



Trabajo Fin de Máster

Modelado y fabricación de una tija de bicicleta
fabricada en material compuesto

Modelling and manufacture of a bicycle seatpost
made of composite material

Autor/es

Eduardo Ibáñez Puértolas

Director/es

Jesús Cuartero Salafranca

Titulación del autor

Máster en Ingeniería Industrial

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2024

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.	MATERIALES:	8
2.1	Evolución de los materiales usados en el sector de la bicicleta.....	8
2.2	Materiales compuestos	10
2.3	Materiales utilizados.....	11
3.	DISEÑO Y SIMULACIÓN.....	14
3.1	Necesidades dimensionales y diseño.....	14
3.2	Requisitos legales y ensayos.....	17
3.2.1	Ensayo de seguridad.....	17
3.2.2	Ensayo de fatiga.....	18
3.2.3	Ensayo para la etapa 1 (Ensayo de fatiga).....	19
3.2.4	Ensayo para la etapa 2 (Ensayo de resistencia)	19
3.3	Simulación por software.....	20
3.3.1	Ensayo de seguridad (Fuerza vertical)	22
3.3.2	Ensayo de seguridad (Fuerza horizontal)	26
3.3.3	Ensayo de fatiga.....	27
3.3.4	Ensayo para la etapa 1 (Ensayo de fatiga).....	31
3.3.5	Ensayo para la etapa 2 (Ensayo de resistencia)	32
3.4	Optimización de la tija.....	34
4.	FABRICACIÓN	36
4.1	Fabricación del molde	36
4.2	Fabricación de la tija.....	38
5.	ENSAYOS DE VALIDACIÓN	40
5.1	Ensayo de seguridad	41
5.2	Ensayo de fatiga.....	43
5.3	Ensayo de la etapa 2.....	44
6.	CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS	47
7.	BIBLIOGRAFÍA	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico fuerza-desplazamiento de fibra trenzada (verde) vs fibra unidireccional (azul).....	12
Figura 2. Comportamiento de la fibra a ensayos de tracción/compresión.....	13
Figura 3. Despiece de la zona tija-sillín	14
Figura 4. Adaptador de tija de bicicleta.....	15
Figura 5. Boceto inicial de diseño de la tija.	16
Figura 6. Ensayo de seguridad.....	18
Figura 7. Ensayo de fatiga	18
Figura 8. Ensayo para la etapa 1.....	19
Figura 9. Ensayo para la etapa 2.....	19
Figura 10. Diseño del conjunto en Abaqus CAE.....	20
Figura 11. Caso de carga - Ensayo de seguridad Abaqus (Fuerza vertical).....	22
Figura 12. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de seguridad (Fuerza vertical)	23
Figura 13. Zona crítica de tensiones para ensayo de seguridad (Fuerza vertical).....	23
Figura 14. Distribución de tensiones resultantes [MPa] en el enganche sillín – Ensayo seguridad (Fuerza Vertical).....	24
Figura 15. Corte de enganche sillín – Ensayo seguridad (Fuerza Vertical).....	25
Figura 16. Corte de la varilla y de la abrazadera – Ensayo seguridad (Fuerza Vertical).....	25
Figura 17. Caso de carga - Ensayo de seguridad Abaqus (Fuerza horizontal)	26
Figura 18. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de seguridad (Fuerza horizontal).....	26
Figura 19. Caso de carga - Ensayo de fatiga Abaqus	27
Figura 20. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de fatiga (estático)	28
Figura 21. Corte de la varilla – Ensayo de fatiga	29
Figura 22. Corte del enganche – Ensayo de fatiga	29
Figura 23. Corte de la abrazadera – Ensayo de fatiga	30
Figura 24. Caso de carga - Ensayo para la etapa 1 Abaqus	31
Figura 25. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de la etapa 1 (estático)	31
Figura 26. Caso de carga - Ensayo para la etapa 2 Abaqus	32
Figura 27. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de la etapa 2	33

Figura 28. Resultados del criterio de Tsai-Wu para tija con 2 capas de fibra.....	35
Figura 29. Molde de fabricación de la tija.....	36
Figura 30. Fabricación de un molde con impresión 3D	37
Figura 31. Refuerzo de resina epoxi en el molde	37
Figura 32. Impregnación de las fibras de carbono con resina Greenpoxy33 + SD4770	38
Figura 33. Cilindro neumático y fibra ya introducidas en el molde.....	39
Figura 34. Molde cerrado con gatos de fijación	39
Figura 35. Ensayo de seguridad vertical para tija de fibra de carbono (izda) y aluminio (dcha).....	41
Figura 36. Gráfica fuerza-desplazamiento ensayo de seguridad.	41
Figura 37. Ensayo de fatiga para tija de aluminio	43
Figura 38. Gráfica fuerza-desplazamiento ensayo de fatiga.....	44
Figura 39. Ensayo de la etapa 2 para tija de fibra de carbono.....	45
Figura 40. Gráfica fuerza-desplazamiento ensayo de la etapa 2.	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales utilizados en la historia del sector de las bicicletas	9
Tabla 2. Propiedades de la fibra de carbono utilizada.	12
Tabla 3. Límite elástico de las piezas del conjunto	22
Tabla 4. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo seguridad (Fuerza vertical).....	24
Tabla 5. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo seguridad (Fuerza horizontal).....	27
Tabla 6. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo estático de fatiga.	28
Tabla 7. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo estático de etapa 1.	32
Tabla 8. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo de etapa 2.....	33
Tabla 9. Resultados de Coeficiente de seguridad en criterio de fallo de Tsai-Wu para 2,3, y 4 capas de fibra	34

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda el proceso productivo y de homologación de una tija de fibra de carbono para bicicleta de montaña. La fibra de carbono es un material con una gran relación resistencia-peso, lo que le ha convertido a ser el material más utilizado en el ciclismo de competición.

La finalidad del proyecto es validar la pieza fabricada en el taller de la Universidad de Zaragoza. Como paso previo se realizarán todos los ensayos de validación simulados en el software de análisis de elementos finitos Abaqus CAE 6.14-6. Una vez validados se estudiará la posibilidad de modificar la tija si no cumple con los ensayos simulados. Finalmente, se realizarán estos mismos ensayos en el taller para comprobar que la tija es válida y puede ser utilizada en la bicicleta.

