibra de carbono el de la foto donde se puede distinguir las fibras.

### **20. Puños**

Elemento que se coloca en el manillar para mejorar el agarre de la mano al mismo, normalmente son de diferentes tipos de plásticos gomosos o plásticos con aspecto espumoso.

### **21. Maneta de freno delantero**

Pieza utilizada para accionar los frenos, hay diferentes tipos de manetas dependiendo del tipo de freno utilizado: frenos de zapata, frenos de disco mecánicos y frenos de disco hidráulicos. Normalmente la mayoría de sus piezas suelen estar hechas con diferentes aluminios, aunque pueden llevar alguna parte de plástico.

### **22. Latiguillo de freno**

Es el elemento con forma de pequeño tubo por el cual va la sierga hasta el freno en el caso de los frenos de zapata o de disco mecánicos, o el fluido en el caso de los frenos de disco hidráulicos. Los latiguillos suelen estar fabricados en plástico.

### **23. Maneta cambio desviador**

Es la pieza que al accionar una de sus palancas podemos cambiar de marcha bien, bajar marchas o subir. La carcasa de las manetas de cambio suelen estar fabricadas en plástico o en composites, los elementos interiores en diferentes aleaciones metálicas y las palancas en plástico o en metales como titanio o aluminio, siendo estos dos utilizados únicamente en las gamas altas. Funciona de manera igual a la maneta de cambio trasero pero la única diferencia es que la maneta delantera solo está diseñada para tres posiciones y el trasero para 7, 8,9 o 10 dependiendo del cambio que llevemos.

### **24. Fundas y siergas de cambio**

Elementos que transmiten el accionamiento de las manetas de cambio al desviador y al cambio trasero. La sierga es la parte metálica que transmite dicho movimiento y la funda es la parte que la protege de agentes externos como el barro, polvo,..., etc. Normalmente las siergas suelen ser de acero, que es trenzado en pequeños hilos, y las fundas en plástico.

### **25. Maneta de freno trasero**

Idéntica en funcionamiento a la maneta de freno delantero por lo que la componen las mismas piezas, pero simétrica a esta con respecto a la posición media del manillar.

### **26. Maneta de cambio trasero**

Idéntica en funcionamiento a la maneta de cambio delantero aunque las diferencias son que puede hacer más cambios, ya que el cambio trasero puede hacer 7, 8, 9 ó 10 movimientos dependiendo siempre del número de piñones o coronas y además es simétrica a la de cambio delantero con respecto a la posición media el manillar.

# 4 MATERIALES

---

En este apartado se realizará una revisión de los materiales normalmente empleados a lo largo de la historia en la fabricación de bicicletas, y sus propiedades. Destacando el dominio claro de los materiales metálicos hasta comienzos del siglo XXI donde empezaron a entrar en el mercado las bicicletas de fibra.

En el grupo de materiales metálicos encontramos: el acero, el aluminio, el titanio, el Scandium, y el Cromoly. Además se comentará las propiedades del material compuesto fibra de carbono. En el mercado actual, las bicicletas con mayor éxito son las fabricadas con aluminio en diferentes versiones y aleaciones, y la fibra de carbono, por tanto se hará especial hincapié en estos.

A continuación se detalla cada material y las propiedades por las cuales se han utilizado para la fabricación de cuadros de bicicleta.

## 4.1 Acero

Es el material casi universal para la construcción de bicicletas más económicas. Hace unos diez años, era el material más utilizado, pero desde el momento en el que el aluminio entró en el mercado con unos costes un poco superiores, al ser menos pesado, poco a poco le fue ganando terreno hasta llegar al día de hoy.

Razones para utilizar el acero no faltan, es un material fácil de trabajar, de gran duración si lleva determinados tratamientos como el anti-oxidantes. Cabe destacar que su resistencia a la tracción va desde los 375 a 1800 MPa, dependiendo de la serie del acero empleado, y 210 MPa para conseguir doblarlo. Dentro del acero podemos encontrar dos clases utilizadas para la construcción de cuadros, el acero dulce y el acero Hi-ten.

- *El acero dulce.* Los cuadros que están hechos con este tipo de material no tienen en cuenta el factor de elasticidad, son cuadros de tuberías gruesas provenientes del laminado de acero dulce soldado con costuras eléctricas. Es utilizado en las bicicletas más económicas y las destinadas a los niños, aunque estas últimas ya son de aluminio.

- *El acero Hi-ten.* Este tipo de acero no es mucho más caro que el acero dulce, pero si tiene unas propiedades un poco mejores debido a los tratamientos térmicos, es un acero con bajo contenido en carbono. Es usado generalmente en las gamas más bajas y cuando el peso no es una consideración importante.

## 4.2 Titanio

Hoy en día este material sigue usándose en la industria de la bicicleta aunque de una manera muy reducida. Cabe destacar que la cuota de mercado de los cuadros para bicicleta de competición siempre ha sido muy pequeña, aunque alcanzo su máxima cuota de mercado a mediados de los años 90.

Su principal inconveniente es su elevado precio si lo comparamos con otros cuadros hechos con acero o aluminio, incluso la fibra de carbono. Comparado con el acero, metal con el que compete en aplicaciones técnicas, es mucho más ligero, tiene una alta resistencia a la corrosión y gran resistencia mecánica, pero es mucho más costoso que el acero, lo cual limita su uso industrial.

En este momento se siguen fabricando bicicletas con titanio, pero a pequeña escala y casi de manera artesanal, pero destaca porque en piezas de tornillería ligera se utiliza cada día más, ya que con un peso mínimo aguanta grandes esfuerzos. La aleación utilizada para este tipo de piezas es la Ti grado 5.

Cabe destacar que a este material se le puede aplicar el tratamiento superficial del anodizado, muy de moda últimamente en la industria de la bicicleta, ya que en los cuadros de aluminio y titanio que son tratados superficialmente mediante este proceso la pintura aguanta mucho más que al ser aplicada

### 4.3 Scandium

Nombre comercial que reciben los cuadros de bicicleta que están hechos con aleaciones de aluminio con escandio como aditivo. El escandio como tal no se utiliza solo para fabricar cuadros de bicicleta de montaña, se utiliza como aditivo en aleaciones de aluminio, como se ha mencionado anteriormente.

Este metal se utiliza solo por una razón, porque con esta aleación se pueden conseguir tubos de diámetro más pequeños y con la misma consistencia que uno de aluminio. Además también se utiliza porque como sabemos los cuadros de aluminio se forman a partir de unos tubos con las formas determinadas y luego se sueldan, es aquí donde el escandio tiene relevancia, ya que protege el aluminio y hace que la pérdida de propiedades en esa zona sea solo del 10%. Si no se usará una aleación de aluminio y escandio las pérdidas rondarían el 30%.

### 4.4 Cromoly

Este es una aleación de Acero con Cromomolibdeno. El porcentaje que presenta el cromo está entre 0,28 y 0,33% y el del molibdeno está entre el 0,15 y el 0,25 %. Esta aleación tiene un contenido en carbono de 0,30 %, por ello tiene una magnífica penetración al temple y puede soldarse mediante cualquiera de los procesos comunes de soldadura. Se comenzó a utilizar en la industria de la bicicleta cuando el peso empezó a ser un factor determinante a la hora de la producción de bicicletas más ligeras que las obtenidas con el acero. A finales de los años 80 y principios de los noventa buena parte de las bicicletas de montaña de alta gama estaban hechas con este material, aunque hoy ha quedado obsoleto. Los cuadros de cromoly destacaban porque poseían una resistencia mucho mejor a la corrosión que el acero y por su acabado brillante en un color gris metalizado, característico de este material.

La resistencia a la tracción de este material es de 1006 MPa y un límite de fluencia a 917 MPa. Estos datos son correspondientes al Cromoly templado a 840 °C y revenido a 540 °C. Esta aleación es conocida como la 4130 dentro de las aleaciones del acero.

### 4.5 Aluminio

Es el material más utilizado actualmente. El aluminio es uno de los metales más abundantes en la tierra, es más ligero que el acero, además tiene unas propiedades mecánicas buenas para su aplicación en este campo y es más barato que el titanio. La principal razón por la cual se utiliza aluminio aleado es para obtener mayor resistencia sin incrementar mucho el peso, dependiendo del uso específico que se le dé se puede obtener mayor resistencia a la corrosión, mejor soldabilidad, maquinabilidad o solamente mejor apariencia.

Si el metal contiene entre un 99.5 – 99.79% de aluminio es denominado aluminio puro o aluminio comercial. El término aleación se emplea al añadir otros elementos. Los principales químicos añadidos al aluminio para producir aleaciones específicas, son los siguientes: silicio, magnesio, manganeso, cobre, zinc, cromo y hierro. La principal razón por la cual el aluminio es aleado es para obtener mayor resistencia sin incrementar mucho el peso, dependiendo del uso específico que se le de se puede obtener mayor resistencia a la corrosión, mejor soldabilidad, maquinabilidad o solamente mejor apariencia.

#### 4.5.1 Propiedades

- **Ligero.** El aluminio es el más ligero de todos los metales para uso estructural, a excepción del magnesio, el aluminio pesa solo la tercera parte que el hierro y el cobre.
- **Resistencia mecánica.** El aluminio tiene la resistencia para trabajos pesados, por lo general esta resistencia se obtiene mediante aleaciones de aluminio añadiendo metales como manganeso, silicio, cobre, magnesio ó zinc. Las aleaciones de aluminio pueden ser tan resistentes como algunos aceros.
- **Elasticidad.** La elasticidad de un material es la medida de su capacidad para regresar a su forma original después de que ha sido deformada por fuerzas externas. La elasticidad de los metales depende el tratamiento metalúrgico que tienen. Se puede decir en general que la elasticidad viene acompañada

de dureza, esto significa que el aluminio puede ser más o menos elástico como lo requiera su aplicación.

- **Resistencia a la corrosión.** En un ambiente en el que el aire esté húmedo se forma una película fina resistente de óxido de aluminio que protege y que impide que la oxidación avance hacia el interior del metal.
- **Conductividad eléctrica.** Las aleaciones de aluminio son los mejores conductores de electricidad económicos disponibles porque manejan sobre dos veces la corriente que el cobre en relación a su peso. El aluminio puro tiene una conductividad eléctrica del 65 % y algunas aleaciones del 55 %.
- **Conductor del calor.** El aluminio es un excelente conductor del calor, lo conduce tres veces mejor que el acero.
- **Refleja la energía radiante.** Las superficies pulidas de aluminio son excelentes reflectores de la energía radiante.
- **No magnético.** Para efectos prácticos el aluminio es no magnético, lo que lo hace que sea de los pocos metales apropiados para proteger ciertas aplicaciones eléctricas y electrónicas.
- **No Inflamable.** Aunque es un excelente conductor eléctrico, el aluminio no produce chispas. Esto es una propiedad esencial en productos usados con alta inflamabilidad o materiales y ambientes explosivos.
- **No tóxico.** Es usado en industrias que procesan productos alimenticios.

#### 4.5.2 Grupos de aleaciones de aluminio

Se diseñó un sistema numérico de cuatro dígitos para ordenar las aleaciones de aluminio, en este sistema el primer dígito representa el principal aleante, el segundo dígito representa los límites de impurezas, si el dígito es cero no contiene impurezas, pero si es un valor entre uno a nueve indica un control especial de una o más impurezas. El tercer y el cuarto dígito representan el valor en décimas y centésimas del porcentaje del aluminio (ejemplo: aleación 1060 = 99.60 % de aluminio). En las series de la dos hasta la nueve los segundos dígitos no tienen ningún significado en especial, solo sirven para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo. El sistema es el siguiente:

- 1xxx – Aluminio puro (99.00 % o superior)
- 2xxx – Aleaciones aluminio – cobre.
- 3xxx – Aleaciones aluminio – manganeso.
- 4xxx – Aleaciones aluminio – silicio.
- 5xxx – Aleaciones aluminio – magnesio.
- 6xxx – Aleaciones aluminio – magnesio – silicio.
- 7xxx – Aleaciones aluminio – zinc.
- 8xxx – Aleaciones aluminio – otros elementos.
- 9xxx – Serie no utilizada.

#### 4.5.3 Aleaciones empleadas en cuadros de bicicletas

Actualmente se utilizan varias aleaciones para la construcción de cuadros de bicicleta, pertenecientes a las series 6xxx y 7xxx. Las dos aleaciones más utilizadas son la 6061 y la 7005, aunque también se utilizan las aleaciones 6063 y 6066. En este apartado nos centraremos en explicar cada una de las dos aleaciones, las que mayor presencia tienen en el mercado hoy en día. Cabe destacar que las aleaciones de las series 6xxx y 7xxx utilizadas para estos productos se pueden tratar térmicamente, muestran una buena sensibilidad al temple.

A modo de comentario en el caso de la serie 6xxx sus precipitados se endurecen utilizando Mg<sub>2</sub>Si. Hablando de las propiedades mecánicas de las dos series, las aleaciones de la serie 6xxx alcanzan una resistencia a la tracción de 290 MPa y las aleaciones de la serie 7xxx alcanzan una resistencia a la tracción mayor que las de la serie 6xxx, 504 MPa.

### **Aleación 6061 – T6**

- Composición química: Aluminio - 0,4-0,8 % Si – 0,15-0,4 % Cu – 0,7 % Fe – 0,15 % Mn – 0,8-1,2 % Mg – 0,04-0,35 % Cr – 0,25 % Zn – 0,15 % Ti – 0,20 % otros.
- Ventajas: Adicionalmente a sus características naturales (excelente conductividad, ligereza, nula toxicidad y no produce chispas) el aluminio 6061 - T6 ofrece las siguientes ventajas:
  - Resistencia superior a la de las aleaciones 6063
  - Elaborado mediante tratamientos térmicos.
  - Envejecido artificialmente.
  - Óptima conformación en frío.
  - Excelentes características para soldadura fuerte y al arco.
- Beneficios:
  - Excelente resistencia a la corrosión.
  - Gran resistencia a la tensión.
  - Excelente maquinabilidad.
- Aplicaciones:
  - Portamoldes y portatroqueles
  - Moldes prototipos.
  - Moldes de producción para moldeado por soplado, inyección y al vacío.
  - Partes de maquinaria.
  - Cuadros de bicicletas de carretera y montaña.
- Tipo de corrosión del aluminio 6061 – T6: Este metal forma una película de óxidos en la mayoría de los medios. Esta película lo protege contra una corrosión más aguda. El espesor de esta capa es de 1nm cuando acaba de formarse al aire libre en una superficie recién pulida. Se compone de dos capas, la más próxima al metal es compacta, amorfa, de espesor determinado por la temperatura. Por encima de ella hay otra capa más gruesa y más porosa formada por óxido hidratado. Como la corrosión del aluminio 6061 es habitualmente por picaduras, se da particular importancia al potencial de picadura como indicador de su capacidad a resistir a los ataques.

### **Aleación 7005 – T6**

- Composición química: Aluminio - 0,35 % Si – 0,40 % Fe – 0,10 % Cu – 0,20-0,7 % Mn – 1,0-1,8 % Mg – 0,06- 0,20 % Cr – 4,0-5,0 % Zn – 0,01-0,06 % Ti – 0,08-0,2 % Zr – 0,15 % otros.
- Ventajas: Es más fácil de tratar y fabricar que el aluminio 6061. Con lo que todo ello conlleva: hidroformados, conificados, tratamientos térmicos,..., etc.
- Beneficios: los mismos que en el caso del aluminio 6061.
- Aplicaciones: las mismas que en el caso del aluminio 6061.
- Otros datos intereses: Cabe destacar que al igual que el aluminio 6061 se trata térmicamente (tratamiento T-6) el aluminio 7005 para mejorar sus propiedades mecánicas. Hay varios tratamientos térmicos (temples), los más comunes son:
  - H-14: Material templado mediante trabajo mecánico en frío, con grado medio duro.
  - H-0: Laminado hasta su espesor final y recocido totalmente hasta volverlo suave.

- T-5: Material templado mediante tratamiento térmico, enfriado al aire después de extruir y envejecimiento artificialmente.
- T-6: Material templado mediante tratamiento térmico, enfriado al agua después de extruir y envejecimiento artificial.
- F: Material fabricado sin ningún control durante la reducción en frío por lo que no se garantizan las propiedades mecánicas del producto final.

El tratamiento T-6 es el tratamiento utilizado en la manufactura de tubos de aluminio para cualquier bicicleta.

## 4.6 Fibra de Carbono

Un material compuesto (“composite” o FRP fiber-reinforced polymer) es el resultado de la combinación de dos o más materiales con el fin de obtener una combinación única de propiedades.

Los materiales compuestos reforzados con fibra se pueden separar mecánicamente. La principal característica de estos materiales reside en que un componente conforma una matriz que envuelve el resto de forma que los materiales trabajen como uno solo, pero ambos seguirán mantenido sus formatos originales por separado.

En el caso de los productos para refuerzo estructural, se utilizan fibras embebidas en una matriz polimérica, siendo la más habitual la de resina epoxi. Esta (la matriz) confiere rigidez y protección ambiental/química a las fibras. Por otro lado, las fibras contenidas más habituales suelen ser de carbono, aramida y vidrio, aportando al “composite” elevada resistencia a tracción y elevado módulo de elasticidad.

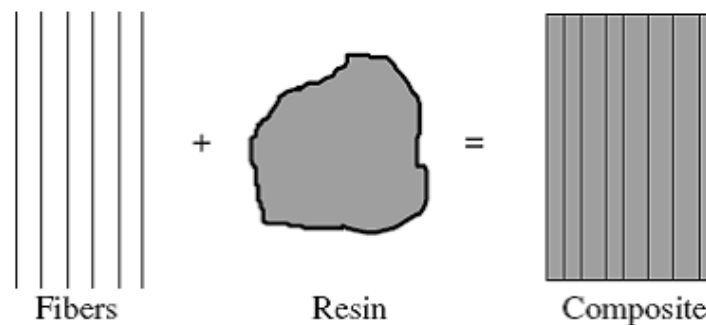


Ilustración 4 – Materiales compuestos

Las fibras de carbono y diferentes resinas que se utilizan para hacer el material reciben el nombre de matriz, conocida en este caso como fibra de carbono. Las fibras constituyen el componente que proporciona la resistencia mecánica y rigidez a la matriz y, además, pueden ofrecer otras valiosas propiedades como resistencia a altas temperaturas, resistencia a la fluencia.

Se atribuye a Edison el uso de las primeras fibras de carbono comerciales, logradas a partir de la carbonización de fibras de algodón y bambú, para producir filamentos de lámparas de incandescencia. Sin embargo, el empleo como refuerzo de estas fibras se sitúa a finales de la década de 1950. Actualmente las materias primas para la fabricación de fibra de carbono son, ordenadas por volumen de utilización, el poliacrilonitrilo (PAN), determinados derivados del carbón y el petróleo (breas, alquitranes) y el rayón.

Los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono son más ligeros y resistentes que determinados aceros al carbono. Su comportamiento frente a la fatiga es superior al de los metales, y, cuando se combinan con los polímeros adecuados, constituyen uno de los tipos de materiales más resistentes frente al deterioro ambiental.

La siguiente tabla relaciona varias características, o combinaciones de ellas, y aplicaciones que posibilitan el uso de las fibras de carbono en muy diversos sectores. Estas propiedades únicas son el resultado de la estructura (microestructura) de la fibra de carbono.