2. MATERIALES:

2.1 Evolución de los materiales usados en el sector de la bicicleta.

Al igual que en otros sectores, el sector de las bicicletas ha sufrido un continuo cambio en todos sus aspectos. El sector de los materiales quizá ha sido uno en los que más se ha evolucionado desde sus inicios. Toda evolución ha ido siempre encaminada en mejorar tres características fundamentales; dureza, flexibilidad y resistencia [1].

Las primeras bicicletas datan de principios del siglo XIX, se fabricaban en una sola pieza y su principal material era la madera. Este material hacía que fuese un vehículo ligero y a su vez fácilmente moldeable por lo que no era complicada su fabricación. El problema de la madera se encontraba con el rápido desgaste que tenía debido al uso y a la humedad.

En esta misma época se fabricaron también las primeras bicicletas de bambú. Este material presenta características similares a la madera. A día de hoy existen fabricantes que lo siguen utilizando para la fabricación de bicicletas, aunque aplicando unos tratamientos avanzados para mitigar el desgaste.

Con los avances de la industria y el mayor conocimiento de los metales, se fabricaron bicicletas en acero. Estas bicicletas ya eran más similares a las que actualmente conocemos ya que se componían de varias piezas, cada una con sus moldes correspondientes, lo que originó a una mayor capacidad de producción y un mayor alcance de compradores. El acero aportaba mayor resistencia y durabilidad que la madera.

El siguiente material que se usó en esta industria fue una aleación de acero con cromo y molibdeno, denominada cromolio. Este material ofrecía más resistencia y ligereza que el acero tradicional, pero sus complejas necesidades para su soldadura lo relevaron a ser un material en desuso. Actualmente, se siguen fabricando piezas muy específicas en cromolio debido a su gran resistencia.

El material que llegó y parece que para quedarse durante mucho tiempo es el aluminio. Es un material ligero y barato, lo que lo hace cómodo y accesible a gran parte de la población. Además, destaca su resistencia a la corrosión, lo que otorga una mayor durabilidad a la bicicleta. Actualmente, la mayoría de bicicletas están hechas de aluminio.

Con el avance de la industria aeronáutica, se aplicaron materiales como el titanio a otras industrias como la de las bicicletas. El titanio aporta una muy alta resistencia y muy bajo peso. El problema para su fabricación reside en su elevado coste de materia prima. Esto

hace que se fabriquen pocas unidades de piezas muy específicas para bicicletas de alto coste.

Finalmente, y objeto de este trabajo, aparecen los materiales compuestos como la fibra de carbono. Estos materiales revolucionaron todas las industrias desde su aparición. Aportan mejores propiedades que los materiales comúnmente usados a un precio no demasiado elevado.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se encuentran todos los materiales que han sido utilizados a lo largo de la historia. En ella se comparan todos ellos analizando la dureza con la escala Rockwell, la densidad que dará información sobre el peso, el módulo de Young para analizar la flexibilidad de cada material, la resistencia a la tracción y finalmente el precio. Todas las características tienen un rango de valores ya que cada tipo de material puede haber una gran cantidad de variedades.

	Dureza Rockwell	Densidad (kg/m²)	Módulo de Young (GPa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Precio (€/kg)
Madera	B20-B60	500-900	10-20	30-150	0.4-2
Bambú	B30-B70	400-800	10-30	100-300	0.8-4
Acero	C15-C70	7850	200-210	300-2000	0.4-1.2
Cromolio	C20-C45	7800	190-210	500-1100	1.6-4
Aluminio	B50-B70	2700	70	100-700	1.3-2.6
Titanio	C36-C42	4500	105-120	800-1000	15-21
Fibra de carbono	B40-B80	1500-2000	100-200	1500-3000	8.5-20

Tabla 1. Materiales utilizados en la historia del sector de las bicicletas

En líneas generales, se puede decir que la fibra de carbono tiene las mejores propiedades en gran parte de las características analizadas. Por lo que podría ser que el sector tendiera a cambiar materiales históricamente más usados por materiales compuestos como la fibra de carbono.

2.2 Materiales compuestos

La fibra de carbono puede ser el material compuesto más conocido, pero existen gran variedad de tipos de materiales y de combinaciones de ellos. [2]

Los materiales compuestos son materiales formados por la combinación de dos o más componentes con propiedades físicas y químicas distintas. Estos componentes se combinan para crear un material con propiedades superiores a las de los materiales individuales. En este trabajo, se va a analizar los materiales compuestos que están formados de una fibra y una resina.

Dentro del mundo de las fibras, existen varios tipos:

Las fibras cerámicas como las de carburo de silicio o alumina se aplican en casos en los que la temperatura de trabajo es muy alta (soportan hasta 1200 grados centígrados) como podría ser en propulsores de aviones y también se aplican en sectores en los que son necesarios elevados esfuerzos mecánicos como podría ser el sector de la construcción.

Las fibras metálicas debido a su coste y su densidad han ido dando paso a la que posteriormente se comentará fibra de vidrio, aunque todavía tienen gran relevancia en sectores tradicionales como el automotriz. Existen gran variedad de metales y posibles combinaciones entre ellos, todo ello conlleva a que sus propiedades son muy distintas entre sí y las aplicaciones son muy específicas en función del sector en el que se utilizan.

Las fibras orgánicas como la fibra de aramida y el polietileno son materiales de alta resistencia utilizados en diversos sectores industriales. La fibra de aramida, conocida por su alta resistencia al calor y a la abrasión, se usa en la fabricación de chalecos antibalas, equipos de protección personal, y en componentes aeroespaciales debido a su capacidad para mantener la integridad bajo condiciones extremas. Por otro lado, el polietileno, es muy resistente al desgaste. Se utiliza en la fabricación de equipo médico, protecciones balísticas, y en la industria de transporte para componentes como correas transportadoras debido a su durabilidad y resistencia química.

Las fibras inorgánicas son quizá las más conocidas. La fibra de boro se utiliza en aplicaciones aeroespaciales y militares debido a su alta rigidez y capacidad para soportar altas temperaturas. La fibra de carbono es conocida por su excelente relación resistencia- peso y se emplea en la fabricación de componentes aeroespaciales, deportivos y automotrices. La fibra de vidrio, económica y versátil, se utiliza en la construcción, la

industria naval y en productos de consumo como tablas de surf y recipientes de almacenamiento. Estos materiales son clave en sectores que requieren alta performance y durabilidad.