Características y aplicaciones de las fibras de carbono	
Propiedades	Aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia mecánica, tenacidad y densidad</li> <li>• Estabilidad dimensional</li> <li>• Amortiguación de vibraciones</li> <li>• Resistencia a la fatiga</li> <li>• Compatibilidad biológica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte y artículos deportivos</li> <li>• Tecnología aeroespacial</li> <li>• Equipos de robots</li> <li>• Industria química y nuclear</li> <li>• Medicina</li> </ul>

#### 4.6.1 Conceptos Previos

- **Composite:** Es una mezcla como entidad única de dos constituyentes distintos, matriz y refuerzo, separables físicamente a escala macroscópica, y cuyas propiedades mecánicas finales resultan mejores que las de los elementos que lo forman.
- **Matriz:** Material voluminoso, isótropo y continuo con el que se combina el refuerzo.
- **Refuerzo:** Material que aporta las propiedades mecánicas al composite. Ha de ser mucho más resistente y rígido que la matriz.
- **Termoplástico:** Son los polímeros que al calentarse hasta la temperatura de transición vítrea se vuelven elástico y adquieren la capacidad de deformarse plásticamente sin romperse.
- **Termoestable:** Polímero que al calentarse se quema y se degrada.
- **Materiales constituyentes:** Tanto la matriz como el refuerzo pueden construirse en multitud de materiales. Los más significativos son metales, polímeros o cerámicos.

La siguiente gráfica ilustra las definiciones anteriores. La suma de la matriz y el refuerzo adecuado consigue obtener un material compuesto con unas propiedades mecánicas superiores a las de los constituyentes.

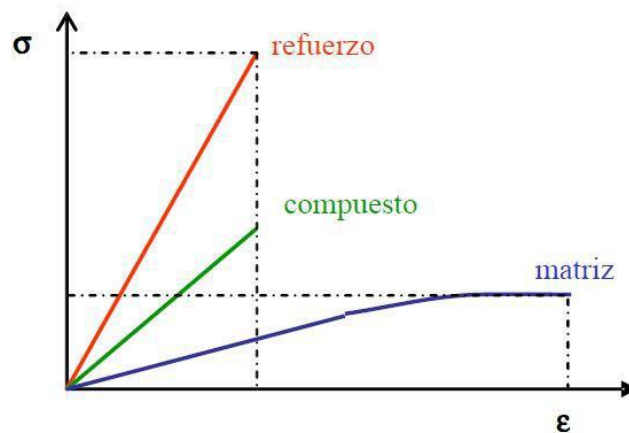


Ilustración 5 – Gráfica tensión-deformación materiales compuestos

La cantidad de posibilidades a la hora de mezclar los materiales es muy grande. Esta mezcla se puede realizar con una gran diversidad de materiales y si se hace una clasificación con ese criterio resulta el siguiente:



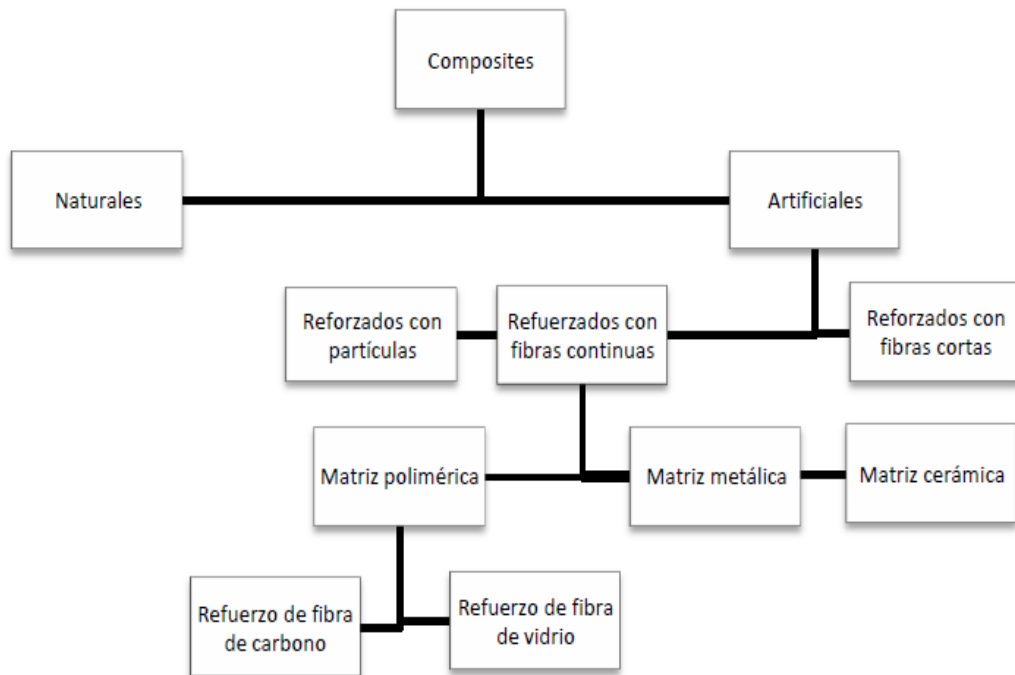


Ilustración 6 – Clasificación de materiales compuestos

#### 4.6.2 La estructura de las fibras de carbono

La siguiente figura representa un esquema de la estructura que presentan estos materiales. De acuerdo con ella, una fibra de carbono está constituida por paquetes de capas de átomos de carbono con diferentes orientaciones respecto al eje de la fibra. La ordenación de los átomos de carbono en las capas es similar a la del grafito (Figura 1.b), razón por la que se las suele designar como capas de grafeno. Este tipo de estructura implica que la fibra va a presentar una anisotropía en sus propiedades, cuyos valores vienen determinados, entre otros, por los siguientes factores:

- La existencia de fuertes enlaces covalentes carbono-carbono en las capas, en contraste con las débiles fuerzas de Van der Waals que actúan entre capas.
- La perfección de la orientación tanto en sentido longitudinal como transversal.
- Presencia de picaduras, poros y grietas.
- El tipo de precursor usado.
- Proceso de fabricación empleado y condiciones en las que se realiza.

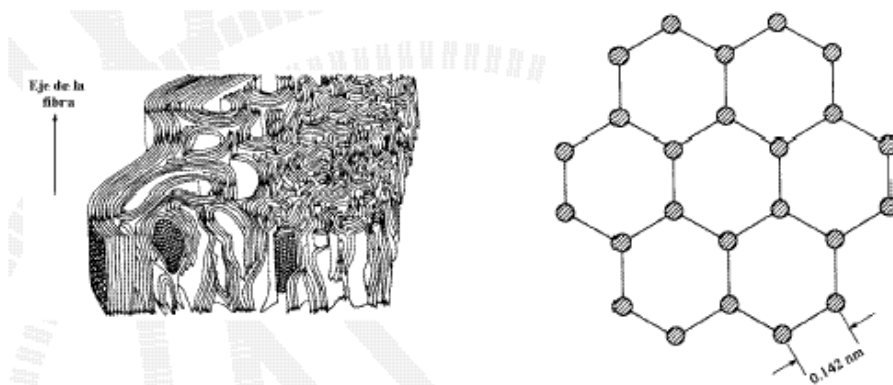


Ilustración 7 – a) Estructura de las fibras de carbono. b) Átomos de carbono en las capas planas de grafeno.

### 4.6.3 Tipos y propiedades de las fibras de carbono

Las fibras de carbono están producidas a partir de dos tipos de materias primas:

- Fibras PAN (poliacrilonitrilo), es una fibra polimérica de origen textil.
- Fibras PITCH, se obtienen de la brea de alquitrán de hulla o bien petróleo purificado.

Las primeras, son las más extendidas en la producción de fibras de carbono, mientras que las fibras pitch aportan mayor rigidez aunque son más frágiles (y se rompen con menores elongaciones).

Durante el proceso de fabricación, las materias primas se exponen a la oxidación, empleando para ello temperaturas extremadamente altas. Posteriormente, pasan por procesos de carbonización y grafitización. Durante estos procesos, las fibras originales sufren una serie de cambios a nivel químico que les aportan mayores ratios de rigidez-peso y de resistencia a tracción-peso.

Las fibras de carbono se suelen clasificar atendiendo a dos criterios: tipo de precursor y valor de su módulo de elasticidad. De acuerdo con el segundo criterio se distinguen cinco clases, o calidades, de fibras: SM (“Standard modulus”), UHM (“Ultra-high modulus”), HM (“High modulus”), HT (“High tenacity-high strength”) o IM (“Intermediatemodulus”), y LM (“Low modulus”).

Las siguientes tablas recogen diversas propiedades para fibras obtenidas de diferentes precursores (Tabla 2) y con distintos grados de calidad (Tabla 3). La anisotropía del refuerzo queda reflejada, que muestra los valores del módulo de Young en direcciones axial y transversal para cinco fibras seleccionadas.

<b>Propiedad</b>	<b>Fibras SM<sup>a</sup></b>	<b>Fibras SM<sup>b</sup></b>	<b>Fibras IM<sup>b</sup></b>	<b>Fibras HM<sup>b</sup></b>
Contenido en carbono (%)	95	95	95	>99
Diámetro de la fibra ( $\mu\text{m}$ )	6-8	6-8	5-6	5-8
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,8	1,8	1,9
Módulo de Young (GPa)	228	220-241	290-297	345-448
Resistencia a la tracción (MPa)	3800	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Alargamiento a la rotura (%)	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Resistividad eléctrica ( $\mu\text{-cm}$ )	1650	1650	1450	900
Conductividad térmica (W/m.K)	20	20	20	50-80

Tabla 2 – Propiedades de distintas fibras de usos generales y aplicaciones aeroespaciales

<b>Propiedad</b>	<b>Fibras LM</b>	<b>Fibras HM</b>	<b>Fibras UHM</b>
Contenido en carbono (%)	>97	>99	>99
Diámetro de la fibra ( $\mu\text{m}$ )	11	11	10
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,9	2,0	2,2
Módulo de Young (GPa)	170-241	380-620	690-965
Resistencia a la tracción (MPa)	1380-3100	1900-2750	2410
Alargamiento a la rotura (%)	0,9	0,5	0,4-0,27
Resistividad eléctrica ( $\mu\text{-cm}$ )	1300	900	220-130

Tabla 3 – Propiedades para las fibras “pitch”

<b>Propiedad</b>	<b>Fibra 1</b>	<b>Fibra 2</b>	<b>Fibra 3</b>	<b>Fibra 4</b>	<b>Fibra 5</b>
Módulo de Young axial (GPa)	230	250	390	390	380
Módulo de Young transversal (GPa)	40	20	21	12	21

Tabla 4 – Variación del módulo de Young según la dirección considerada en fibras de carbono

# 5 NORMATIVA

---

Para poder diseñar, calcular y fabricar un cuadro de bicicleta, es necesario cuestionarse contra qué requisitos de seguridad, y/o calidad diseñaremos. Gracias a la Universidad de Sevilla, tenemos acceso a las normativas de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). En la cual encontramos distintas normativas acerca de los requisitos de seguridad de bicicletas.

Existen las normativas UNE de “Requisitos de seguridad y métodos de ensayo” (Octubre 2006) de bicicletas según tipología. Estas normativas recogen para cada tipo de bicicleta las especificaciones que deben cumplir todo y cada uno de los componentes. A continuación se expone la lista de normativa con sus códigos:

- EN 14766 2005 Bicicletas de Montaña.
- EN 14766 2005 Bicicletas de Paseo.
- EN 14781 2005 Bicicletas de Carrera
- EN 14872 2006 Bicicletas – Accesorios.

Siempre que nos encontramos en la tesitura de búsqueda de normativas, debemos cuestionarnos si dicha norma sigue vigente o ha sido sustituida. En el caso que nos compete, encontramos una normativa de Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas (Enero 2015) que sustituye y anula a las normativas antes expuestas.

Estas normas se diferencian con respecto a las anteriores principalmente en el modo de clasificación de la información. Anteriormente teníamos 4 normas distintas en función de la tipología del ciclo, en cambio en la nueva y vigente normativa solo existe una sola norma pero dividida en diferentes partes según el componente o sistema parte de la bicicleta. Dentro de cada parte, explica los requisitos de seguridad y métodos de ensayo, y diferencia los criterios de validación según el tipo de bicicleta. En el siguiente listado podemos observar las distintas partes de la norma:

- EN ISO 4210-1 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 1: Términos y definiciones
- EN ISO 4210-2 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 2: Requisitos para bicicletas de paseo, para adultos jóvenes, de montaña y de carreras.
- EN ISO 4210-3 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 3: Métodos de ensayo comunes
- EN ISO 4210-4 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 4: Métodos de ensayo de frenado
- EN ISO 4210-5 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 5: Métodos de ensayo de la dirección
- EN ISO 4210-6 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 6: Métodos de ensayo del cuadro y la horquilla
- EN ISO 4210-7 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 7: Métodos de ensayo para ruedas y llantas
- EN ISO 4210-8 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 8: Métodos de ensayo para los pedales y el sistema de transmisión

- EN ISO 4210-9 2014 Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 9: Métodos de ensayo para los sillines y las tijas

Tras haber estudiado los requisitos generales de seguridad y los métodos comunes de ensayo, debemos centrarnos en la Parte 6 de la norma. Para el diseño y cálculo del cuadro hay que considerar 5 métodos distintos de ensayos: 3 a fatiga y 2 de impacto.

- Ensayo de choque: Caída de masa
- Ensayo de choque (Conjunto cuadro horquilla): Caída del cuadro
- Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo
- Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales
- Ensayo de fatiga con una fuerza vertical

Esta normativa internacional tiene el objetivo de garantizar que las bicicletas fabricadas de acuerdo a la norma sean tan seguras como sea posible. Los ensayos han sido concebidos para garantizar la resistencia y la durabilidad de los diferentes componentes y la bicicleta en su conjunto, exigiendo una calidad elevada a todos los niveles y teniendo en cuenta los aspectos relacionados con la seguridad desde la etapa del diseño.

Como anteriormente se ha mencionado, no entra en el alcance de este proyecto la fabricación del cuadro, por tanto no se han realizado los ensayos de manera física. Se ha realizado cálculos y verificaciones según simulaciones teóricas en elementos finitos.

Importante mencionar que los criterios para validar los ensayos no se encuentran en la Parte 6 de la norma, si no en la Parte 2 – Requisitos para bicicletas de paseo, para adultos jóvenes, de montaña y de carreras. Se pueden encontrar ambas partes de la normativa adjuntas en el anexo del proyecto.

# 6 FATIGA

## 6.1 Introducción a la Fatiga

En ingeniería y, en especial, en ciencia de los materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Aunque es un fenómeno que era reconocido desde la antigüedad, este comportamiento no fue de interés real hasta la revolución industrial, cuando, a mediados del siglo XIX se comenzaron a producir las fuerzas necesarias para provocar la rotura de los materiales con cargas dinámicas muy inferiores a las necesarias en el caso estático, comenzando así a desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables.

Se observa que repetidos ciclos de carga y descarga debilitan las piezas a lo largo del tiempo incluso cuando las cargas aplicadas tienen valores muy por debajo de la tensión de rotura o incluso del límite elástico del material. Cada ciclo de fluctuación de tensión daña o deteriora la pieza o componente levemente. Tras un número de ciclos la acumulación del daño provoca que la pieza dañada sufra ruptura.

La vida a fatiga se puede definir como *“el fallo debido a cargas repetitivas... que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura”* (Fuchs, 1980). El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio. Los resultados del análisis de fatiga se representan mediante contornos que muestran la duración de los ciclos de carga que la estructura puede soportar antes de que se inicie cualquier grieta.

Los estudios estructurales lineales y no lineales no predicen los fallos por fatiga. Calculan la respuesta de un diseño sujeto a un entorno específico de cargas y restricciones. Si los resultados de desplazamientos y tensiones están por debajo de un cierto nivel admisible el ingeniero proyectista puede concluir que el diseño es seguro en ese entorno de solicitaciones con independencia de cuantas veces se aplique la carga.

Los resultados de los estudios estructurales (estáticos y dinámicos, lineales y no lineales) se usan como los datos básicos de partida para definir el estudio de fatiga. El número de ciclos requeridos para que el fallo por fatiga ocurra en un punto depende del material y de la fluctuación de las tensiones.

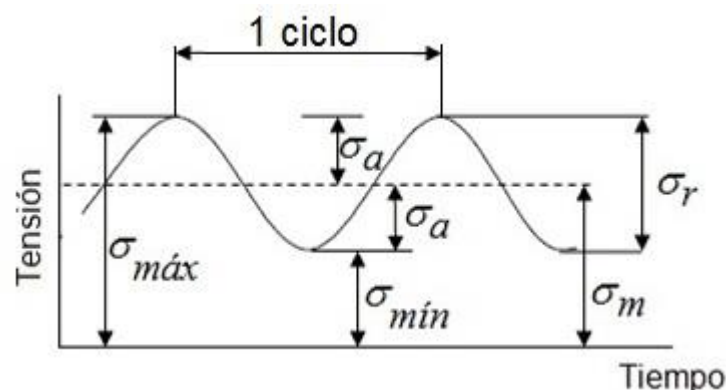


Ilustración 8- Ciclos de Carga

En materiales metálicos, existe un fenómeno denominado límite de fatiga, que se define como el valor de tensión que por debajo del cual no se produce rotura por elevado que sea el nº de ciclos de trabajo de la pieza. Por tanto, el problema de la fatiga es realmente complejo y una de las primeras causas de fallo en los materiales.

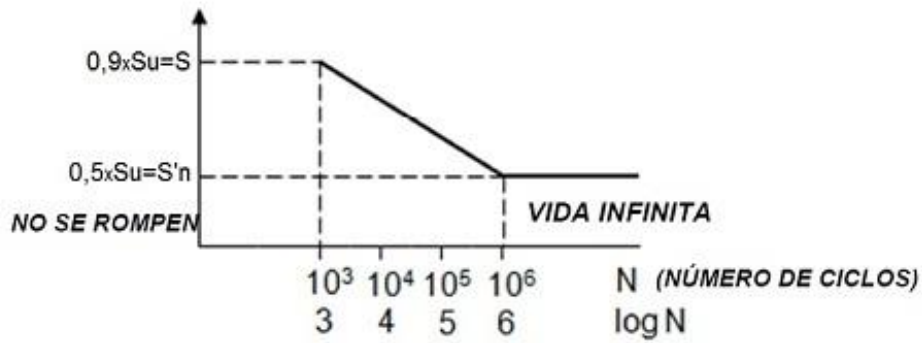


Diagrama S-N para el acero

Ilustración 9 – Curva S-N típica de metales.

Existen casos muy comunes y conocidos de fallos a fatiga como pueden darse en máquinas rotativas, alas de aviones, tornillos, productos de consumo, plataformas marítimas, ruedas, barcos, vehículos, puentes y estructuras. En la siguiente imagen, se observa de manera ilustrativa las distintas zonas de la rotura a fatiga en un componente metálico.

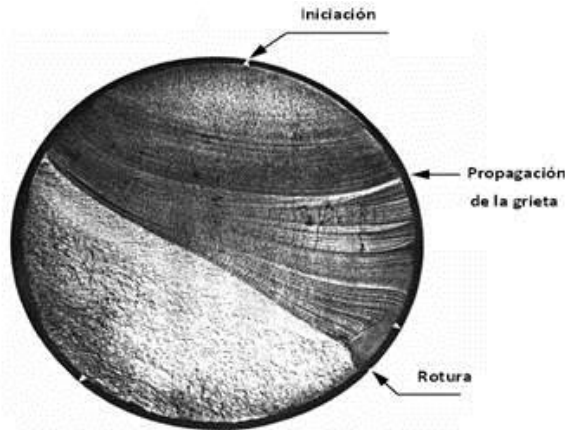


Ilustración 10 – Zonas de la evolución de los mecanismos de fatiga en metales



Ilustración 11 – Rotura de Ejes por Fatiga

Las grietas por fatiga en los materiales metálicos se inician en la superficie del material. Por ello debe evitarse en lo posible ralladuras y arañazos en las superficies, sobre todo en zonas con elevado nivel de tensión. Cualquier tratamiento superficial (térmico o mecánico) que produzcan un estado de tensiones residuales de compresión en la superficie de las piezas aumentando la dureza de la superficie incrementará la vida a fatiga de la pieza.