Como tipos de resinas principales existen las epoxi y las de poliéster. Las epoxi son conocidas por su alta resistencia mecánica y química, siendo ideales para aplicaciones industriales, aeroespaciales y de construcción donde se requiere una unión robusta y permanente.

Como tipos de adhesivos principales existen los adhesivos epoxi y los de poliuretano. Los adhesivos epoxi son conocidos por su alta resistencia mecánica y química, siendo ideales para aplicaciones industriales, aeroespaciales y de construcción donde se requiere una unión robusta y permanente. Los adhesivos de poliuretano, por su flexibilidad y resistencia al impacto, se utilizan en la industria automotriz, en la fabricación de calzado y en la construcción para unir diversos materiales como madera, metal y plástico. Ambos adhesivos son esenciales en sectores que demandan uniones fuertes y duraderas.

2.3 Materiales utilizados

Para la fabricación, se utilizó únicamente fibra de carbono y resina epoxi. Se escogerá una fibra de carbono trenzada por el conocimiento de la misma en otros proyectos anteriores del departamento.

Los modelos de materiales que representan el comportamiento de los materiales compuestos trenzados se obtuvieron a partir de los resultados de pruebas llevadas a cabo por la Universidad de Lovaina [3] y de los resultados complementarios realizados en 2023 en la Universidad de Zaragoza.

Se ha decidido usar fibra de carbono trenzada en detrimento de la fibra de carbono unidireccional debido a que se comprobó en una pieza similar a una tija de bicicleta, que la fibra trenzada podía soportar esfuerzos parecidos y evitar un fallo catastrófico en los ensayos. A continuación, se muestra una curva fuerza-desplazamiento en un ensayo de índole parecida a los que se ejecutan con la tija.

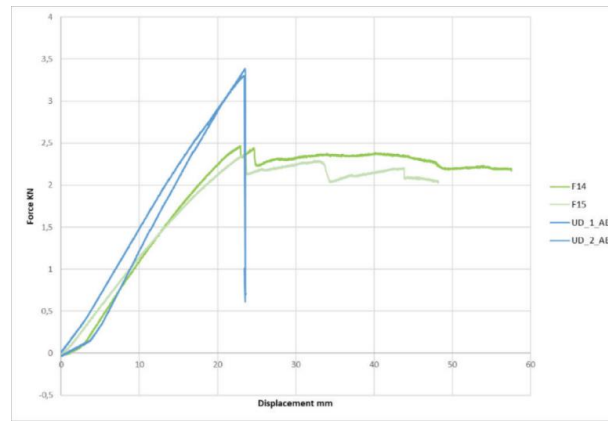


Figura 1. Gráfico fuerza-desplazamiento de fibra trenzada (verde) vs fibra unidireccional (azul)

La fibra unidireccional (en azul) sufre una rotura catastrófica superados los 20 mm de desplazamiento, sin embargo, la fibra trenzada (braiding, en color verde), no llega a romper catastróficamente superados los 50 mm de desplazamiento.

Con todas estas evidencias, se decidió realizar la tija también de este material.

Las propiedades mecánicas y físicas de la fibra de carbono trenzada aplicada son las siguientes:

- Fibra de carbono trenzada (12K):
- Ángulo de trenzado: +/- 25°
- Resina: Greenpoxy33 + SD4770
- Volumen de fibra: 45%

Propiedades elásticas y fallo en 1er ply

Propiedad	Unidad	Valor	Propiedad	Valor
E ₁₁	MPa	76100	X	680
E ₂₂	MPa	18100	X'	540
G ₁₂	MPa	12700	Y	100
μ	-	0.18	Y'	80
Densidad	kg/m ³	1560	S ₁₂	125

Tabla 2. Propiedades de la fibra de carbono utilizada.

Siendo

- X: Resistencia a la tracción eje 1
- X': Resistencia a compresión eje 1
- Y: Resistencia a la tracción eje 2
- Y': Resistencia a compresión eje 2
- S₁₂: Resistencia de corte

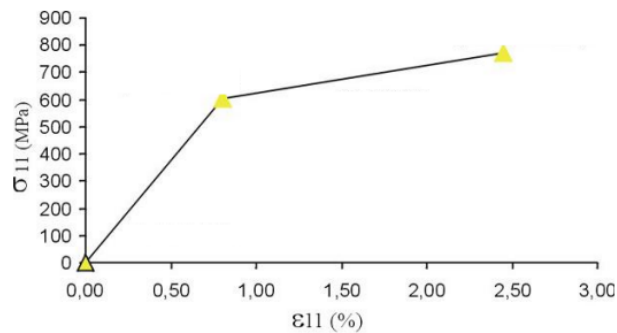


Figura 2. Comportamiento de la fibra a ensayos de tracción/compresión

Para evaluar el comportamiento mecánico de la fibra de carbono trenzada, se fabricaron piezas de carbono/epoxi que fueron sometidos a pruebas de tracción y compresión. Estas pruebas permitieron determinar los módulos elásticos y las resistencias tanto en la dirección longitudinal como en la transversal. Las pruebas fueron realizadas de acuerdo con la norma ASTM D 3039/D 3039M, que es el estándar internacionalmente reconocido para estos tipos de ensayos.

En la Figura 2, se muestra un primer punto que corresponde a la primera falla de la capa de la fibra de carbono trenzada, la cual ocurre a 680 MPa. Sin embargo, es importante considerar que el trenzado de la fibra de carbono aplicado incluye una orientación de carbono de 25°/30°. Debido a esta orientación, se observa una segunda sección en la curva de esfuerzo-deformación. Por lo tanto, la función esfuerzo-deformación en la dirección longitudinal se representa como un modelo de material de curva bilineal.

Analizando los resultados se ve que la fibra de carbono trenzada con la resina Greenpoxy33 + SD4770 proporciona una buena combinación de rigidez y resistencia. La desviación en los resultados de las pruebas es aceptable, con un 5% de desviación en términos de rigidez y un 10% en términos de resistencia, lo que indica una consistencia razonable en el comportamiento del material bajo las condiciones de prueba.

3. DISEÑO Y SIMULACIÓN

3.1 Necesidades dimensionales y diseño

La tija es una pieza intermedia que va alojada entre el cuadro y el sillín. Al ser una pieza más pequeña y más simple que con las que conecta, la imposición dimensional la marcan generalmente el cuadro y el sillín. En el caso de este proyecto, al tratarse de un rediseño y sustitución de una tija, será necesario cumplir imperantemente con estas dimensiones.