En el proceso de daño que se produce en el material, pueden distinguirse tres etapas:

- **Iniciación:** Una o más grietas se desarrollan en el material. Las grietas pueden aparecer en cualquier punto del material pero en general ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas. Las grietas pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material, ralladuras, arañazos, muescas y entallas causados por las herramientas de fabricación o medios de manipulación. En materiales frágiles el inicio de grieta puede producirse por defectos del material (poros e inclusiones) y discontinuidades geométricas.
- **Propagación:** Alguna o todas las grietas crecen por efecto de las cargas. Además, las grietas generalmente son finas y de difícil detección, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza
- **Rotura:** La pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

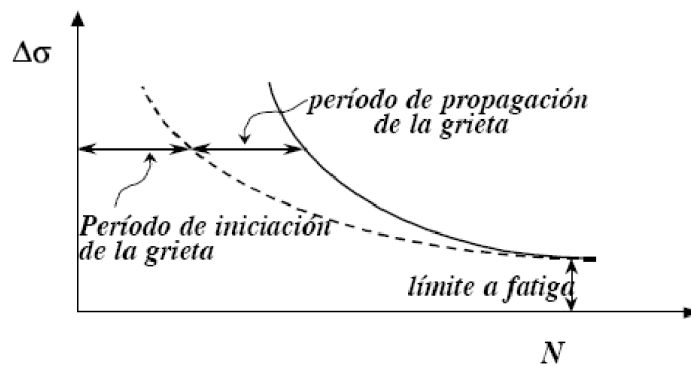


Ilustración 12 – Etapas en el proceso de fatiga materiales metálicos

## 6.2 Fatiga en Materiales Compuestos

Los materiales compuestos también son sensibles a las cargas cíclicas, de manera diferente a los materiales metálicos, pero aún así el estar sometidos a este tipo de cargas puede conducir al fallo del elemento estructural al igual que los metales. La degradación de sus propiedades mecánicas pueden ser debidas a estar sometidos a las cargas cíclicas a lo largo del tiempo, o simplemente como consecuencia de su exposición a unas condiciones ambientales.

Es generalmente aceptado que los polímeros reforzados con fibras sufren fatiga. Se observan dos fenómenos claramente diferenciados desde el punto de vista estructuras en láminas o laminados de materiales compuestos:

- Degradación de su rigidez a lo largo de la aplicación de los ciclos de carga
- Rotura del componente, al cabo de un número de ciclos de estar sometido a carga cíclica, a niveles inferiores a los de su resistencia estática.

Estos comportamientos son consecuencia de la suma de varios mecanismos de daño que surgen en distintos puntos o zonas del material a lo largo de la vida de la pieza. La participación relativa de cada mecanismo de daño depende tanto de las propiedades de los materiales constituyentes y de la configuración del laminado como de las características de las cargas aplicadas.

Existen distintos mecanismos que suceden al someter al material a cargas de forma estática. Se explican en el siguiente apartado. Las distintas participaciones relativas de cada mecanismo contribuyen entre todos a alcanzar el fallo. Es decir, el ritmo de degradación de las propiedades del material se ve incrementado con la interacción entre los distintos mecanismos que conducen cada uno a distintos modos de degradación y fractura distintos, pero que al fin y al cabo todos contribuyen a alcanzar antes el fallo si coexisten.

Un laminado es un material altamente heterogéneo que presenta además una gran anisotropía. Estas dos propiedades influyen de manera decisiva en su comportamiento y también en cómo se presenta el mecanismo de degradación por fatiga. Este comportamiento se puede observar a tres escalas:

- **Nivel Macroscópico:** estos modelos conciben el material compuesto como un material homogéneo con unas ciertas propiedades anisótropas equivalentes. con esta estrategia se puede abordar gran cantidad de problemas como la estimación de la esperanza de vida a un elevado número de ciclos, estimación de la progresión de la resistencia residual y la rigidez residual...
- **Nivel de Lámina:** la rotura a fatiga se entiende que proviene del fallo sucesivo de cada una de las láminas con distinta orientación del refuerzo. En este caso, pues, se toma a la lámina (y no todo el laminado) como una unidad de comportamiento homogéneo y se distinguen los modos de fallo intra-lámina de la delaminación. De este modo, la caracterización experimental obtenida para una lámina, normalmente unidireccional, puede utilizarse para distintas configuraciones de apilamiento.
- **Nivel Microestructural:** En estos modelos, basados en la micromecánica, se describen los sucesos elementales de fallo a nivel microscópico (la acumulación, interacción y propagación del daño hasta la rotura del material). Obviamente, estos modelos son computacionalmente costosos y, todavía hoy no bien comprendidos. Sin embargo, son estos modelos constructivos a partir de los cuales es posible conocer sobre qué aspecto de los constituyentes debe actuarse para mejorar cierta propiedad.

Importante mencionar que todos los cálculos realizados en este proyecto se ha llevado a cabo desde un nivel macroscópico, simplificando los cálculos considerando el material con características homogéneas. El motivo es que las propiedades del laminado dependen de las orientaciones de las *plies* o capas en la fabricación de la pieza. Como se mencionó al inicio del proyecto la fabricación no es uno de los objetivos del alcance, pero si existe la intención de llevar a cabo la teoría a la práctica, y el cuadro se fabricaría con material tejido *prepeg*, por tanto la hipótesis de la homogeneidad del laminado no se alejaría de la realidad.

### 6.2.1 Mecanismos de fallo en laminados

El deterioro microestructural que padecen los compuestos es muy distinto al de los materiales metálicos. Si bien en los segundos existe un punto dañado, la nucleación de una grieta, a partir del cual ésta progresa hasta dar lugar a la fractura del material por propagación rápida; en los materiales compuestos el deterioro microestructural se distribuye en todo el material como resultado de los mecanismos de daño descritos a continuación.

Recalcar que la interacción de los mecanismos de daño y su repercusión en las propiedades resultantes del compuesto ya se intuye bastante compleja. Por otra parte, en los compuestos se observa una pérdida de rigidez y resistencia residual desde los primeros ciclos que en los metales es casi inapreciable.

El daño del compuesto a nivel microestructural puede obedecer a algunos de los siguientes fenómenos activos dentro de la lámina: rotura de fibras, formación de grietas en la matriz, rotura de la interfase entre fibra-matriz (debonding) y pandeo de la fibra bajo esfuerzos de compresión. Además se debe considerar el daño entre láminas sobretodo el despegue entre láminas adyacentes o delaminación. La siguiente imagen es muy ilustrativa para poder comprender los mecanismos de fallo mencionados.



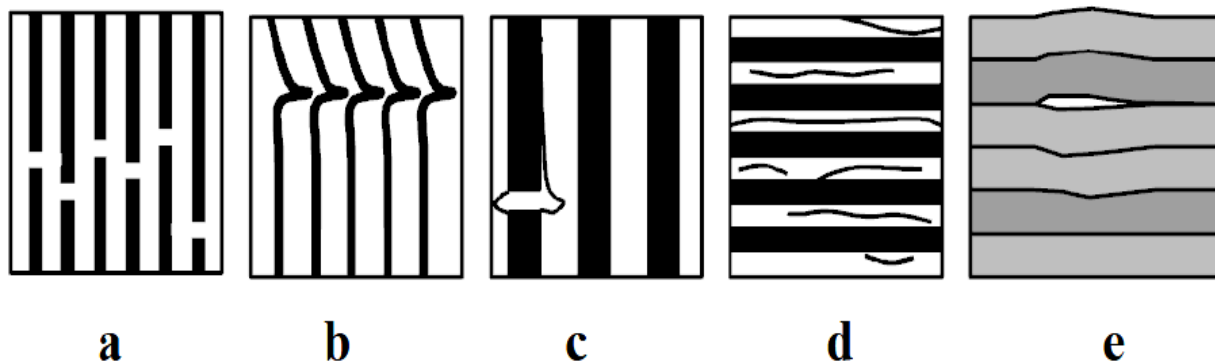


Ilustración 13 – Mecanismos de daño: a) rotura de las fibras, b) pandeo de fibras por esfuerzos de compresión, c) *debonding*, d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación.

Es necesario distinguir el estudio del comportamiento de los compuestos cuando están sometidos a cargas estáticas de cuando lo están a cargas cíclicas, en los dos casos se observan los mismos mecanismos de daño que conducen a la degradación del compuesto.

Al hablar de fatiga es conveniente resaltar las importantes diferencias entre la evolución del daño de los materiales compuestos y la que aparece en los materiales homogéneos. Por ejemplo, en los metales el deterioro microestructural que padecen bajo cargas cíclicas puede dividirse en tres etapas como ya ha sido comentado con anterioridad: nucleación, crecimiento y rotura. Durante la primera etapa, ni la rigidez ni la resistencia residual se ven afectadas por la formación de esta grieta inicial. Sólo cuando esta grieta va creciendo ciclo a ciclo se observa en ésta una pérdida de resistencia residual del elemento estructural. La situación en los compuestos es radicalmente distinta.

Los mecanismos de daño en ellos son relativamente abundantes y su interacción compleja. En este caso no se debe hablar de una sola grieta que se propaga sino que el deterioro microestructural se distribuye en el material como resultado de los mecanismos anteriormente citados. A un laminado sometido a fatiga instantes antes de su rotura se le puede imaginar como un material que contiene una fracción considerable de fibras rotas, abundantes grietas en la matriz, *debonding* y delaminaciones.

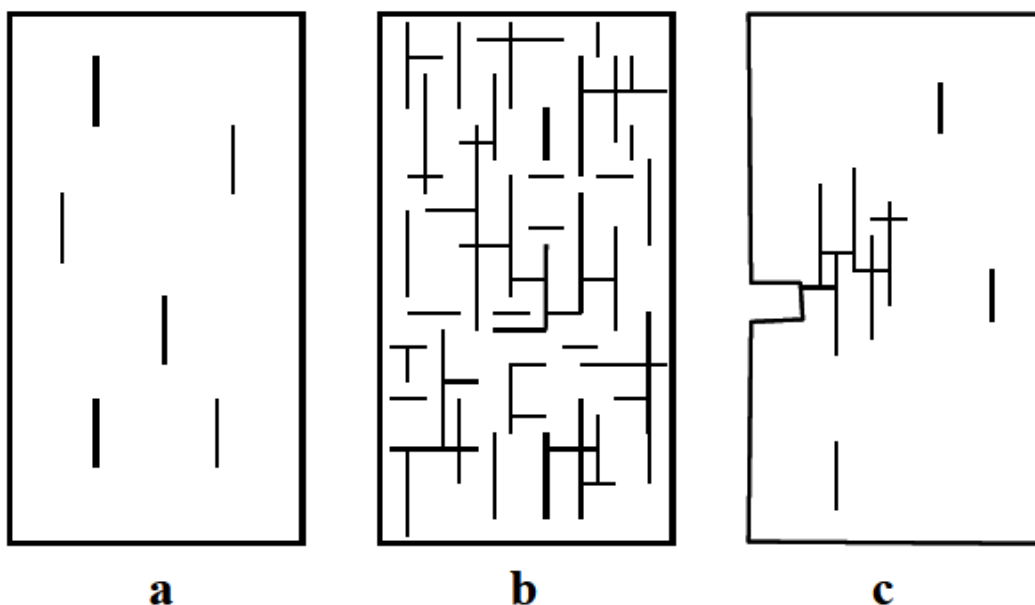


Ilustración 14 – Modos de daño y fractura en un compuesto unidireccional sometido a esfuerzo axial: a) dispersión del daño, b) daño disperso antes del fallo, c) propagación del daño a partir de una entalla inicial

La importancia relativa de cada uno de estos mecanismos dependerá tanto de la geometría de la pieza, como del laminado en particular, como del estado de cargas aplicado. No suele existir un punto dañado en el compuesto a partir del cual este progresa, sino que se va acumulando de manera distribuida en todo el material. Otra diferencia esencial respecto a los metales es que cualquiera de los mecanismos de daño descritos conlleva una disminución de la contribución de alguno de los componentes a sostener el esfuerzo aplicado, es decir, una pérdida de rigidez del compuesto. En efecto, se observa una degradación de las componentes elásticas del compuesto desde el primer instante de deterioro del material.

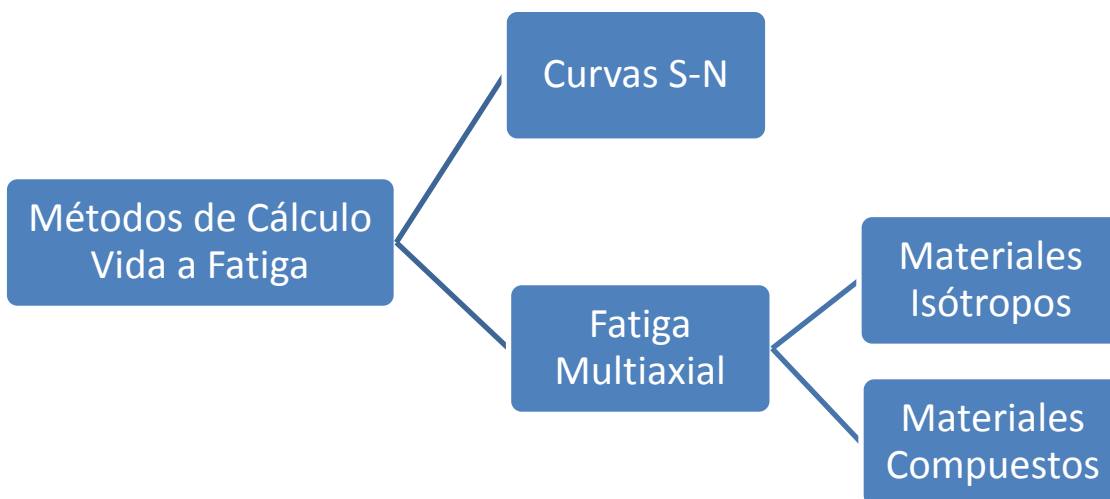
### 6.3 Métodos de cálculo de vida a fatiga

Este apartado, el cual es sumamente teórico, tiene como objetivo enseñar y aportar al lector en pocas páginas las distintas herramientas de cálculo que actualmente disponemos los ingenieros para enfrentarnos a la fatiga en los materiales.

La existencia de diferentes métodos, técnicas, hipótesis y formulas es debido a la complejidad del problema. No hay que equivocarse al decir que hay métodos mejores que otros, simplemente cada uno tiene su aplicación y serán de mayor utilidad a la hora de predecir la vida a fatiga en los problemas para los cuales ha sido desarrollada dicha metodología.

Antes de comenzar, mencionar las diferencias más importantes en la clasificación de los métodos de cálculo, según la carga aplicada puede ser axial o multiaxial, o según las propiedades del material que puede ser isótropo o compuesto. En la siguiente ilustración se muestra el índice que sigue este apartado.

En nuestro caso, emplearemos un método de cálculo para fatiga multiaxial y para materiales compuestos.



### 6.3.1 Curvas S-N

Históricamente, antes del desarrollo de la mecánica de fractura, que posibilitó estudiar la fatiga en metales como un problema de crecimiento de grieta, la única información que se disponía para los diseños sometidos a fatiga era la curva que relaciona la tensión aplicada con el número de ciclos hasta la rotura, que normalmente se representa el plano semilogarítmico tensión-log (Nf). Esta curva tensión-vida, o curva S-N, muestra directamente la percepción natural de la fatiga en términos de resultados experimentales.

Sin embargo, no proporciona indicación alguna sobre la disminución de la rigidez, el mecanismo de fallo, la presencia de grietas o el cambio en las características de los materiales como consecuencia del proceso de degradación, que por ejemplo sufren los materiales compuestos.

La curva S-N relaciona simplemente la tensión cíclica de amplitud constante, normalmente en función de la tensión máxima, con el número de ciclos esperados (Nf) antes de que aparezca el fallo. Usualmente representa la media de la vida de una misma geometría (probeta) sometida a varias pruebas al mismo nivel de tensión cíclica.

En la siguiente ilustración podemos observar como la resistencia (S) va disminuyendo desde el valor estático ( $S_u$ ) hasta el límite de fatiga ( $S_e$ ). Esta gráfica representa para cada nivel de tensiones (S) el valor medio de la vida esperada (N).

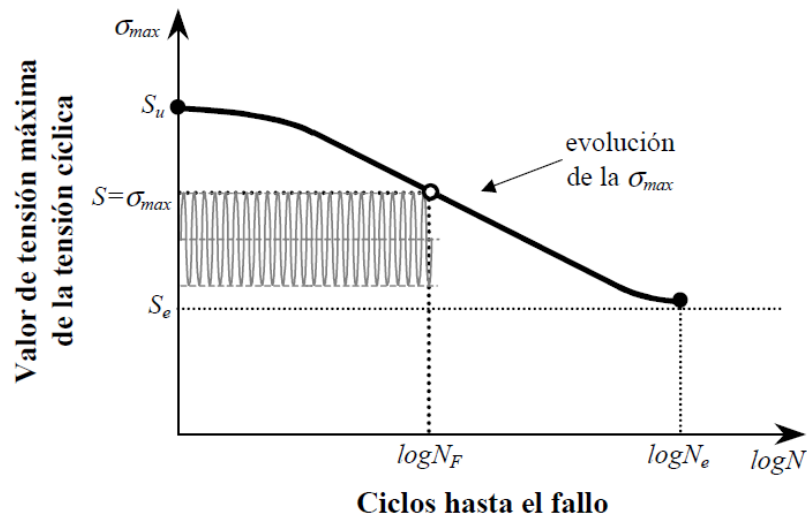


Ilustración 15 – Curva S-N

Es sabido que el comportamiento a fatiga de cualquier material no sólo depende del nivel máximo de tensión al que está sometido sino también del tipo de tensión cíclica que recibe. Para definir la tensión cíclica se usa comúnmente uno de los siguientes grupos de parámetros:

- Tensión Máxima y Mínima:  $\sigma_{m\acute{a}x}$  y  $\sigma_{m\acute{i}n}$
- Índice de Reversión:  $R = \sigma_{m\acute{i}n} / \sigma_{m\acute{a}x}$
- Tensión Media:  $\sigma_m = (1/2) * (\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n})$
- Tensión Alternativa:  $\sigma_a = (1/2) * (\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n})$

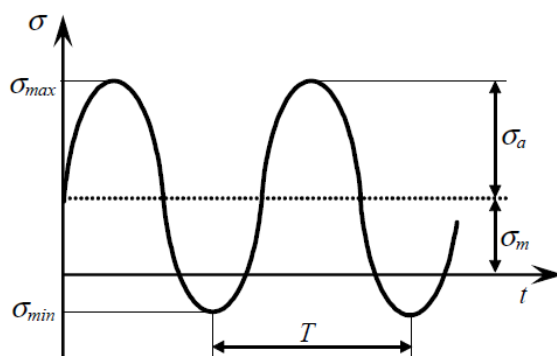


Ilustración 16 – Carga cíclica típica

En cambio, otros parámetros como la frecuencia o la forma de la evolución temporal del ciclo de tensión pueden considerarse que tienen una influencia más bien escasa.

La curva S-N esquemática de la ilustración anterior muestra las tres zonas principales que se presentan en los materiales metálicos: una zona inicial donde la pendiente es relativamente suave, una zona central donde se incrementa la pendiente y una zona final donde la pendiente vuelve a suavizarse hasta estabilizarse en una tensión límite. Este límite para las curvas S-N es conocido como límite de fatiga e implica que a niveles de tensión inferiores el material no llega a fallar nunca por fatiga. En materiales compuestos el número de ciclos para llegar a esta zona es tan elevado que prácticamente no se realiza experimentación en ella. Por lo tanto, usualmente se ignora se existe un límite a la fatiga en composites.