Figura 3. Despiece de la zona tija-sillín

Un mal diseño puede originar tanto holgura entre piezas lo que sería incómodo para el ciclista, como un sobredimensionado de las piezas que haría que no encajasen y no se podría montar el sillín.

En algunos modelos, de cara a evitar holguras, existen adaptadores como el de la figura 4, que estandarizan el acoplamiento de la tija y el cuadro. En el caso de este trabajo, no se va a colocar un adaptador.



Figura 4. Adaptador de tija de bicicleta

Para dimensionar la tija, se tienen que establecer tanto los diámetros externos como los internos. Los que respectan al exterior, serán los que tengan simultaneidad dimensional a las piezas en las que van a encajar, ya que ambos extremos de la tija actúan como “machos” de esas uniones. Los diámetros internos de la tija no tienen una necesidad dimensional, pese a esto, no le releva a una categoría inferior a los exteriores. Con los diámetros interiores se va a establecer el espesor de la tija, un espesor muy fino puede hacer que la tija carezca de la resistencia necesaria y se rompa; por el contrario; una pieza demasiado gruesa, se encarecería.

Por ello, es objeto de este trabajo encontrar un espesor adecuado, que aporte la rigidez suficiente y al menor precio posible.

Realizando las mediciones de los diámetros de las piezas de conexión, se tiene que la unión con la abrazadera del sillín tiene que ser de 23 milímetros y la unión con el cuadro tiene que ser de 27,2 milímetros.

Con estas pautas ya definidas, se puede diseñar la pieza. En este caso se optó por un diseño sencillo y sin alardes. Esta pieza no es modelo que se vaya a comercializar por lo que no es necesario que destaque en aspectos estéticos ni en variedad de formas sobre el resto de tijas existentes. La característica fundamental debe ser la funcionalidad y el menor peso posible.

También hay que destacar que la pieza se va a fabricar en el taller de la Universidad de Zaragoza, el cual cuenta con instrumentos y maquinaria estándar que permite la fabricación de la tija, pero se aleja mucho de las fábricas industriales que cuentan con tecnologías superiores que les permiten realizar diseños más complejos.

El hecho de diseñar una tija sencilla también va ligado de cara a mitigar errores en el propio proceso de fabricación y en el caso de haberlos, detectarlos con más facilidad.

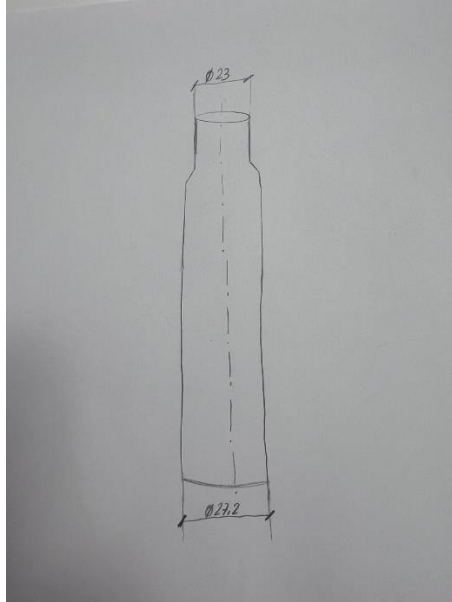


Figura 5. Boceto inicial de diseño de la tija.

Al haber dos diámetros diferentes, se ha hecho un diseño con dos zonas diferenciadas. La zona inferior, de mayor diámetro, también va a ser la más larga. Esto se debe a que la regulación de altura del sillín se hace con la abrazadera de la tija con la propia tija, por lo que, la altura se puede regular un total de 15 centímetros.

En el otro extremo se encuentra la zona de unión a la abrazadera del sillín, como esta zona no va a ser regulable, se opta por hacerla más corta. Entre ambas se encuentra una zona de transición.

3.2 Requisitos legales y ensayos

El Real Decreto 2406/1985, del 20 de noviembre, declara de obligado cumplimiento las especificaciones técnicas de las bicicletas y sus partes y piezas y su homologación por el Ministerio de Industria y Energía. [4]

Por ello, todas las piezas fabricadas tanto de manera casera como de manera industrial deben cumplir una serie de requisitos para poder circular por la vía pública.

Dentro del Real Decreto, se cita que para lo relativo a requisitos de seguridad, hay que recurrir a la norma UNE-EN ISO 4210-9, estandarizada para toda la comunidad internacional.

La parte 9 de esta norma titulada (Métodos de ensayo para los sillines y las tijas), establece los ensayos para necesarios para la validación de la tija.

La validación de la tija implica la no rotura de la misma en el conjunto de ensayos. Las piezas auxiliares como el sillín y las varillas son piezas ya comercializadas por lo que habrán superado sus propios ensayos de validación. Una fractura o deformación de estos no implicaría el fallo de la tija en el ensayo, pero sí que sería necesario sustituir ese componente para realizar ese ensayo en condiciones idóneas. De hecho, es frecuente que las varillas ubicadas debajo del sillín se rompan con el uso de la bicicleta. Pese a esto, se va a intentar que todas las piezas puedan completar todos los ensayos sin tener que ser sustituidas.

3.2.1 Ensayo de seguridad

Para realizar este ensayo, hay que fijar la tija correctamente al cuadro de la bici e introducirla a la profundidad mínima de inserción que establece la norma (100 mm). Con el sillín ya montado, se puede empezar la prueba. En primer lugar y durante 1 minuto, se aplica una fuerza vertical F_1 de 650 N a 25 mm del principio del sillín. Posteriormente se retira esa fuerza y se aplica una fuerza horizontal F_2 de 250 N durante otro minuto en un lateral a 25 mm del principio del sillín.