Las curvas S-N se basan en la vida a fatiga media o en una probabilidad de fallo dada. La generación de las curvas S-N de un material requieren muchos ensayos para de una forma estadística variar las tensiones alternas, las tensiones medias (o ratio de tensión) y contar el número de ciclos.

Para caracterizar un material se toma un conjunto de probetas y se las somete a sollicitaciones variables con diferentes niveles de tensión, contándose el número de ciclos que resiste hasta la rotura. Debido a la elevada dispersión estadística propia de la fatiga los resultados se agrupan en una banda de roturas. Una parte de esta dispersión puede atribuirse a errores del ensayo, pero es una propiedad del fenómeno físico lo cual obliga a realizar un gran número de ensayos de probetas a fin de determinar la banda de fractura con suficiente precisión. Por tanto, caracterizar un material a fatiga supone un coste muy importante.

### 6.3.2 Fatiga Multiaxial

Los estados de tensiones multiaxiales son muy comunes, siendo además las deformaciones multiaxiales muy difíciles de evitar. Las deformaciones son triaxiales, por ejemplo, en una barra sometida a tracción, ya que además de la deformación longitudinal  $\epsilon$ , se tienen dos deformaciones transversales  $\nu\epsilon$ , donde  $\nu$  es el módulo de Poisson. Por tanto a la hora de estimar la vida a fatiga de un componente, se habrá de tener en cuenta todo el estado tensional.

La curva S-N citada anteriormente es válida para situaciones uniaxiales. Por tanto se han de definir métodos que sean capaces de utilizar toda la información del estado multiaxial de cargas al que estarán sometidos los componentes y además ser capaces de aprovechar el conocimiento que se tiene de la fatiga uniaxial, representado básicamente por la curva S-N.

A pesar de que las metodologías tradicionales para abordar esta problemática en los composites son similares, si no las mismas, que las utilizadas para los metales, la degradación de los compuestos por la acción continuada de cargas cíclicas conlleva una serie de particularidades que requieren un distinto tratamiento.

## ❖ Métodos multiaxiales para Materiales Isótropos

Se mostrará a continuación dos métodos de cálculo de estimación de vida a fatiga para materiales isótropos según un enfoque de tensiones equivalentes, que tendrán en cuenta el estado de tensiones multiaxial y tensiones medias distintas de cero.

El enfoque de tensiones equivalentes es una extensión del criterio de fluencia estática hacia la fatiga. Los criterios más usados para la fatiga son los de la teoría de máxima tensión principal, teoría de máxima tensión tangencial (también llamada teoría de Tresca) y teoría de tensión tangencial octaédrica (también llamada teoría de Mises). Estas teorías consisten en reducir todo el estado de tensiones multiaxiales a una única tensión equivalente que recoja toda la información tensional.

### a) Teoría de Mises o de tensión tangencial octaédrica

La teoría de Mises es la más utilizada y por tanto la que se desarrollará en este estudio con mayor profundidad. Ésta parte de definir una tensión equivalente alterna según la siguiente expresión:

$$S_{eq\_alterna} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2}$$

Ecuación 1 – Tensión equivalente alterna

Donde  $\sigma_{1a}$ ,  $\sigma_{2a}$  y  $\sigma_{3a}$  son las tensiones principales alternas tales que  $\sigma_{1a} > \sigma_{2a} > \sigma_{3a}$ . Por lo tanto una vez reducido el estado tensional multiaxial a un estado equivalente uniaxial, la curva S-N ya puede ser utilizada para calcular las estimaciones de vida a fatiga.

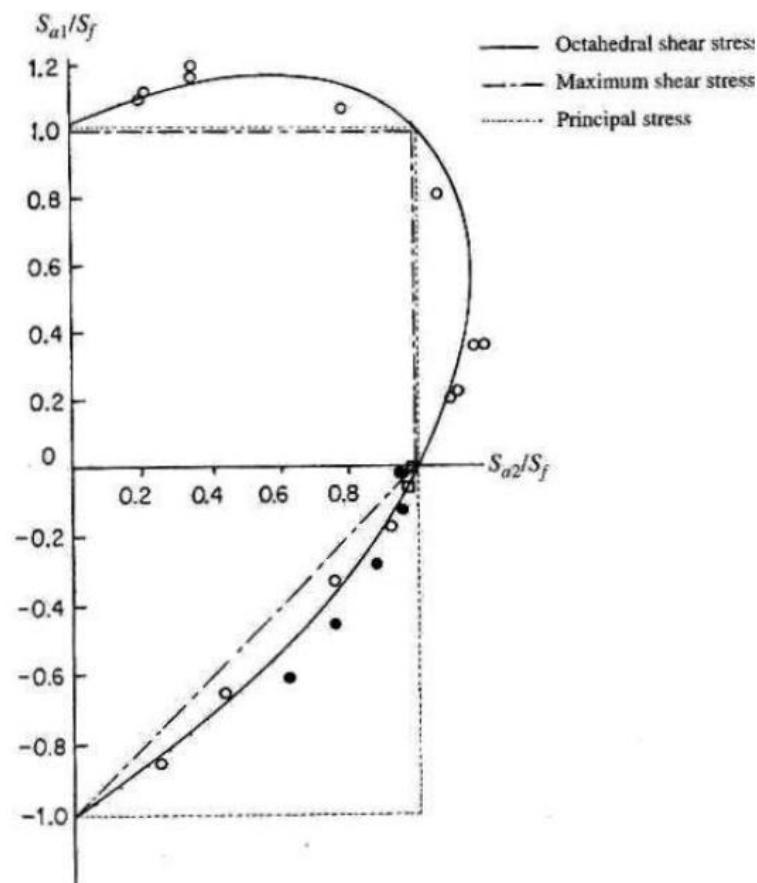


Ilustración 17 – Comparación de datos de fatiga biaxial para distintos métodos basados en tensiones

equivalentes

En caso de que existan tensiones residuales o tensiones medias distintas de cero, será necesario calcular una tensión equivalente media como suma de las tensiones principales medias.

$$S_{eq\_media} = \sigma_{1m} + \sigma_{2m} + \sigma_{3m}$$

Ecuación 2 – Tensión equivalente media

Se utiliza esta expresión y no una similar a la ecuación 1 pero con tensiones medias en lugar de alternas, porque esta última es insensible a la tensión hidrostática, ya que ésta siempre será positiva. En cambio, la ecuación 2 recoge fielmente la tensión hidrostática, pudiendo tomar valores positivos, negativos o nulos. De esta forma se representa mejor el efecto beneficioso de tensiones medias negativas y el efecto negativo de las tensiones medias positivas en las propiedades a fatiga.

Una vez que tenemos recogida toda la información del estado de tensiones multiaxiales y residuales, en un par de valores  $S_{eq\_media}$  y  $S_{eq\_alterna}$ , es necesario aplicar una ley que defina un único valor que reúna a los dos anteriores. Para ello se utilizará la ley de Goodman.

$$\frac{S_{q\_alterna}}{S_{Goodman}} + \frac{S_{q\_media}}{S_{ut}} = 1$$

$$\Rightarrow S_{Goodman} = \frac{S_{q\_alterna}}{1 - \frac{S_{q\_media}}{S_{ut}}}$$

Ecuación 3 – Ley de Goodman

Donde ( $S_{ut}$ ) es la resistencia última estática a tracción. Con esta ley se obtiene la tensión  $S_{Goodman}$ , que ahora sí, será la utilizada en la curva S-N para obtener la estimación de vida a fatiga del componente.

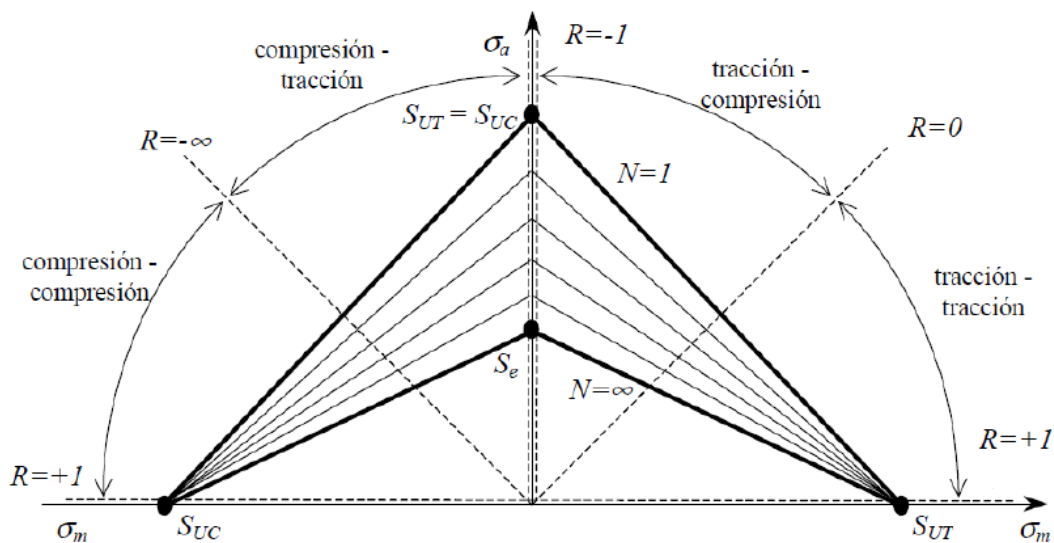


Ilustración 18 – Curvas de vida constante según la Ley de Goodman para un material de comportamiento simétrico

### b) Método de Sines

El método de Sines utiliza la tensión tangencial octaédrica como tensión cíclica y la tensión hidrostática como tensión media. De esta forma este método tiene en cuenta el estado multiaxial y las tensiones medias distintas de cero. Además, este método solo puede utilizarse para materiales homogéneos y por tanto, en nuestro caso tan sólo para metales. La expresión que rige este método es la siguiente:

$$\sqrt{2} \cdot S_{\text{Sines}} = \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} + m(\sigma_{xm} + \sigma_{ym} + \sigma_{zm})$$

Ecuación 4 – Tensión equivalente de Sines

Donde  $m$  es el coeficiente de influencia de las tensiones medias y se define de forma experimental y suele tomar el valor de 0.5. Si se dibujase la expresión anterior, esta sería igual que la teoría de tensión tangencial octaédrica, excepto que la elipse sería más pequeña para valores positivos de tensión media y más grande para valores negativos. Con esta expresión se obtiene la tensión  $SS_{\text{Sines}}$ , que será la utilizada en la curva S-N para obtener la estimación de vida a fatiga del componente.

Los métodos basados en el enfoque de las tensiones equivalentes ha sido comúnmente utilizados debido a su simplicidad, a pesar de que sus estimaciones sólo son lo suficientemente buenas para algunos materiales y algunos casos de carga multiaxiales. Además estos métodos sólo se pueden aplicar cuando los ejes principales permanecen fijos durante todo el ciclo de carga.

### ❖ Métodos multiaxiales para Materiales Compuestos

Para el caso de materiales compuestos, el método utilizado no es más que una variación de la ley de Goodman para materiales isotrópico, aunque realmente las curvas que se generan son más parecidas a las parábolas de Gerberg que a las rectas de Goodman.

El método parte, al igual que en el caso de los metales, de calcular un par de tensiones equivalentes, alterna y media, que recojan toda la información del estado multiaxial, (véanse las ecuaciones 1 y 2). El método se resume en la siguiente expresión:

$$a = f \cdot (1 - m)^u \cdot (c + m)^v$$

donde:

$$a = \frac{\sigma_{q_{\text{alterna}}}}{\sigma_{ut}}$$

$$m = \frac{\sigma_{q_{\text{media}}}}{\sigma_{ut}}$$

$$c = \frac{\sigma_{uc}}{\sigma_{ut}}$$

Ecuación 5 – Resumen método multiaxial materiales compuestos

Siendo  $\sigma_{ut}$  y  $\sigma_{uc}$  las resistencias estáticas a tracción y a compresión del laminado respectivamente. Los parámetros  $f$ ,  $u$ , y  $v$  son empíricos y deben ser obtenidos a partir de datos experimentales. Normalmente los exponentes  $u$  y  $v$  tienen un valor parecido y el valor de  $f$  controla principalmente la altura de la curva, estando su valor en torno a 1, aunque para mayor seguridad será tomado un valor de 0.9.

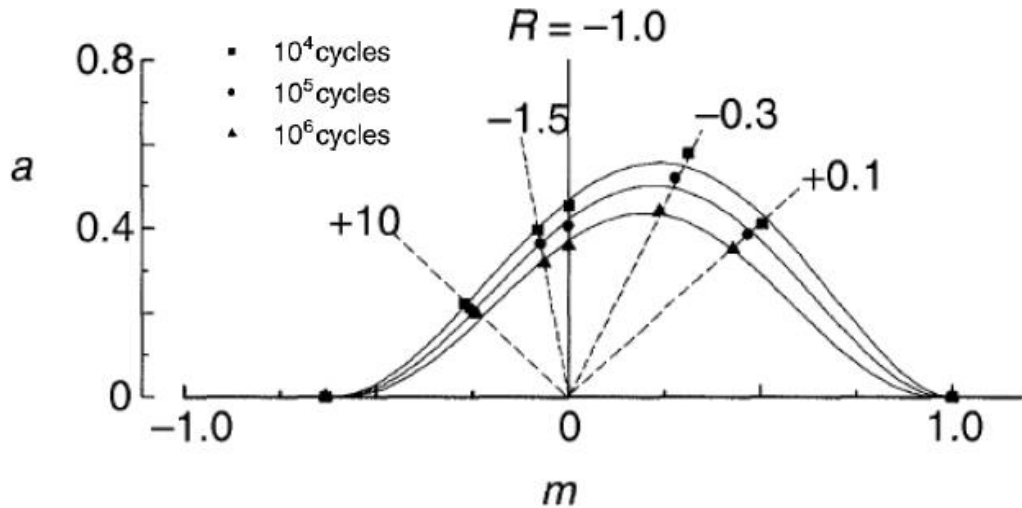


Ilustración 19 – Relación entre tensiones alternas y medias adimensionales para CFRP

La gran diferencia con el modelo de predicción en metales radica en lo siguiente: mientras que para éstos se utilizan por último las curvas S-N para el cálculo de la estimación de vida; en el caso de los materiales compuestos, esta dependencia con la vida del componente se realiza a través de los exponentes  $u$  y  $v$  de la ecuación 5. Estos exponentes siguen las siguientes expresiones:

$$u = A \cdot \log(N_f) + B$$

$$v = C \cdot \log(N_f) + D$$

Ecuación 6 – Exponentes  $u$  y  $v$  para el cálculo de vida de CFRP

Donde los parámetros  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , y  $D$  se obtienen a partir de datos experimentales.

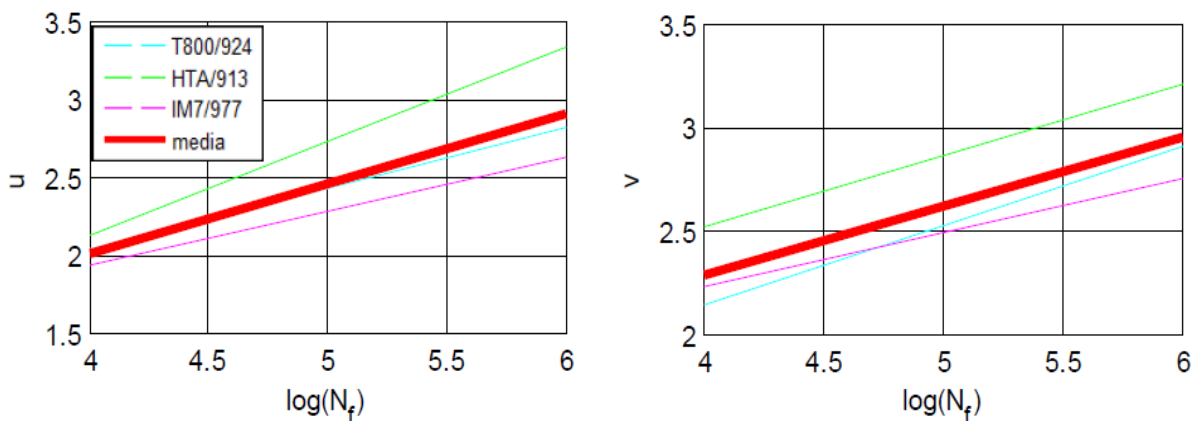


Ilustración 20 – Dependencia de los parámetros  $u$ ,  $v$  para algunos CFRP



Por tanto la estimación de vida para materiales compuestos se puede reducir a la siguiente expresión donde conocidos los datos relativos al laminado ( $\sigma_{ut}$ ,  $\sigma_{uc}$ , A, B, C, D) y dadas unas tensiones alterna y media equivalentes (en MPa) según las ecuaciones 1 y 2, se puede obtener la estimación de vida del componente.

$$\frac{\sigma_{q\text{ alterna}}}{\sigma_{ut}} = 0.9 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{q\text{ media}}}{\sigma_{ut}}\right)^{(A \cdot \log(N_f) + B)} \left(\frac{\sigma_{uc}}{\sigma_{ut}} + \frac{\sigma_{q\text{ media}}}{\sigma_{ut}}\right)^{(C \cdot \log(N_f) + D)}$$

Ecuación 7 – Estimación de vida para materiales compuestos

Debido a la no existencia de datos experimentales de las propiedades de fatiga referentes al laminado estudiado en este proyecto, se realizará un promedio de datos de fatiga de CFRP similares en propiedades mecánicas y secuencia de apilado. Como se observa en la siguiente ilustración el comportamiento de estos laminados es muy similar entre ellos a distintos niveles de índice de reversión.

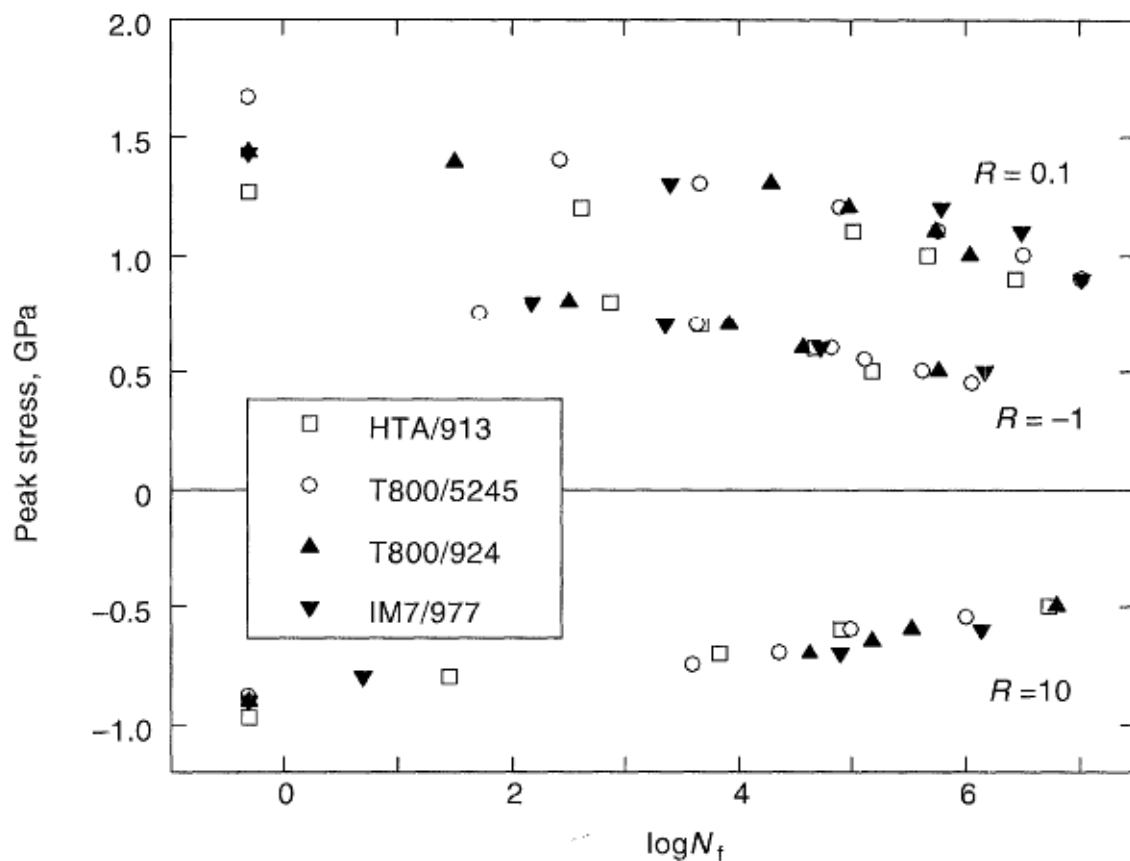


Ilustración 21 – Comparación de datos de fatiga para distintos CFRP

## 6.4 Datos experimentales de vida a fatiga de fibra de carbono

Al haber sido explicadas las metodologías de cálculo de la vida a fatiga en el apartado anterior, ya que como especifican las normativas de seguridad, debemos demostrar la vida a fatiga del cuadro para diferentes ensayos de carga.

Para poder calcular, el primer paso es aportarle al programa los datos iniciales. Las propiedades y caracterización del material a emplear en el cálculo son importantísimas ya que los resultados se basan en dichos datos. Por tanto, ¿Cuál es la mejor manera de estar seguros de las propiedades de un material? Pues claramente la respuesta es: ensayando. Gracias al Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales y de su amplia experiencia con los composites, disponemos de todo tipo de datos contrastados acerca de las propiedades de los laminados.

Este proyecto se basa especialmente en los siguientes dos documentos buscando que los cálculos se aproximen lo máximo posible a la realidad. Aunque siempre buscando contrastar el orden de magnitud de las propiedades de los materiales con otros estudios. Pero como un objetivo posterior a este proyecto es la fabricación del cuadro, se ha considerado más oportuno emplear los datos específicos del material que se empleará, un tejido de fibra de carbono prepeg.

- *IPS 05- 01-006-03* (normativa Airbus)
- *Estudio del efecto de la frecuencia en laminados de material compuestos sometidos a cargas de fatiga uniaxiales* (estudio del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales)

La norma de Airbus es una Individual Product Specification – Hexcel Composites Hexply M21/40%/46280-6K. Es decir las especificaciones de producto para el material fibra de carbono prepeg que se cura en autoclave a 180°, donde encontramos todas las características del material, sus condiciones de almacenaje, condiciones de curado, y demás datos contrastados. Por ejemplo, en la siguiente tabla se muestran las propiedades mecánicas obtenidas a partir de ensayos.

Table 6: Release tests – Mechanical properties

Property <sup>1)</sup>		Test Method	Unit	Test Condition	Test temp. (°C)	Requirements			
						Individual		Average	
						Mini	Maxi	Mini	Maxi
T <sub>g</sub> <sup>2)</sup>	onset	AITM 1-0003 (5°C/min)	°C	Dry	-	176			
	loss					198			
Tensile <sup>3)</sup> (7 plies; 0°)	Strength	EN 2597 Type B (7 plies)	MPa	Dry	RT	620	1060 <sup>6)</sup>	700	1040 <sup>6)</sup>
	Modulus		GPa			55	75	60	70
Interlaminar Shear <sup>4)</sup> Strength (0°)		EN 2563	MPa	Dry	RT	55	85 <sup>6)</sup>	60	80 <sup>6)</sup>
			MPa	Dry	120	40	69 <sup>6)</sup>	45	60 <sup>6)</sup>
Extent of cure <sup>5)</sup>		AITM 3-0008	%	-	-	> 90			

Notes:  
1) In addition the thickness per ply should be reported for every test specimen.  
2) 1 specimen on the first roll of the batch. Drying is necessary if the specimen is not tested within 48h after curing. In this case dry the specimen 1 week at 105°C or 12h at 110°C.  
3) Requirements for Tensile are based using bagging with peel ply. Tensile Strength/Modulus is calculated using a theoretical cured ply thickness of 0.285 mm  
4) Interlaminar shear strength is calculated with actual thickness.  
5) Guaranteed value. Not to be tested for batch release.  
6) Values given for information only. Can be used as survey limit.

Tabla 5 – Propiedades mecánicas de tejido fibra de carbono prepeg

El segundo documento mencionado, es igual o más importante que la normativa anterior. El motivo es que para poder calcular o intentar predecir la vida a fatiga, al programa de elementos finitos hay que aportarle datos del comportamiento del material a fatiga en forma de curva tensión-nº de ciclos. En este estudio se realizaron varios ensayos a fatiga de probetas con diferentes orientaciones de las fibras, a diferentes frecuencias de aplicación de carga, y considerando la variación de temperatura, con el fin de encontrar que parámetros influyen en la vida a fatiga y cómo.

En la siguiente ilustración observamos la curva tensión – nº de ciclos, para probetas laminadas a 0º y 90º, las que pueden ser consideradas las más homogéneas en su comportamiento. El primer punto es su tensión máxima estática, ya que solo se le aplica un ciclo de carga. La gráfica muestra que al ir disminuyendo los niveles de carga de los ciclos la vida a fatiga aumenta, y se podría suponer que para niveles de carga inferiores a los 600 MPa, el fallo debido a fatiga no se produciría.

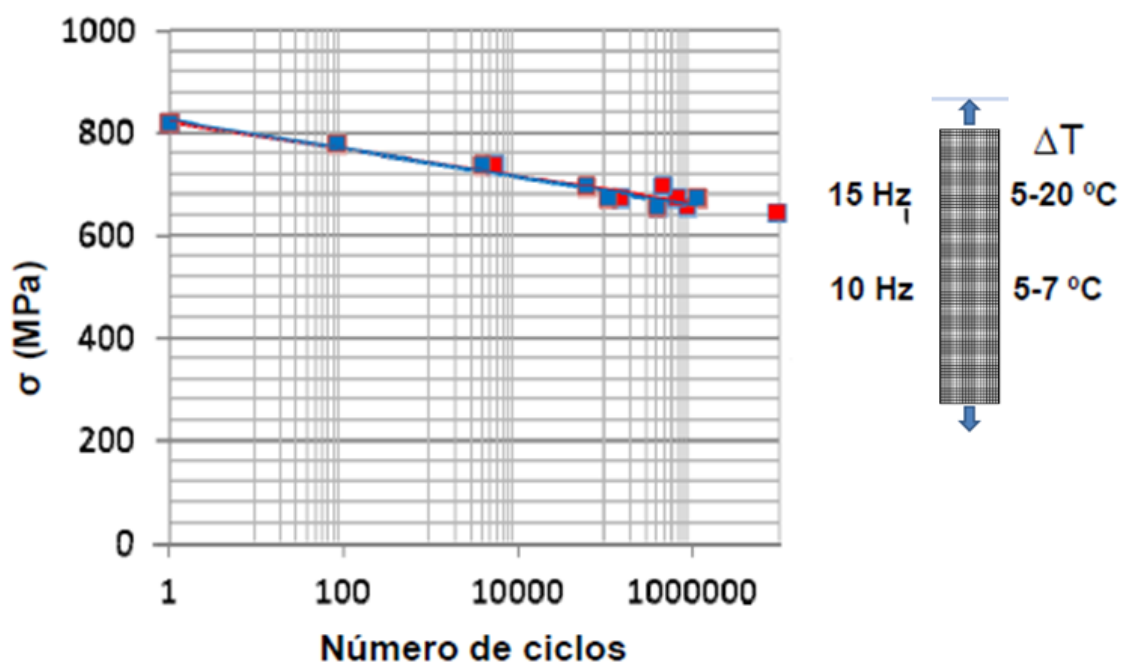


Ilustración 22 – Grafica tensión – nº de ciclos para probetas 0º/90º

En el análisis de los resultados de todos los ensayos realizados por el grupo, se muestra la siguiente gráfica. Para todos los rangos de frecuencias y las diferentes orientaciones se observa que todos los resultados se ajustan a una única curva de fatiga si se adimensiona con la tensión máxima estática para el caso de laminados unidireccionales.

Gracias a estas curvas, el comportamiento a fatiga para cintas se puede deducir para cualquier orientación, conociendo el comportamiento del laminado a 0º. Mencionar la relación de estos datos con la teoría explicada en el apartado anterior de que todas las curvas obtenidas se ajustan a una ley tipo:  $\sigma = a \log N + b$  (como las expresiones de la ecuación 6) y que pueden adimensionalizarse en función de su tensión máxima.

Para el caso 0º/90º, el cual es el que más interesa a este proyecto ya que se busca la homogeneidad en las propiedades para el cálculo posterior, observamos que es el caso más favorable de todos los estudiados. Esta observación es muy prometedora ya que disponemos del mayor margen al fallo al tener las mejores propiedades contra la fatiga.

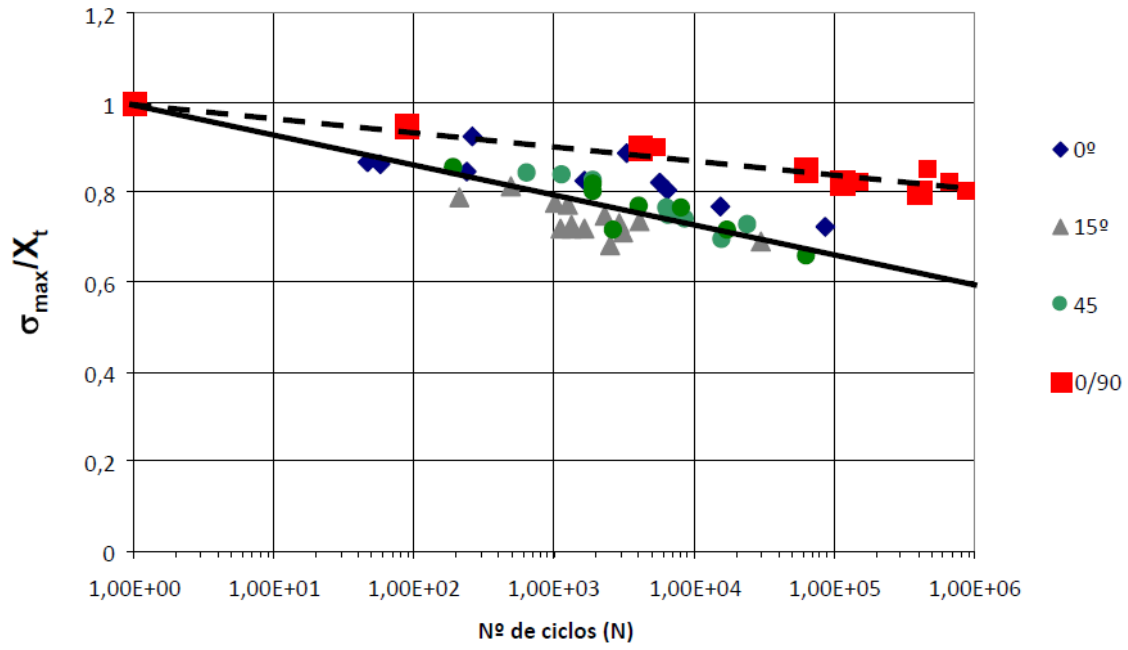


Ilustración 23 – Curva adimensionalizada tensión - nº de ciclos

# 7 DISEÑO Y ANÁLISIS

---

En este apartado se resume y se expone la parte más gruesa del trabajo realizado. Todo el conocimiento adquirido y explicado en los apartados anteriores se pone en práctica en esta parte del proyecto. Volver a recalcar que el diseño y el análisis van de la mano siendo un proceso iterativo, donde se comienza por diseños preliminares donde a juicio del diseñador se toman decisiones paramétricas según su experiencia. Posteriormente se analizan a través de elementos finitos las consideraciones anteriores, validándolas o sacando conclusiones de mejoras, donde por lo tanto se vuelve a modificar el diseño según los resultados de cálculo analizados.

¿Cuándo acaba este proceso iterativo? Normalmente existen limitaciones de tiempo, presupuesto, fabricación, etc. Entonces esa decisión depende de la aplicación concreta y del alcance del proyecto. Particularizando para este trabajo, se ha simplificado el diseño considerando un único espesor de los tubos de las diferentes partes del cuadro como parámetro decisivo de diseño porque la intención es fabricarlo en una única pieza. Los métodos de fabricación actuales no suelen ser así, ahorrándonos en nuestro caso el posterior ensamblaje de los diferentes tubos. Una vez explicado esto, podemos contestar a la pregunta inicial del párrafo. El proceso iterativo ha acabado en este caso cuando el espesor de los tubos cumplía en el análisis estático y a fatiga los requerimientos de la normativa anteriormente explicada.

¿Con que espesor inicial comenzar a iterar? Primera pregunta importante que el diseñador se hace al comenzar este proceso. La respuesta es muy simple, buscar en los cuadros de bicicletas actuales el orden de magnitud del espesor de los tubos y partir desde ahí. En las bicicletas de cuadro de aluminio analizadas de precio moderado el espesor media en varias zonas importantes del cuadro aproximadamente unos 5mm. Obviamente en diseños más optimizados y con aluminios de mejor calidad esta dimensión puede ser menor.

En el caso que nos implica al ser un diseño no convencional conviene estar por el lado de la seguridad, es decir, comenzar sobredimensionando e ir optimizando el diseño con cada iteración. Las propiedades del material a emplear en los cálculos son muy superiores al de las bicis analizadas para encontrar un espesor inicial con el que comenzar, por lo que se podía intuir de primeras que el primer diseño estaría sobredimensionado. La cuestión donde aparecía mayor incertidumbre es cuando consideramos que el diseño realizado no es para nada parecido al convencional. En todos los diseños tradicionales la estructura del cuadro busca un mejor reparto de las cargas al ser similar a una celosía. En cambio, el diseño propuesto podríamos decir que tiene forma de “X” no siendo óptimo el reparto de cargas. En definitiva, lo analizado aquí es la búsqueda del equilibrio del material necesario para la validación del diseño tan novedoso, se fue optimista al considerar que las altas propiedades de la fibra de carbono validarían el diseño y así ha quedado demostrado.

En el proceso iterativo se buscaba disminuir el espesor inicial de los tubos del cuadro para intentar optimizar el diseño, y así disminuir el material necesario, lo que implicaría un menor coste de fabricación que es uno de los claros objetivos del fabricante. Se llegó a un resultado final de 3mm de espesor para los tubos que aun así está de parte del lado de la seguridad porque muchos de los ensayos se podrían optimizar más. Lo ideal para sacar una bicicleta totalmente funcional sería poder ensayar cuadros fabricados para validar los cálculos y poder seguir optimizando, pero la parte de fabricación es a posteriori a este trabajo. Si se ha alcanzado el objetivo del proyecto que era tener el conocimiento teórico validado acerca del diseño del cuadro y su comportamiento mecánico y su vida a fatiga cumpliendo las exigencias de seguridad.

## 7.1 Consideraciones generales en el Diseño

El diseño se ha realizado en este caso con el programa *Solidedge*. El proceso de diseño tiene dos características fundamentales: ser muy laborioso y ser muy subjetivo (si se diseña desde cero).

Tiene cierta complejidad el inicio del diseño. El trasladar conceptos e ideas a geometrías en tres dimensiones no es tarea sencilla. Una herramienta muy útil, rápida y muy utilizada en los inicios puede ser simplemente la realización de bocetos en papel con lápiz. En la siguiente imagen se muestra uno de los primeros bocetos realizados para ilustrar el concepto. Esta etapa es la parte más subjetiva y donde cada diseñador plasma de la mejor manera posible todos sus conocimientos.

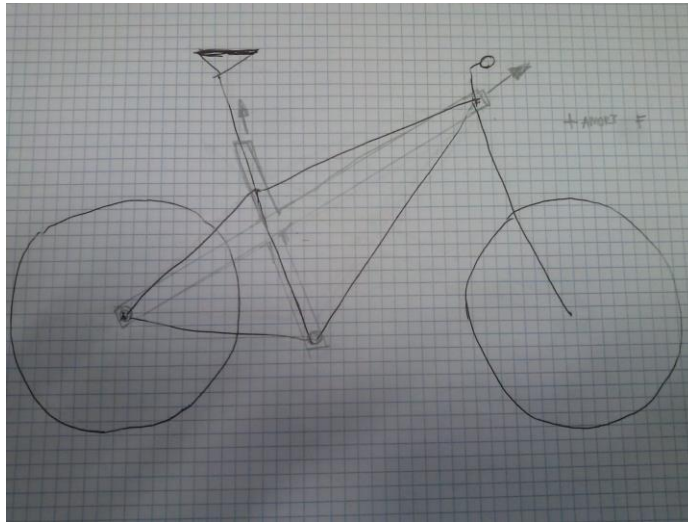


Ilustración 24 – Boceto conceptual del diseño del cuadro

Tras la realización de estos bocetos en las distintas perspectivas en 2D, se pasa a convertir estas ideas al mundo de las tres dimensiones. Aquí comienza la etapa más laboriosa del diseño, que depende básicamente de la destreza del diseñador.

Al principio se realizó un diseño con tubos circulares. Tras analizar otras opciones, se optó por cambiar el diseño inicial a perfiles elípticos por motivos de mejor momento de inercia en la dirección de las cargas, y también consiguiendo un perfil más aerodinámico.

En las siguientes imágenes podemos ver el diseño final del cuadro, que como antes hemos mencionado no es para nada convencional. También se muestran unas imágenes de los modelos impresos en 3D con tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) muy empleada y de gran utilidad en las etapas de prototipado.

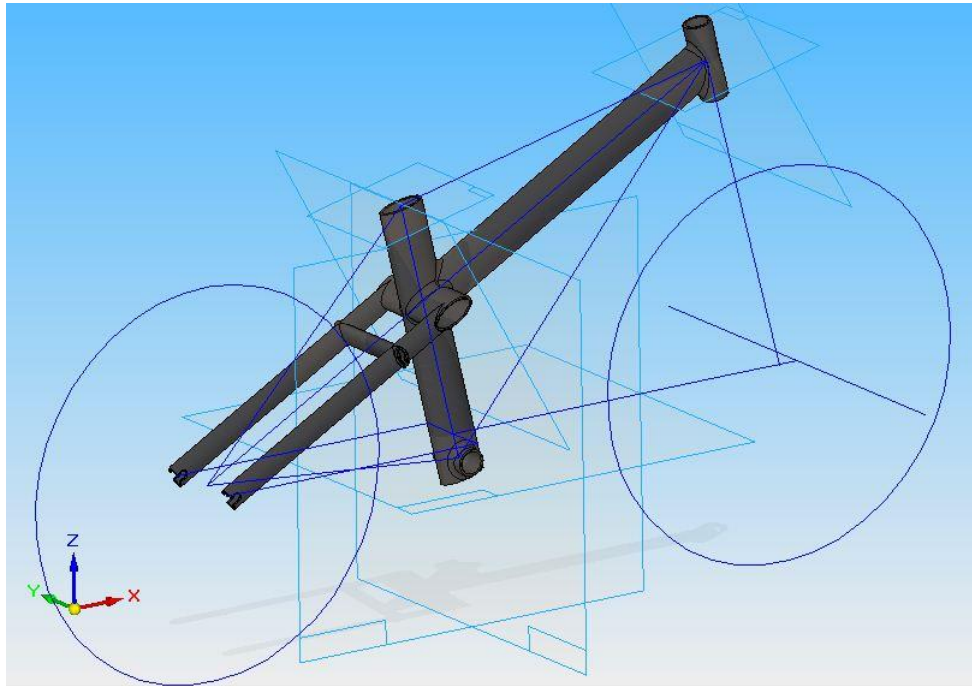


Ilustración 25 – Diseño del cuadro con Solidedge



Ilustración 26 – Modelos del cuadro impresas 3D en FDM

## 7.2 Consideraciones generales en el Cálculo

El análisis o cálculo estructural del cuadro se ha realizado con el software *Ansys*, importando los archivos CAD del diseño realizado. Para ello se ha empleado el modo de proyecto de cálculo estático estructural del *Workbench* (Banco de Trabajo) del programa.