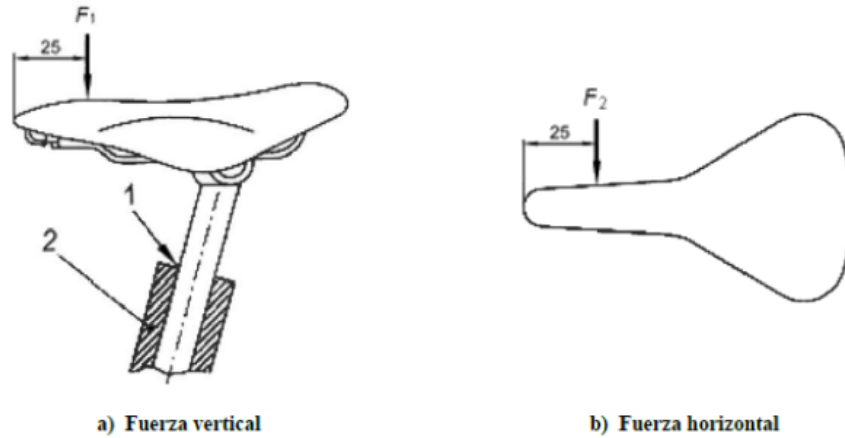


Figura 6. Ensayo de seguridad

3.2.2 Ensayo de fatiga

Para este ensayo, es necesario anclar la tija en un ángulo de 73° . Con la tija ya colocada, hay que colocar la prensa de ensayo en una posición intermedia entre el final del sillín y la abrazadera del sillín. Se aplica una fuerza de 1000 N durante 200.000 ciclos y la frecuencia de aplicación no debe superar los 4 Hz.

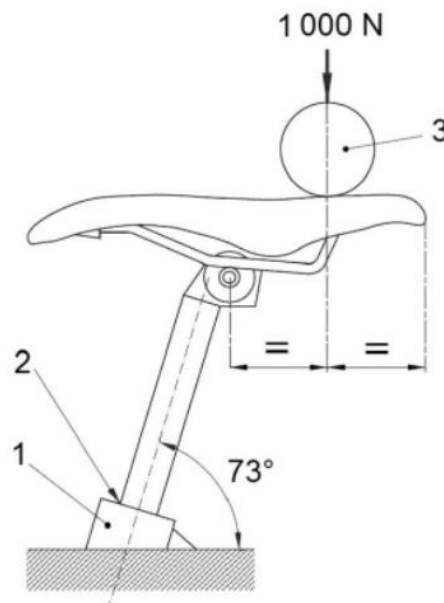


Figura 7. Ensayo de fatiga

3.2.3 Ensayo para la etapa 1 (Ensayo de fatiga)

En este caso también se va a anclar también a 73° sobre la horizontal. Sobre la abrazadera del sillín hay que fijar una barra a 10° sobre la horizontal. Sobre esta barra y a 70 milímetros de la abrazadera hay que aplicar una fuerza F_3 de 1200 N durante 100.000 ciclos.

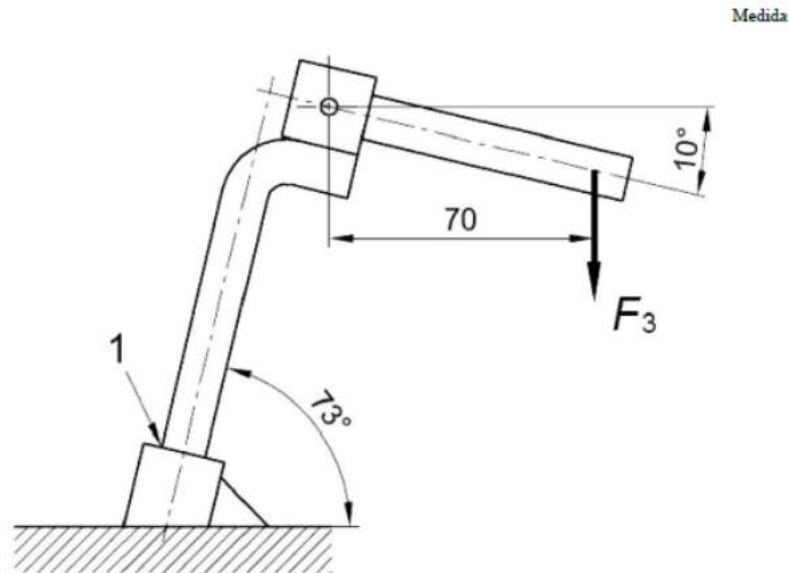


Figura 8. Ensayo para la etapa 1

3.2.4 Ensayo para la etapa 2 (Ensayo de resistencia)

Se coloca la tija a 73° sobre la horizontal con la abrazadera del sillín introducida. Se aplica una fuerza F_4 de 2000N durante 1 minuto

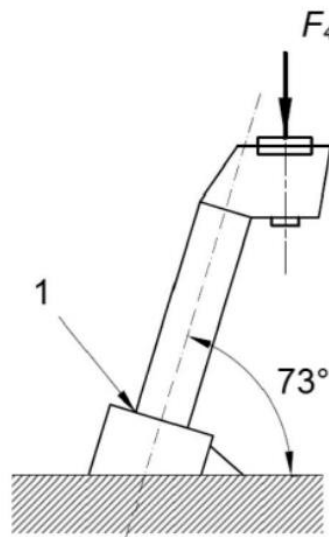


Figura 9. Ensayo para la etapa 2

En paralelo se van a realizar todos los ensayos posibles con la tija que actualmente monta la bicicleta, fabricada en aluminio. Y con ello comparar el comportamiento de una frente a otra.

3.3 Simulación por software

Para el diseño y simulación de la pieza se ha utilizado el software Abaqus 6.14-6. Este software permite diseñar y ensamblar el conjunto de piezas que se necesitan para validar los ensayos de la propia tija mediante análisis por elementos finitos.

Se han diseñado un total de siete piezas. La tija se inserta en la abrazadera sillín, esta tiene unas hendiduras en las que se alojan las varillas. En la parte superior de las varillas se encuentra la pieza de enganche. El enganche también tiene unas hendiduras complementarias a las de la abrazadera, lo que hace que las varillas queden encajadas. La unión abrazadera enganche se realiza mediante sistemas de tornillos/arandelas. La unión de las varillas y el sillín se realiza mediante un sistema macho-hembra con el cual las varillas quedan encajadas en una zona del sillín. Como complemento del inserto de la tija sobre la abrazadera se ha colocado un adhesivo para fortalecer ese ensamblaje.

El sillín está diseñado en polipropileno, la tija en fibra de carbono y el resto de componentes están diseñadas en acero.