En este subapartado se comentará de manera resumida los pasos a seguir para realizar los cálculos estáticos y dinámicos. En la siguiente ilustración se observa el esquema del proyecto abierto en el software, donde se aprecian los tres diferentes análisis realizados. A partir de aquí se explicaran los como introducir las propiedades del material, crear las simulaciones, enlazarlas, aplicar las cargas, etc.

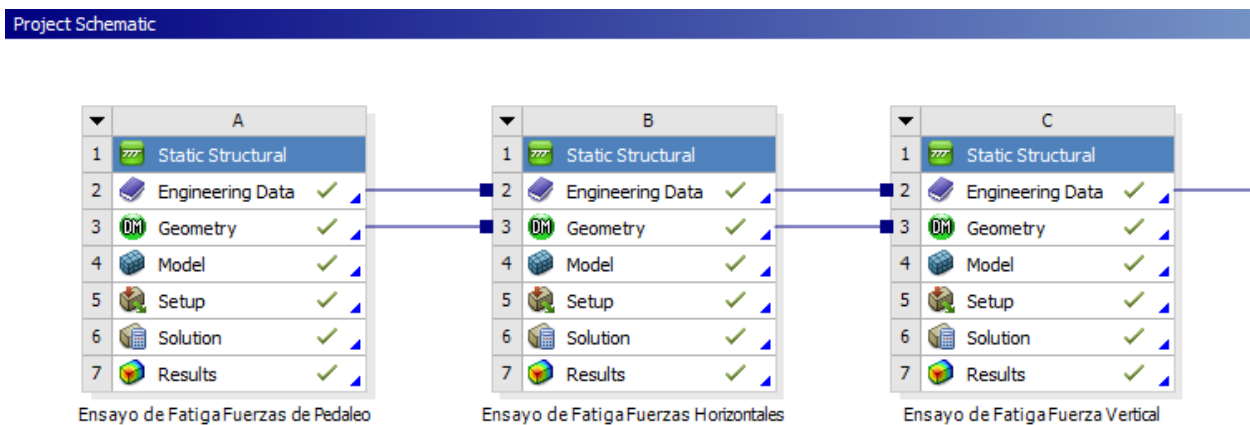


Ilustración 27 – Interfaz simulaciones con Ansys WorkBench

Básicamente se utilizan 3 módulos a la hora de lanzar los cálculos o simulaciones:

### 1. Ingeniería (Engineering Data):

Este módulo se emplea para poner los datos de cálculo, es decir, las propiedades del material.

Como se aprecia en la imagen las propiedades a introducir son: la densidad, el coeficiente de expansión térmica, la curva de vida, los límites elásticos a tracción compresión y de rotura.

Properties of Outline Row 4: Fibra de Carbono	
A	
1	Property
2	Density
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion
6	Isotropic Elasticity
12	Alternating Stress Mean Stress
16	Strain-Life Parameters
24	Tensile Yield Strength
25	Compressive Yield Strength
26	Tensile Ultimate Strength
27	Compressive Ultimate Strength

Ilustración 28 – Propiedades de material a introducir



## 2. Geometría (Design Modeler):

En este segundo módulo del programa se importan los archivos CAD, definir los diferentes elementos y sus características como el tipo de material o las interfaces entre elementos, y el mallado.

En la imagen se aprecia la diferencia de colores entre el cuadro y la horquilla y es debido a que son elementos diferentes con características distintas. El análisis de este proyecto es del cuadro, pero para realizar los ensayos según la normativa hay que emplear una horquilla o barra fija a la que atribuirle características de mayor magnitud, obligando así a que el fallo se produzca en el cuadro que es el elemento de estudio.

En este proyecto los cálculos se han realizado con lo que la norma denomina “falsa horquilla”, ya que es necesaria emplearla en las simulaciones de los ensayos.

En este módulo también se realiza el mallado de los diferentes componentes, pudiendo elegir la dimensión de los elementos de la malla para garantizar la exactitud de los cálculos.

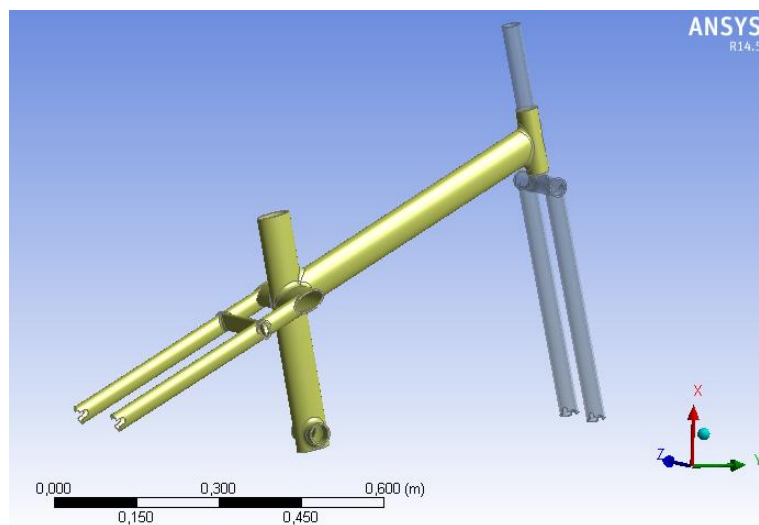


Ilustración 29 – Diseño CAD importado a Ansys

## 3. Modelo (Mechanical – Ansys Multiphysics):

El último módulo, donde se lleva a cabo los análisis. Aquí se procede a la aplicación de cargas y configuración de los cálculos o estudios a realizar.

Se comienza aplicando las cargas y las restricciones de soportes al modelo en los puntos adecuados. Para cada caso se han empleado las especificaciones indicadas en la normativa.

En el caso que nos compete, se han realizado cálculos estáticos como el estado tensional equivalente de Von Mises, deformación máxima, las deformaciones elásticas.

Para el análisis de fatiga se ha utilizado el método antes explicado de fatiga multiaxial para el caso de materiales compuestos. El método utilizado no es más que una variación de la ley de Goodman para materiales isotrópico, aunque realmente las curvas que se generan son más parecidas a las parábolas de Gerberg que a las rectas de Goodman.

El programa dispone de herramientas para el estudio a fatiga, donde se eligen los tipos de métodos a emplear en el cálculo. Para estudiar la vida fatiga, el daño y el factor de seguridad se ha utilizado el método mencionado.

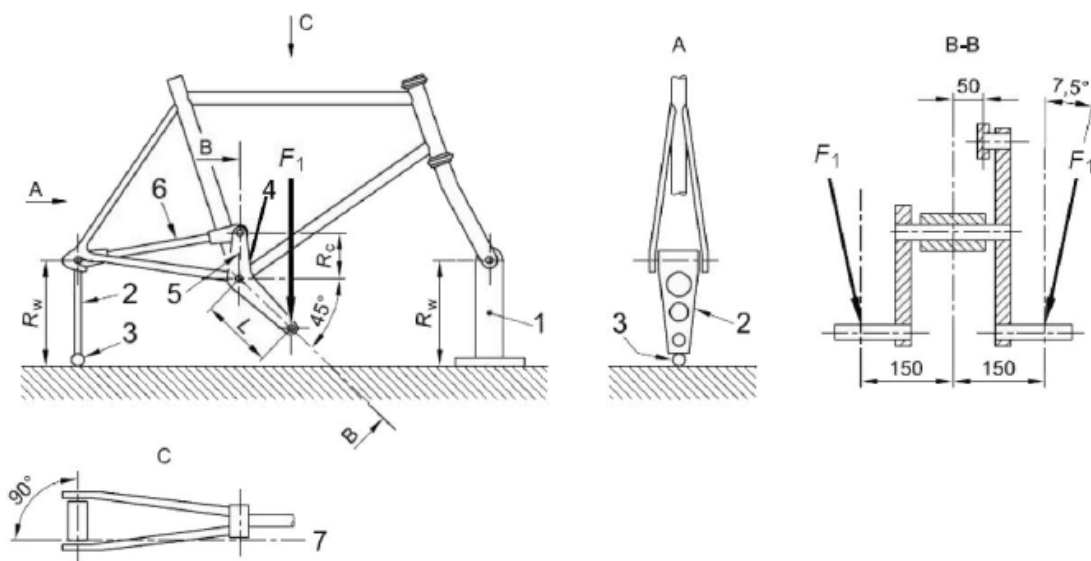
En los siguientes tres apartados se realizarán los cálculos y simulaciones según los ensayos de la normativa utilizando las consideraciones explicadas en este. Como se puede ver en la ilustración 26, los dos primeros módulos sirven para los 3 casos de estudio, solo diferenciándose en las cargas y restricciones.

### 7.3 Ensayo con fuerzas de pedaleo

En los siguientes apartados se explicará los diferentes ensayos y los resultados obtenidos de las simulaciones de los mismos. Para la realización de los tres siguientes análisis hay que tener en cuenta dos partes diferentes de la normativa. En la parte 6 se explican los ensayos y aporta los datos necesarios para su ejecución. Pero hay que ir a la parte 2 de la misma para tener los criterios de validación de los ensayos, y así cumplir con los requisitos de seguridad.

Se monta el conjunto cuadro-horquilla sobre una base como se muestra en la siguiente figura. Se ha empleado una horquilla falsa con altas propiedades de resistencia para evitar que el fallo suceda en ella. Se fijan las punteras traseras impidiendo su movimiento pero dejando libre el grado de libertad de giro, pudiendo oscilar alrededor del eje, pero garantizando una rigidez en el plano longitudinal al cuadro.

La aplicación de las fuerzas sobre las bielas tiene unas distancias, orientaciones y magnitudes específicas para cada tipo de cuadro. En la siguiente tabla pueden observarse los datos específicos empleados.



**Leyenda**

- $R_w$  Altura del dispositivo de fijación rígida y unión vertical
- $R_{CL}$  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

Ilustración 30 – Cuadro. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo

Fuerza en el eje de pedal ( $F1$ )	1200 N
Longitud de la biela ( $L$ )	175 mm
Longitud horizontal al centro del cuadro	150 mm
Orientación aplicación de la fuerza	7,5°

Tabla 6 – Datos ensayo fuerzas de pedaleo

Se somete cada eje del pedal a una fuerza repetida de  $FI$  en el punto específico definido en la imagen y tabla anteriores. Durante la aplicación de estas fuerzas de ensayos, se verifica que la fuerza sobre un eje del pedal ha descendido al 5% o menos de la fuerza máxima antes de comenzar a aplicar la fuerza de ensayo en el otro eje del pedal.

Los criterios de validación o requisitos de seguridad del ensayo de fuerzas de pedaleo son los siguientes:

- No debe haber fisuras ni roturas visibles en ninguna parte del cuadro.
- Para cuadros de material compuesto, los desplazamientos (valor de la amplitud) en los puntos donde se aplican las fuerzas de ensayo no deben aumentar en más de un 20% de los valores iniciales.
- La vida a fatiga superará los  $10^4$  ciclos de ensayo.

Los resultados han sido favorables al diseño realizado y se recogen en la siguiente tabla. Posteriormente se muestran las imágenes de las simulaciones.

En el cálculo de vida a fatiga, mencionar que el programa necesita un número máximo de ciclos para el cálculo. Se ha optado por  $10^5$  superando ampliamente el orden de magnitud necesario en los criterios, situándonos más aún del lado de la seguridad. Para los otros dos ensayos se ha optado por la misma estrategia en cuanto al cálculo a fatiga.

Tipo de cálculo realizado	Magnitud de los resultados	Requisitos
Tensión máxima equivalente Von Mises	111,18 MPa	Min Tensile Strength 700 MPa Max Tensile Strength 1040 MPa
Deformación total máxima	1,88 mm	No aplica
Deformación elástica	$5 \times 10^{-4}$	No aplica
Vida a fatiga	$10^5$ ciclos	$10^4$ ciclos
Daño	Ninguno	No debe haber fisuras ni roturas
Factor de seguridad	15	2

Tabla 7 – Resultados del ensayo fuerzas de pedaleo

En las imágenes se pueden observar los puntos críticos de este ensayo. Justo en la parte inferior del punto medio del cuadro es el punto que más tensiones sufre. Por la geometría y la dirección de las fuerzas aplicadas es lógico que el punto de tensión máxima se halle en esa zona, pero el valor de la tensión es muy pequeño comparado con el límite elástico del carbono, por lo cual el diseño es válido. Aunque sí es recomendable reforzar esa zona en el momento de la fabricación.

Sobre la deformación máxima, se observa el desplazamiento que sufre la zona de los pedales en cada ciclo, pero claro está que como la tensión es inferior a su límite elástico siempre vuelve el desplazamiento a su situación inicial. Acerca de la fatiga, el cuadro responde de manera más que eficiente. Cumpliendo los  $10^5$  ciclos de carga sin observar ningún daño en él, aunque la normativa solo requiera llegar a los  $10^4$  ciclos.