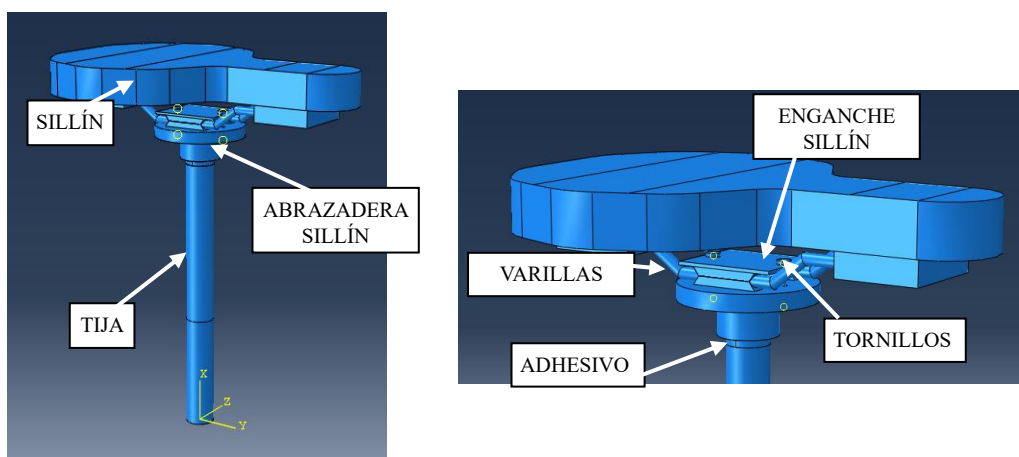


Figura 10. Diseño del conjunto en Abaqus CAE

Como se ha visto en el apartado anterior, la validación de la tija requiere el correcto comportamiento del conjunto requerido frente al ensayo. Para comprobar este requisito en el software, se va a optar por analizar el comportamiento según el criterio de fallo de Tsai-Wu [5].

El criterio de Tsai-Wu es un modelo utilizado en ingeniería para predecir el fallo de materiales compuestos, como la fibra de carbono. Combina esfuerzos normales y de cortadura para evaluar si el material falla ante las presiones ejercidas. La fórmula que se aplica es la siguiente:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1$$

Donde:

- σ_1 y σ_2 son las tensiones normales en las direcciones principales.
- σ_{12} es la tensión de cortadura en el plano principal
- $F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{12}, F_{12}$ son coeficientes relacionados a la resistencia a la tensión y compresión en direcciones principales y de cortadura.

Los coeficientes se definen como:

$$F_1 = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \quad F_2 = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \quad F_{11} = \frac{1}{XX'} \quad F_{22} = \frac{1}{YY'} \quad F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

Siendo X, X', Y, Y' y S los parámetros del material definidos previamente en las características de la fibra de carbono.

El modo de evaluar este criterio será mediante un coeficiente de seguridad (CS). Este coeficiente se calcula con la inversa del resultado de Tsai-Wu que se obtiene directamente en el software de cálculo (TSAIW).

Por lo que la validación de la tija requerirá el cumplir con coeficiente de seguridad mayor o igual a 2 y adicionalmente intentar no deformar el resto de las piezas ante cualquier ensayo, por lo que todas las piezas no deben superar en ningún punto el límite elástico del material que están fabricados.

Los materiales utilizados en el resto de piezas son utilizados comúnmente en el sector de las bicicletas convencionales no profesionales. Estos son el acero cromolí y el aluminio 6061.

	σ_y [MPa]	Piezas
Aluminio	270	Tija
Polipropileno (PE)	30	Sillín
Acero	450	Enganche sillín, abrazadera, varillas, tornillos
Adhesivo	30	Adhesivo

Tabla 3. Límite elástico de las piezas del conjunto

En la mayoría de ensayos de simulación, se han sustituido las fuerzas de contacto puntual por una presión equivalente en una zona pequeña de contacto. Esto se debe a que el ejercer la fuerza en un contacto puntual tenía como resultado unas magnitudes de tensión muy elevadas que no se correspondía con una situación realista del ensayo.

3.3.1 Ensayo de seguridad (Fuerza vertical)

El ensayo de seguridad se ha dividido en dos subensayos, en primer lugar, se va a ejercer la fuerza vertical y en el siguiente ensayo se ejercerá la fuerza horizontal, ya que la norma no dictamina que estas se tengan que ejercer de manera simultánea. Como condición de frontera, se ha establecido un encastre de 10 cm en la propia tija como indica la norma en la condición de inserción mínima.

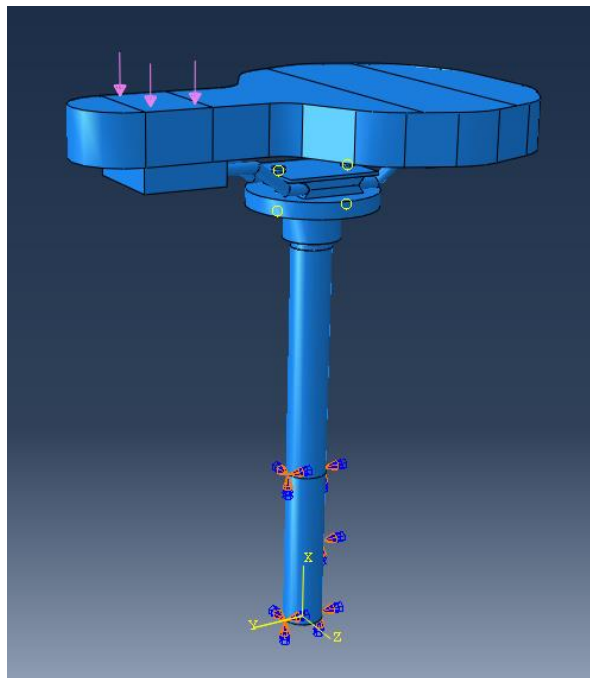


Figura 11. Caso de carga - Ensayo de seguridad Abaqus (Fuerza vertical)

Los resultados de este ensayo con la tija de fibra de carbono son los siguientes:

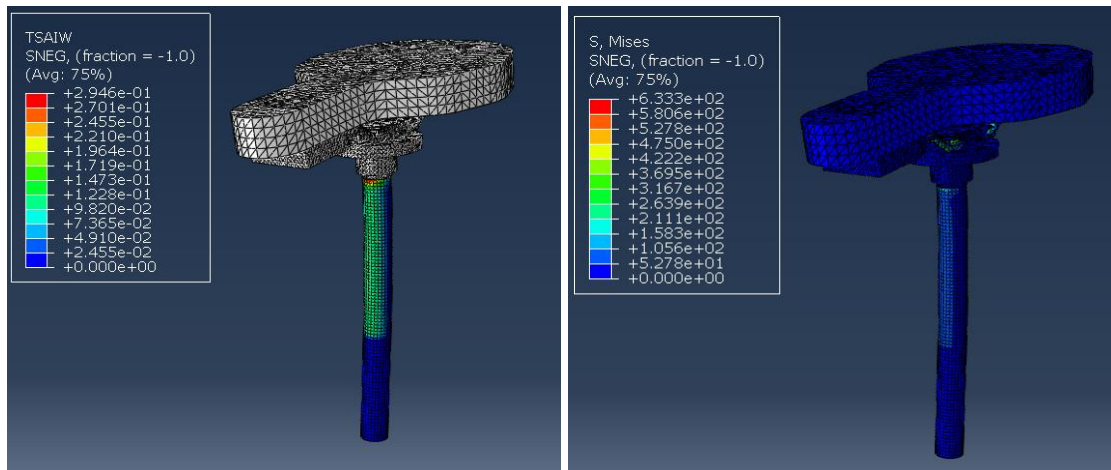


Figura 12. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de seguridad (Fuerza vertical)

En este primer análisis se puede ver que la tija supera en todos sus puntos el criterio Tsai-Wu obteniendo un mayor valor de 0.2946, lo que supone un CS de:

$$CS = \frac{1}{TSAIW} = \frac{1}{0,2946} = 3,39 \geq 2 \Rightarrow \text{OK}$$

Por otro lado, viendo las tensiones que se producen en el modelo, no queda definido con totalidad si el modelo cumple con las especificaciones al haber diferentes piezas de varios materiales. Como se aprecia en la figura Figura 13, la zona más crítica es la zona de alojamiento de las varillas con la abrazadera y el enganche del sillín. Es por ello que esa zona tiene un mallado más fino.

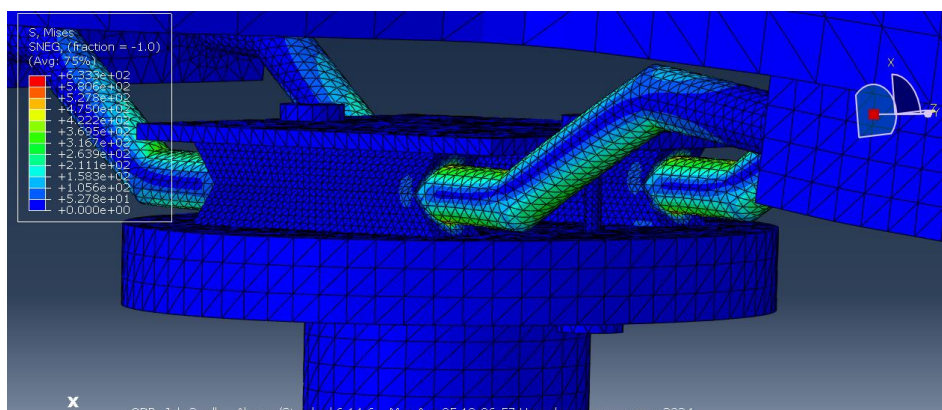


Figura 13. Zona crítica de tensiones para ensayo de seguridad (Fuerza vertical)

Adicionalmente, se han evaluado los resultados de tensiones máximas en MPa de cada pieza por individual para comprobar que ninguna ha quedado deformada. También se han añadido los resultados del ensayo realizado con la tija de aluminio.

	Tija fibra de carbono	Tija de aluminio	Límite	Resultado
Tija	-	97,44	270	✓
Sillín	23,08	23,08	30	✓
Adhesivo	25,66	-	30	✓
Enganche sillín	526,6	526,6	450	?
Abrazadera	633,33	633,33	450	?
Varillas	509,1	509,1	450	?
Tornillos	14,98	14,95	450	✓

Tabla 4. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo seguridad (Fuerza vertical).

Como se aprecia en la tabla, todos los valores se encuentran por debajo de los límites elásticos de cada material con las excepciones del enganche, la abrazadera y las varillas que se van a analizar con mayor profundidad.

La distribución de tensiones en el enganche presenta el siguiente aspecto. Las zonas críticas se concentran en una pequeña zona de contacto con las varillas.

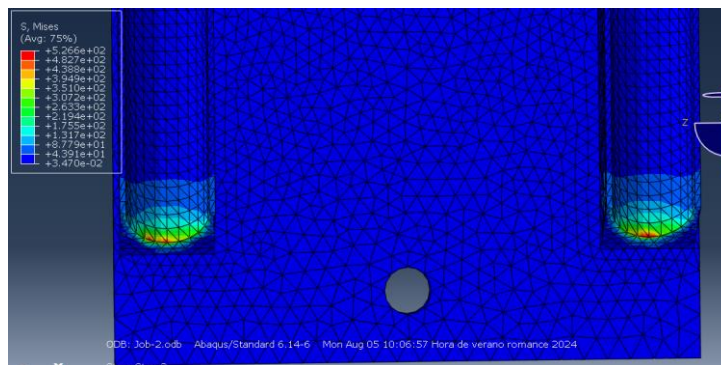


Figura 14. Distribución de tensiones resultantes [MPa] en el enganche sillín – Ensayo seguridad (Fuerza Vertical)

Para ver si el área de contacto es representativa se va a hacer un corte de la pieza en esas zonas.

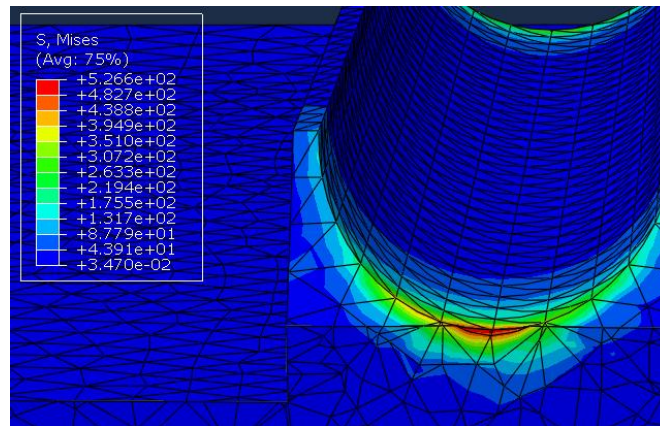


Figura 15. Corte de enganche sillín – Ensayo seguridad (Fuerza Vertical)

Las zonas con tensiones mayor al límite elástico se concentran en áreas de contacto muy pequeñas que resultan de un cálculo por ordenador y pueden no corresponder con un cálculo realista. Por ello, es que se va a considerar la pieza como buena.