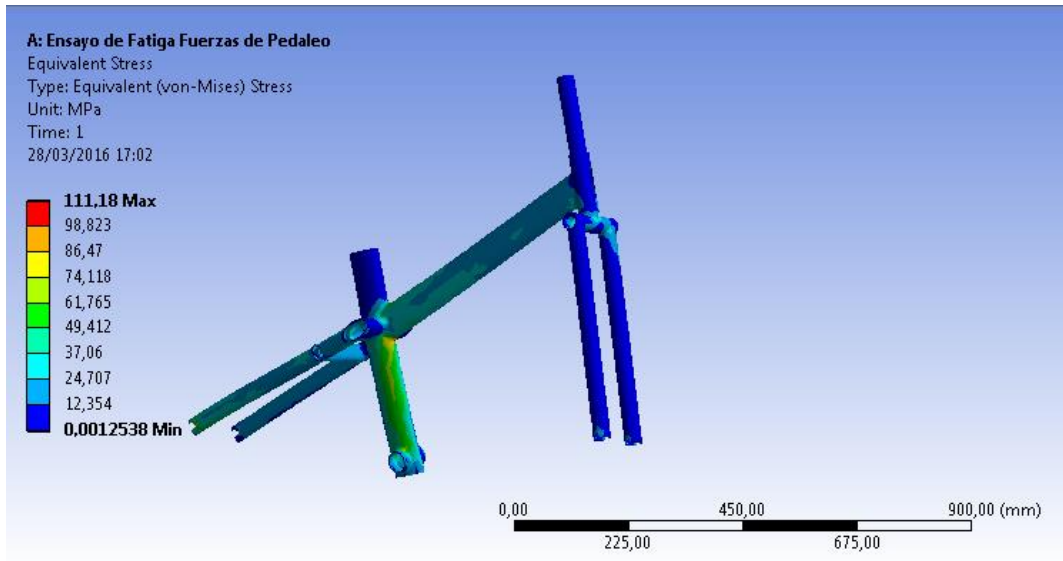


Ilustración 31 – Tensión de Von Mises. Ensayo fuerzas de pedaleo

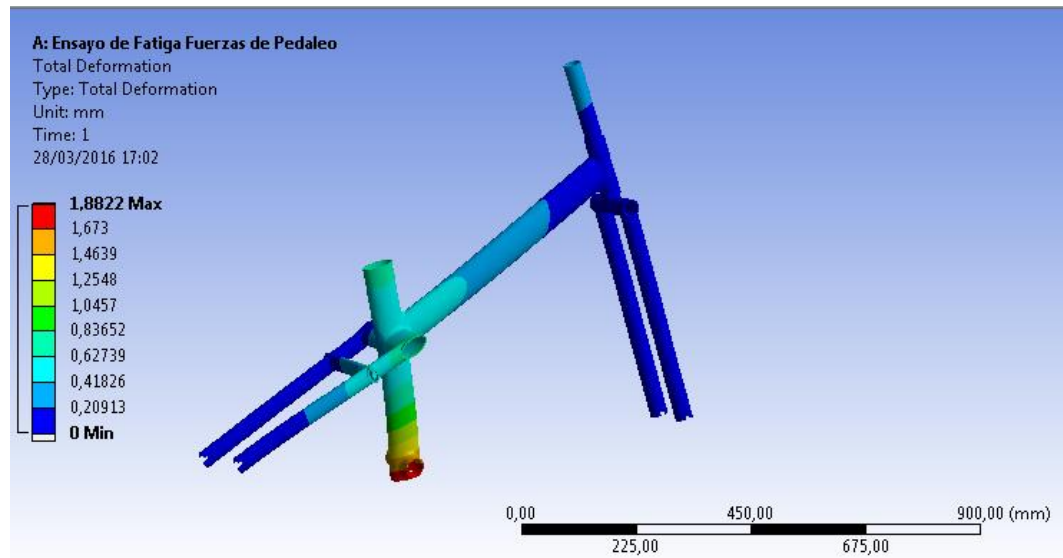


Ilustración 32 – Deformación total. Ensayo fuerzas de pedaleo

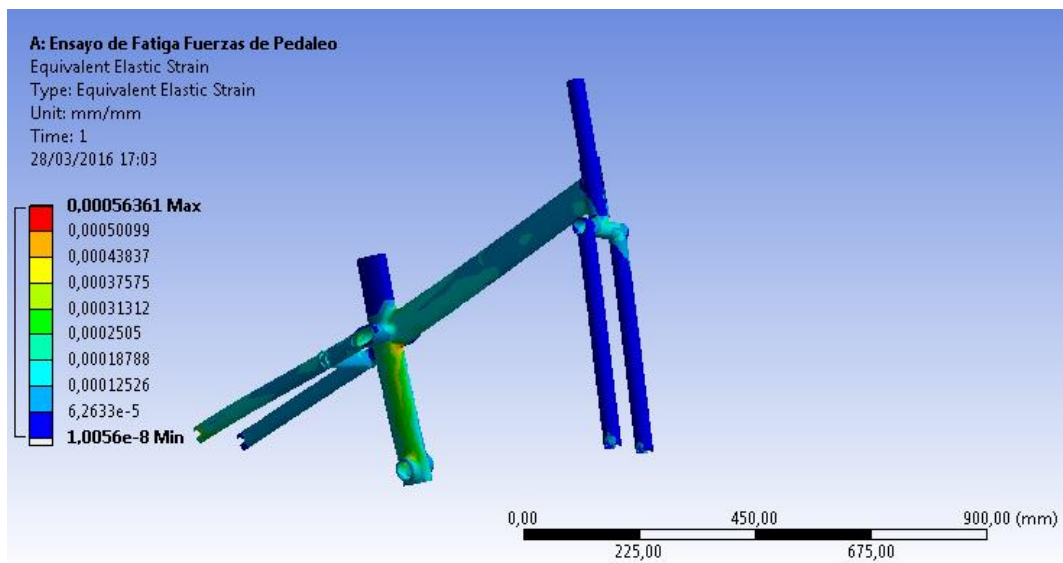


Ilustración 33 - Deformación elástica. Ensayo fuerzas de pedaleo

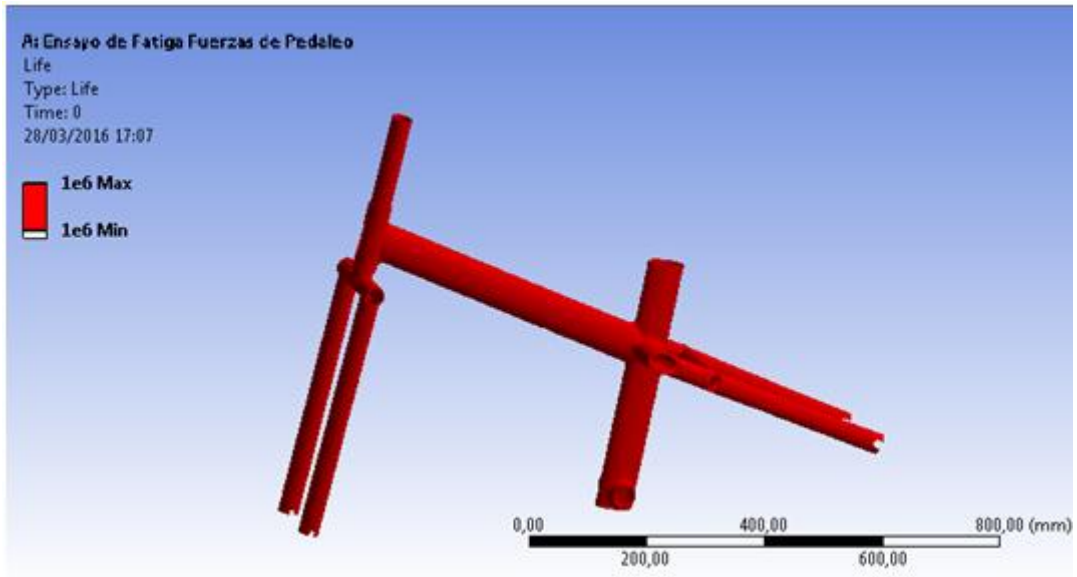


Ilustración 34 – Vida a fatiga. Ensayo fuerzas de pedaleo

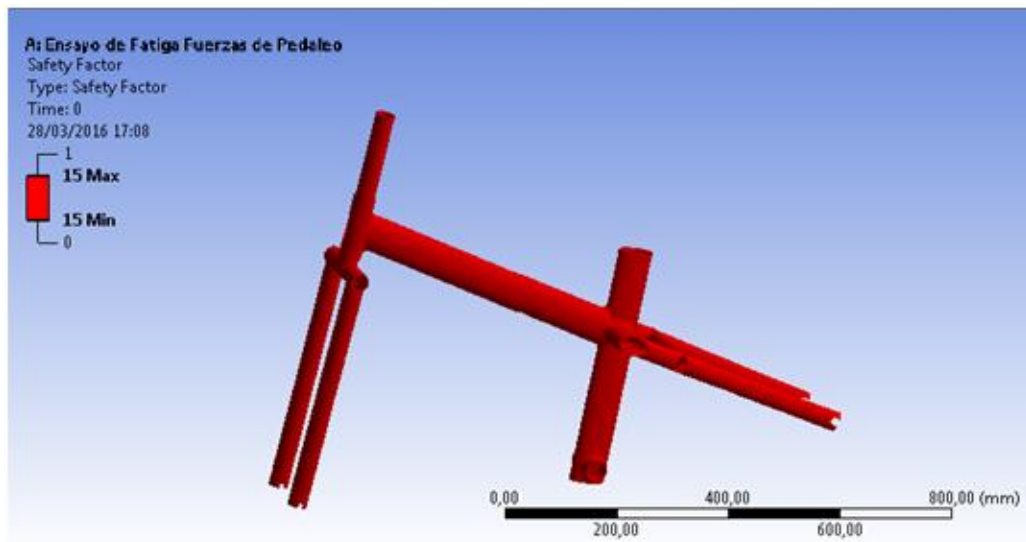
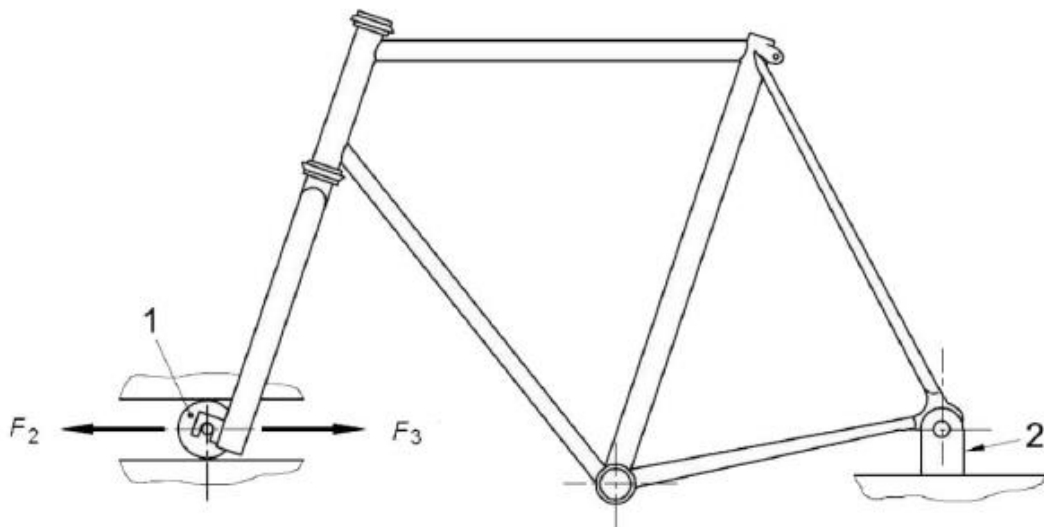


Ilustración 35 – Factor de seguridad. Ensayo fuerzas de pedaleo

## 7.4 Ensayo por fuerzas horizontales

En este ensayo se instala el cuadro en su posición normal, fijándolo a las punteras traseras, de tal forma que no esté limitado en su rotación (preferentemente el eje trasero). Los ejes delantero y trasero deben estar alineados en el plano horizontal.

Se aplican ciclos de fuerzas dinámicas horizontales de  $F_2$  hacia delante y de  $F_3$  hacia atrás en las punteras de la horquilla durante  $CI$  ciclos, como se muestran en la siguientes ilustración y tabla. La horquilla delantera debe estar bloqueada en la dirección vertical, pero con libertad de movimiento en la dirección longitudinal bajo el efecto de las fuerzas aplicadas.



### Leyenda

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

Ilustración 36 – Cuadro. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales

Fuerza hacia delante ( $F_2$ )	1200 N
Fuerza hacia detrás ( $F_3$ )	600 N
Ciclos de ensayo ( $CI$ )	50.000 ciclos

Tabla 8 – Datos ensayo fuerzas horizontales

Los criterios de validación o requisitos de seguridad de este ensayo de fuerzas horizontales son los siguientes:

- No debe haber fisuras ni roturas visibles en ninguna parte del cuadro.
- La vida a fatiga superará los 50.000 ciclos de ensayo.

Los resultados han sido favorables al diseño realizado y se recogen en la siguiente tabla. Posteriormente se muestran las imágenes de las simulaciones.

Tipo de cálculo realizado	Magnitud de los resultados	Requisitos
Tensión máxima equivalente Von Mises	308,18 MPa	Min Tensile Strength 700 MPa Max Tensile Strength 1040 MPa
Deformación total máxima	15,7 mm	No aplica
Deformación elástica	$4,21 \times 10^{-5}$	No aplica
Vida a fatiga	$10^5$ ciclos	$10^4$ ciclos
Daño	Ninguno	No debe haber fisuras ni roturas
Factor de seguridad	15	2

Tabla 9 – Resultados del ensayo fuerzas horizontales

Analizando los resultados obtenidos en las simulaciones, observamos que la tensión máxima de von mises que sufre el cuadro sigue siendo mucho menor que el límite elástico del material que estamos considerando.

El resultado de la deformación máxima a primeras parece crítico por su magnitud. Pero no es un resultado invalido ya que esa deformación máxima tiene lugar en la horquilla, concretamente en el punto de aplicación de las cargas, más concretamente en la dirección de la carga de mayor valor  $F_2$ . El resultado no es de extrañar debido a la libertad en esa dirección que tiene la horquilla, al que solo se opone su contacto con el cuadro en la unión de ambos.

El punto más crítico a tener en cuenta en este tipo de ensayo se ha comprobado gracias al estado tensional y a la deformación elástica, que es en la zona de contacto entre la horquilla y el cuadro. Una posible solución sería aumentar la zona de contacto entre la unión y el cuadro para así disponer de mayor momento con el que oponerse al desplazamiento.

La fatiga en este ensayo al igual que en el anterior no supondría ningún problema. Vuelven las propiedades de vida a fatiga material a demostrar que para bajos niveles de tensiones la aplicación de cargas cíclicas no afectarían a este diseño del cuadro.

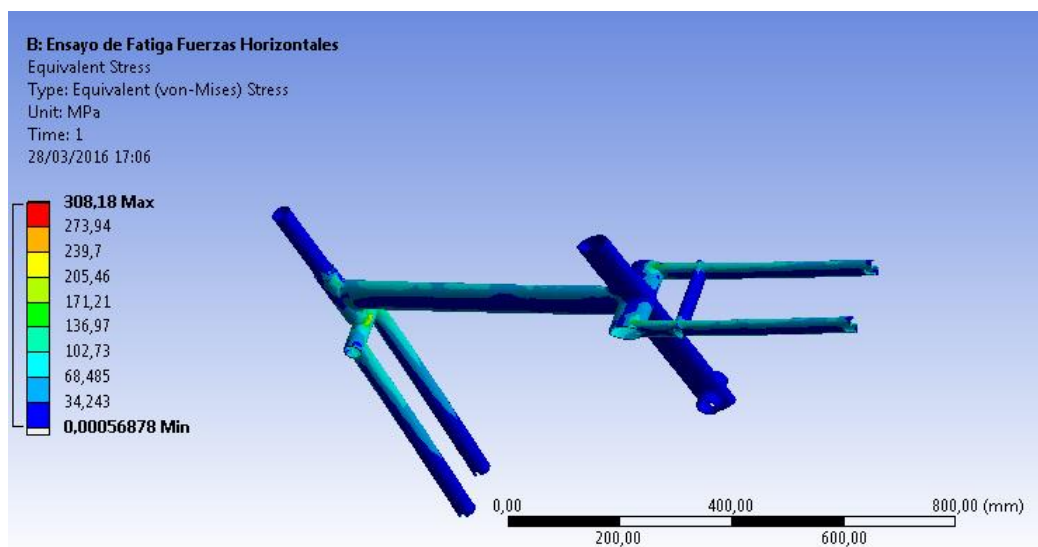


Ilustración 37 - Tensión de Von Mises. Ensayo fuerzas horizontales

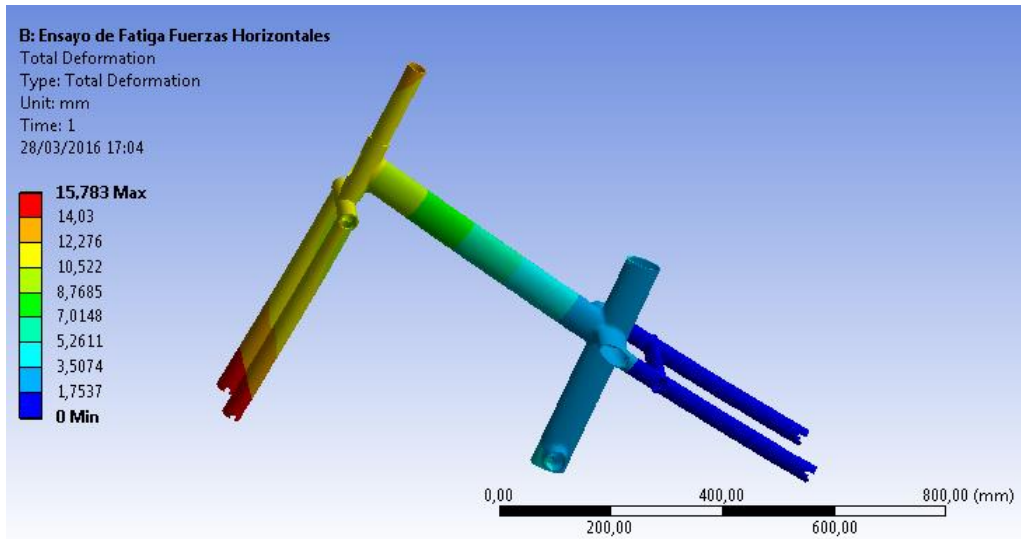


Ilustración 38 - Deformación total. Ensayo fuerzas horizontales

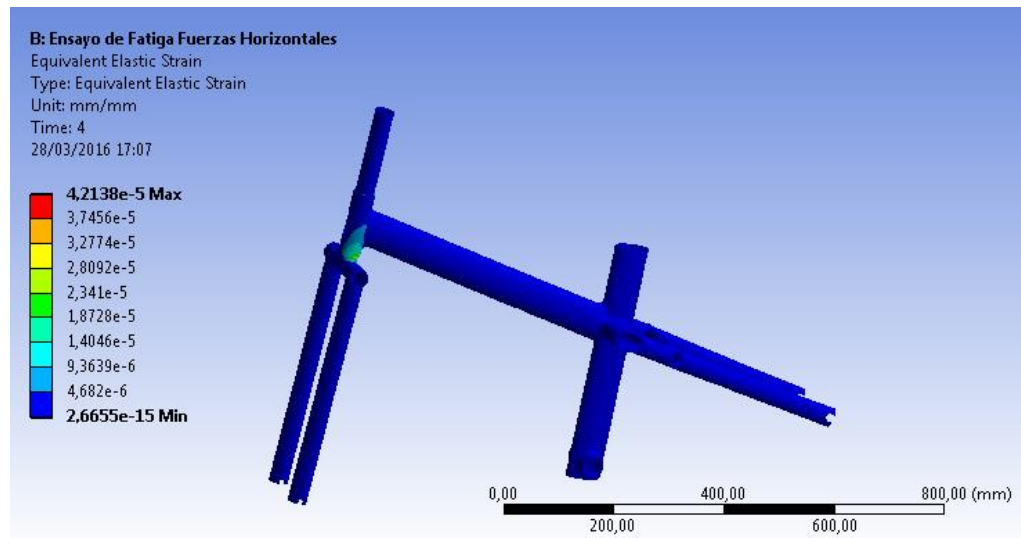


Ilustración 39 - Deformación elástica. Ensayo fuerzas horizontales

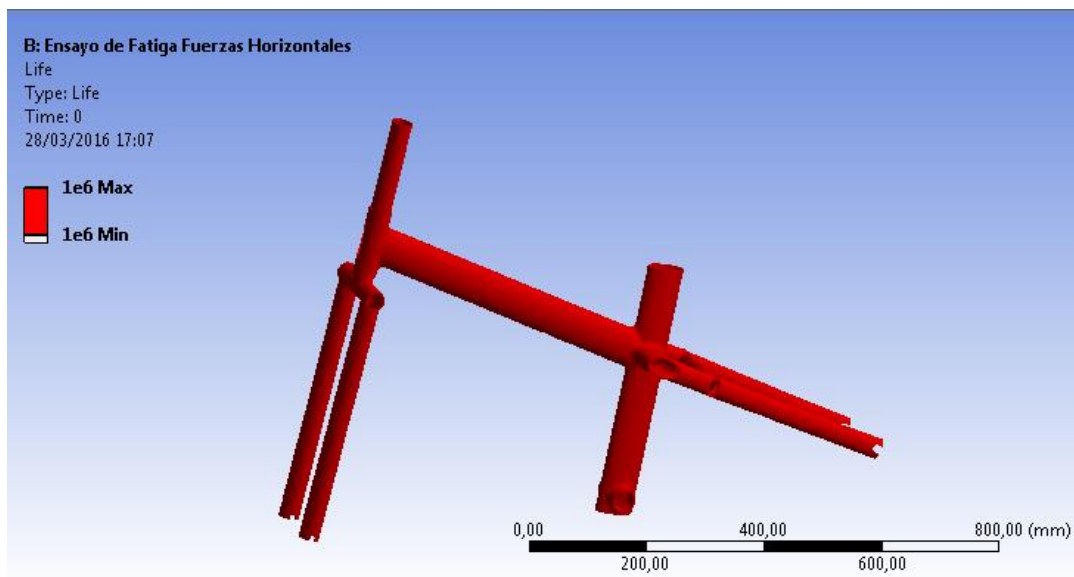


Ilustración 40 - Vida a fatiga. Ensayo fuerzas horizontales



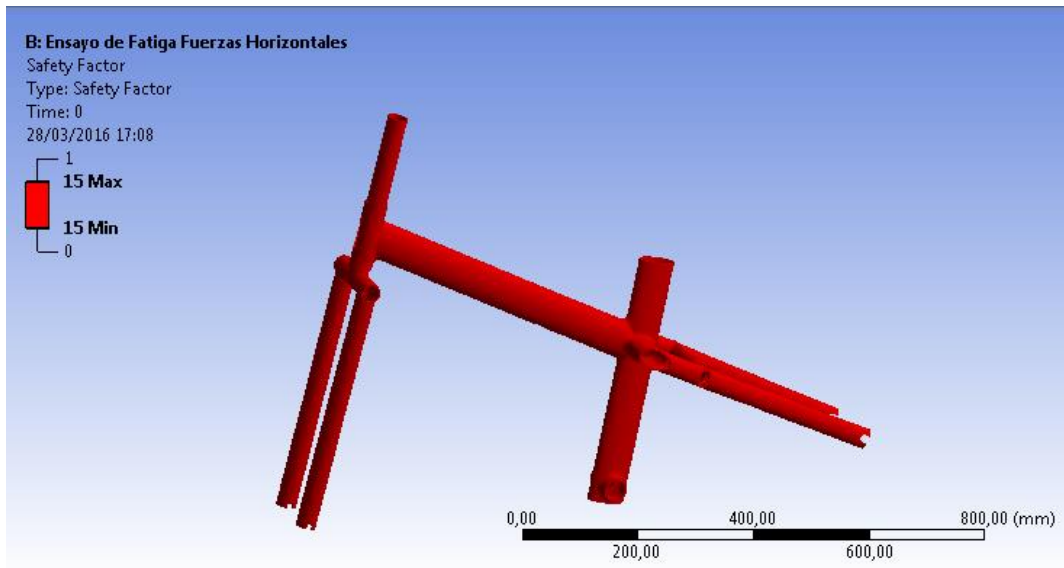
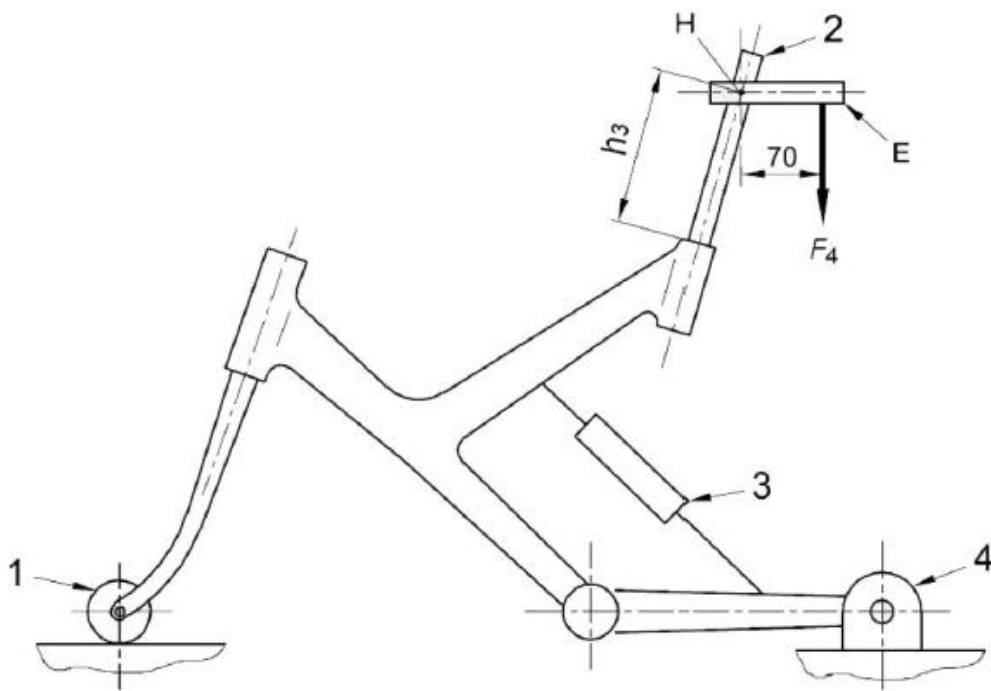


Ilustración 41 - Factor de seguridad. Ensayo fuerzas horizontales

## 7.5 Ensayo con una fuerza vertical

En este ensayo se instala el cuadro en su posición normal, fijándolo a las punteras traseras, de tal forma que no esté limitado en su rotación (dejar ese grado de libertad tanto en el eje delantero como trasero). El rodillo del eje delantero no permite el desplazamiento vertical pero si el horizontal y el giro, permitiendo así al cuadro flexionar en el sentido longitudinal bajo el efecto de las fuerzas aplicadas.

Acerca de la aplicación de la fuerza sobre la tija de la bici, en nuestro caso se ha decidido no introducir un elemento más en el conjunto pero aplicar la fuerza en la zona de contacto donde iría la tija pero desde el punto indicado por el ensayo, es decir, una fuerza desplazada que es un método equivalente y valido. Importante las dimensiones  $h_3$  y la longitud horizontal a la que se aplican la fuerza  $F_4$ , la cual actúa en dirección vertical.



### Leyenda

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

Ilustración 42 – Cuadro. Ensayo de fatiga por fuerza vertical

Fuerza vertical ( $F_4$ )	1200 N
Longitud de la tija ( $h_3$ )	250 mm
Longitud horizontal a la posición equivalente del sillín	70 mm

Tabla 10 – Datos ensayo fuerza vertical

Los criterios de validación o requisitos de seguridad del ensayo de fuerza vertical son los siguientes:

- No debe haber fisuras ni roturas visibles en ninguna parte del cuadro.
- Para cuadros de material compuesto, los desplazamientos (valor de la amplitud) en los puntos donde se aplican las fuerzas de ensayo no deben aumentar en más de un 20% de los valores iniciales.
- La vida a fatiga superará los  $10^4$  ciclos de ensayo.

Los resultados han sido favorables al diseño realizado y se recogen en la siguiente tabla. Posteriormente se muestran las imágenes de las simulaciones.

Tipo de cálculo realizado	Magnitud de los resultados	Requisitos
Tensión máxima equivalente Von Mises	102,43 MPa	Min Tensile Strength 700 MPa Max Tensile Strength 1040 MPa
Deformación total máxima	0,68 mm	No aplica
Deformación elástica	$5 \times 10^{-4}$	No aplica
Vida a fatiga	$10^5$ ciclos	$10^4$ ciclos
Daño	Ninguno	No debe haber fisuras ni roturas
Factor de seguridad	2,19	2

Tabla 11 – Resultados del ensayo fuerza vertical

En los resultados obtenidos en este ensayo podemos apreciar un par de características. Los puntos de mayor tensión equivalente y de deformación elástica son los mismos aunque sus valores son de pequeña magnitud, por lo que el diseño es válido. Aunque gracias a estas simulaciones que conocemos los puntos críticos en futuras modificaciones de diseño o en el proceso de fabricación se tendrán en cuenta para evitar el posible fallo que con casi toda probabilidad ocurrirá en alguno de estos.

En cambio la deformación máxima se da en otro punto, concretamente en la zona inferior del cuadro, aunque analizando el valor de su magnitud comprobamos que está dentro del rango de validación, por lo que no supondría ningún problema.

En este último ensayo hemos tenido que analizar los resultados a fatiga. El diseño cumple con la vida a fatiga de  $10^5$  ciclos que hemos considerado como criterio de validación. Pero en este caso el factor de seguridad que el programa nos devuelve no es el máximo posible, sino que los puntos críticos de tensión máxima tienen un coeficiente de seguridad menor.

Reiteramos que cumple sobradamente las condiciones de la normativa ya que hemos impuesto un orden de magnitud mayor a los ciclos que de soportar, aunque si habría que tener estos puntos en cuenta. Si pasásemos a la fabricación del cuadro una posible solución sería aumentar el número de capas de carbono en estas zonas, aportándoles una resistencia mayor que al resto de zonas del cuadro ya que estas serán las que soportaran mayores tensiones y al enfrentarse a la fatiga puede ser el comienzo del fallo.

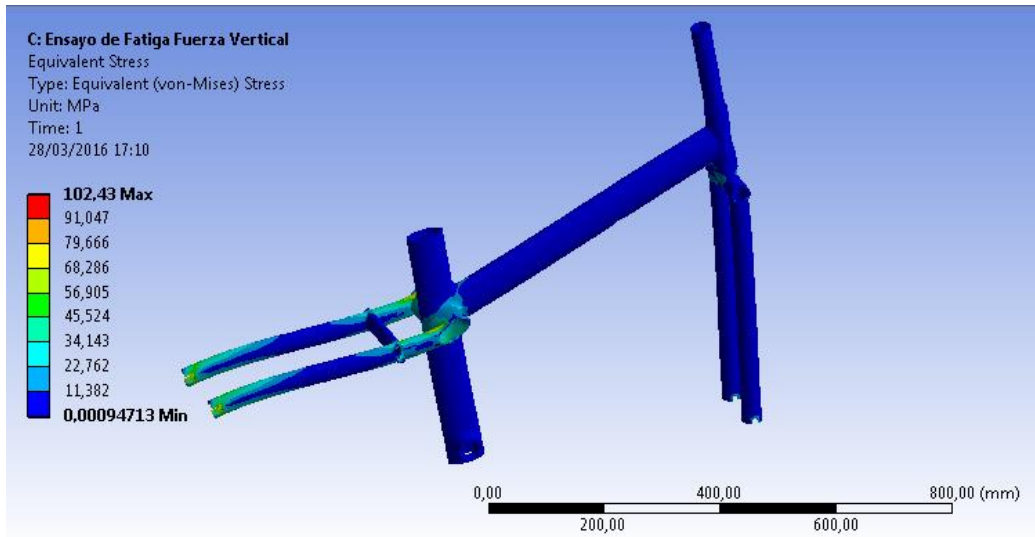


Ilustración 43 - Tensión de Von Mises. Ensayo fuerza vertical

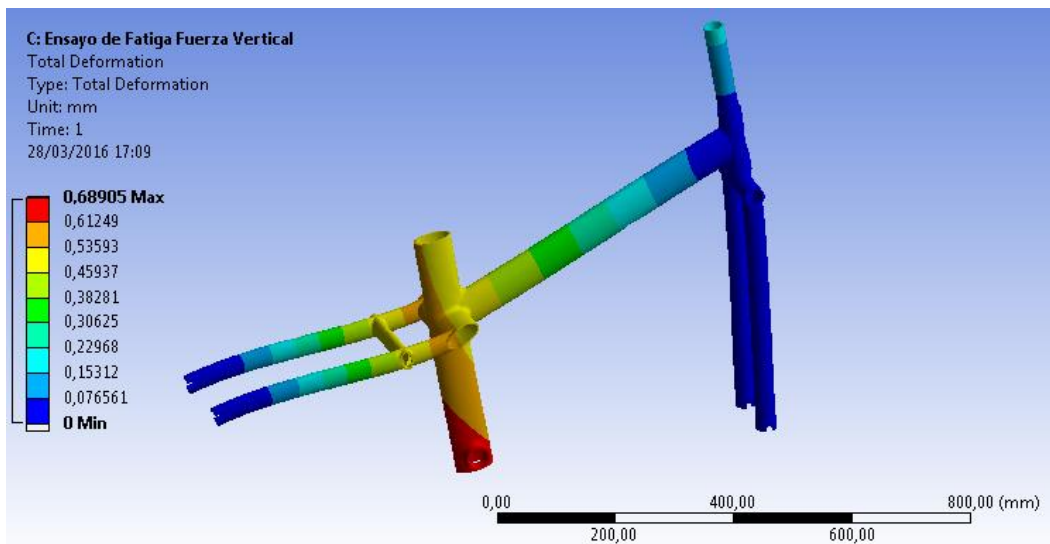


Ilustración 44 - Deformación total. Ensayo fuerza vertical

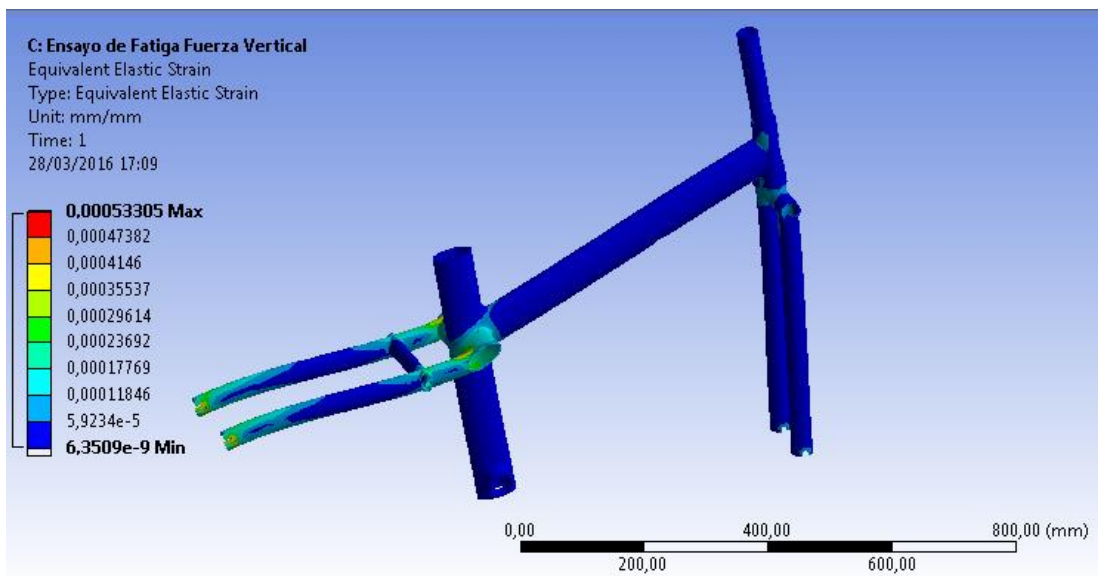


Ilustración 45 - Deformación elástica. Ensayo fuerza vertical

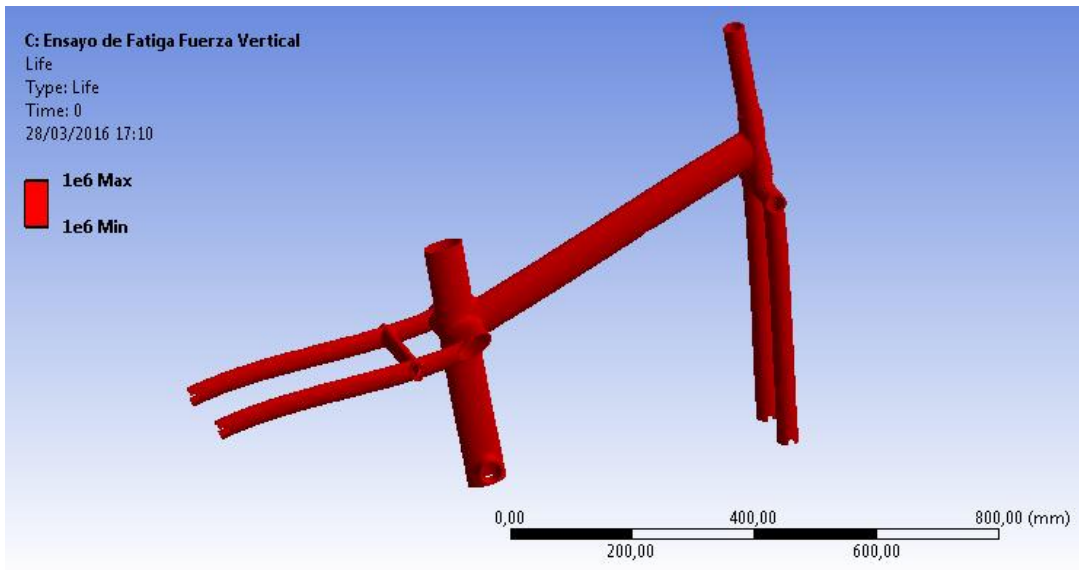


Ilustración 46 -Vida a fatiga. Ensayo fuerza vertical

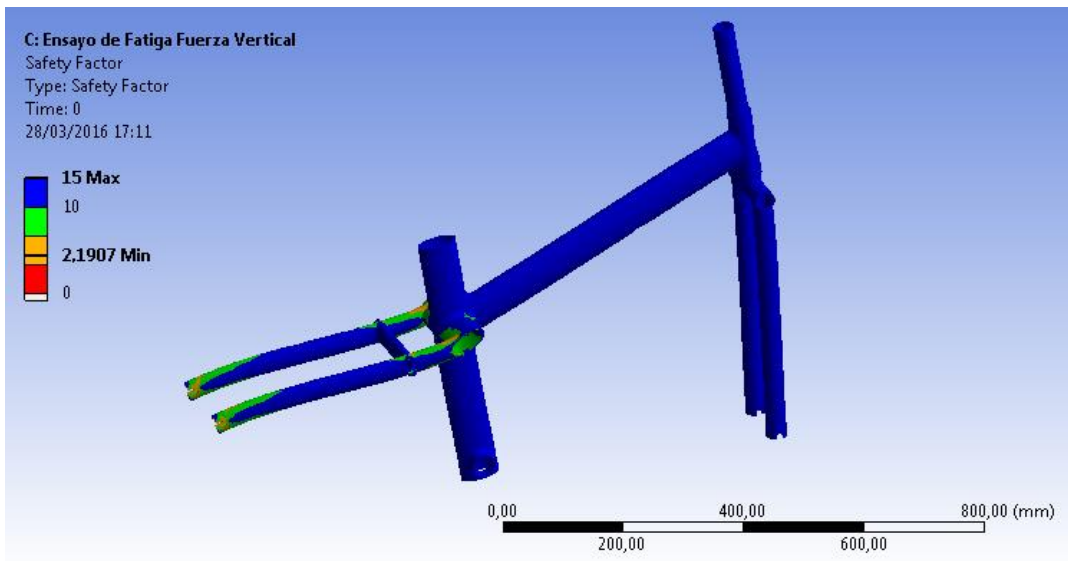


Ilustración 47 - Factor de seguridad. Ensayo fuerza vertical

# 8 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

---

Ante el estudio mostrado en el capítulo anterior se pueden llegar a las siguientes conclusiones, acerca de las ventajas y limitaciones del diseño analizado:

- Ensayo con Fuerzas de Pedaleo – Comportamiento excepcional, tanto en vida a fatiga, en estado tensional, en desplazamientos y en deformación.
- Ensayo con Fuerzas Horizontales – El comportamiento del cuadro en este ensayo sería considerado como válido o aceptable. Pero habría que mencionar que el cuadro sufre en la zona no considerada dentro del diseño, es decir en la horquilla. El desplazamiento del punto de aplicación es alto, lo cual supone un punto crítico al cual enfrentarse. La posible modificación de mejora de esta limitación sería rediseñar la zona de unión entre la horquilla con el cuadro, aumentando su superficie de contacto para poder hacer frente a las fuerzas del ensayo.
- Ensayo con una Fuerza Vertical – El comportamiento del cuadro supera todos los requisitos de diseño, superando incluso al ensayo de las fuerzas de pedaleo en el margen de varias magnitudes como la tensión máxima y la deformación máxima. Respecto a la vida a fatiga, se observa que supera ampliamente los requisitos, pero que está limitado al tener el menor factor de seguridad de los tres casos de carga. Esto es debido a la alta tensión que están sometidos los puntos críticos de este ensayo. Por tanto, se concluye que en caso de fallo debido a fuerza vertical, el fallo o daño se produciría en esos puntos.
- Los cálculos han demostrado que el diseño del cuadro con el espesor final de 3 mm soporta el análisis de vida a fatiga. Validando teóricamente el diseño no convencional considerado en este proyecto.
- Analizando los resultados de los estados tensionales de los distintos casos de carga se han detectado los puntos más críticos del diseño y también zonas excesivamente sobredimensionadas. Por tanto, gracias a la versatilidad del diseño de componentes en CFRP porque se pueden posicionar más o menos plies en distintas zonas. Se podría modificar la hipótesis inicial de espesor único para todo el cuadro. Aumentando el espesor en los puntos críticos detectados y disminuyéndolo en las zonas de menor esfuerzo, optimizando así el diseño.

Tras la realización de este proyecto, completando su alcance inicial se proponen los siguientes puntos para desarrollos futuros:

- Optimización de los espesores de las distintas partes del cuadro de manera individual.
- Proceso de fabricación: Complejidad de extracción de mandriles macho tras curado en autoclave a alta temperatura y alta presión (180° C y 7 bares). Ciclo establecido según normativa para el curado del material considerado en este estudio.
- Seguir el proceso iterativo de diseño, calculo y fabricación optimizando los modelos.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] F.París, J.Cañas, J.C.Marín y A.Barroso, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos.
- [2] J.Justo, J.C.Marín, F.París y J.Cañas, «Estudio del efecto de la frecuencia en laminados de material compuestos sometidos a cargas de fatiga uniaxiales».
- [3] A. P. Vassilopoulos y T. Keller, Fatigue of fiber-reinforced composites.
- [4] A. P. Vassilopoulos, Fatigue life prediction of composites and composite structures.
- [5] J. C. Sánchez y C. V. Martín, «Análisis micromecánico del crecimiento de grietas pequeñas por fatiga basado en dos condiciones umbrales: efecto de la tensión media».
- [6] Proyecto Fin de Carrera. ETSI-Universidad de Sevilla «Desarrollo y Puesta a punto de Ensayos de Tenacidad a Fractura Interlaminar (G1c) en materiales compuestos y adhesivos a temperaturas distintas del ambiente» (P. Cañizares y R. Ocaña).
- [7] Proyecto Fin de Carrera. ETSI-Universidad de Sevilla «Análisis micromecánico del crecimiento de grietas pequeñas por fatiga basado en dos condiciones umbrales: efecto de la tensión media» (J. Chaves y C. Vallellano).
- [8] Proyecto Fin de Carrera. ETSI-Universidad de Sevilla «Caracterización del comportamiento a fatiga de componentes con entallas microestructuralmente pequeñas» (M. R. Mariscal y C. Vallellano).
- [9] Airbus, *IPS 05- 01-006-03 Individual Product Specification – Hexcel Composites Hexply M21/40%/46280-6K*.

# ANEXOS

---

UNE- EN ISO 4210 - Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 6: Métodos de ensayo del cuadro y la horquilla.

UNE- EN ISO 4210 - Ciclos – Requisitos de seguridad para bicicletas – Parte 2: Requisitos para bicicletas de paseo, para adultos jóvenes, de montaña y de carreras. (Pág. 19- 21: Requisitos de Cuadro)