Estos cortes también se han hecho en las otras dos piezas con valores de tensión resultantes mayores al límite elástico del acero utilizado. Obteniendo resultados similares a la pieza anterior.

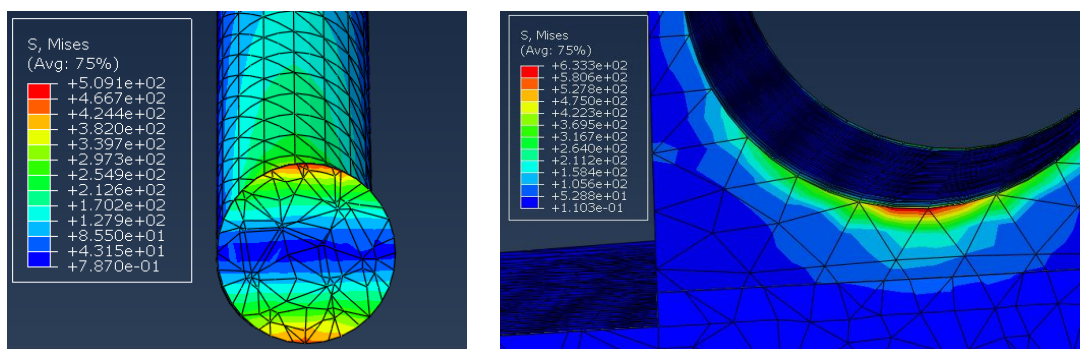


Figura 16. Corte de la varilla y de la abrazadera – Ensayo seguridad (Fuerza Vertical)

3.3.2 Ensayo de seguridad (Fuerza horizontal)

El siguiente ensayo a realizar es la segunda parte del denominado ensayo de seguridad. Se aplica una fuerza de 250N sobre la superficie lateral del sillín.

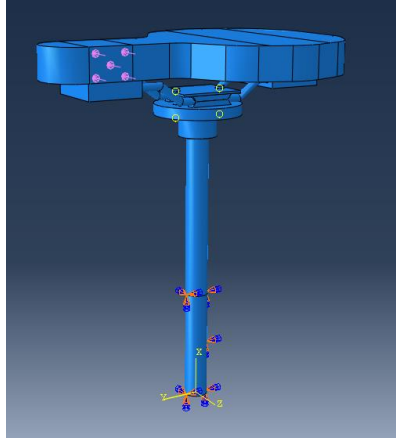


Figura 17. Caso de carga - Ensayo de seguridad Abaqus (Fuerza horizontal)

Los resultados del ensayo son los siguientes:

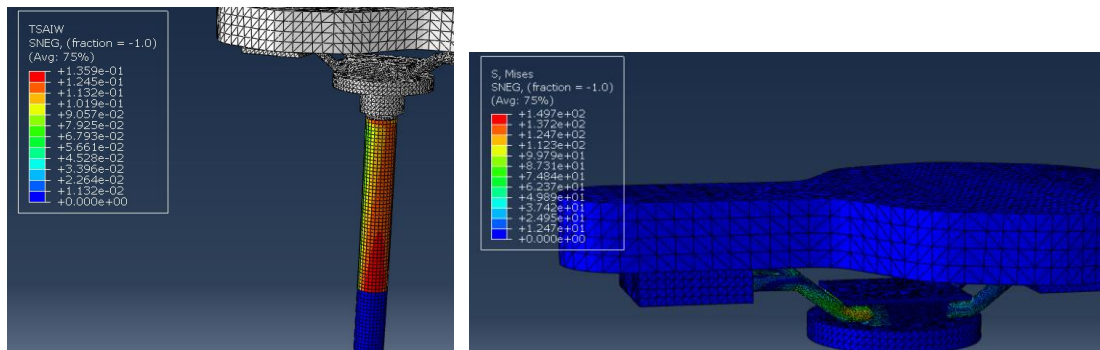


Figura 18. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de seguridad (Fuerza horizontal)

$$CS = \frac{1}{TSAIW} = \frac{1}{0,1359} = 7,36 \geq 2 \Rightarrow \mathbf{OK}$$

La tija cumple con el análisis de Tsai-Wu para este ensayo.

	Tija fibra de carbono	Tija de aluminio	Límite	Resultado
Tija	-	79,19	270	✓
Sillín	10,57	10,57	30	✓
Adhesivo	7,82	-	30	✓
Enganche sillín	147,2	147,2	450	✓
Abrazadera	149,7	149,7	450	✓
Varillas	145,5	145,5	450	✓
Tornillos	6,56	6,52	450	✓

Tabla 5. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo seguridad (Fuerza horizontal).

Al igual que en el ensayo anterior, todos los resultados son favorables, por lo que la tija diseñada cumple con la totalidad del ensayo de seguridad.

3.3.3 Ensayo de fatiga

El ensayo de fatiga tiene la peculiaridad de someter una misma fuerza de 1000N durante 200.000 ciclos. El software Abaqus cae no es capaz de simular un caso dinámico como el que se presenta, por lo que se ha decidido tomar el ensayo como un caso estático.

En primer lugar, el ensayo estático y los resultados se presenta así:

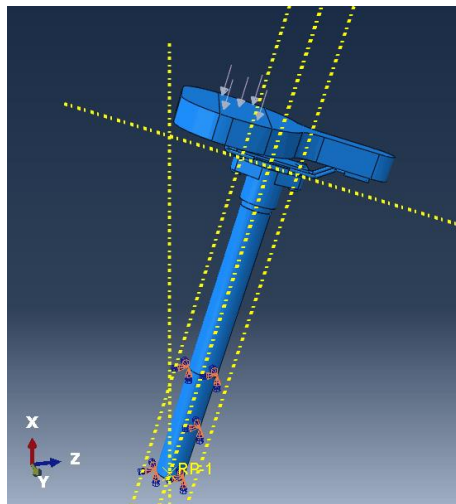


Figura 19. Caso de carga - Ensayo de fatiga Abaqus

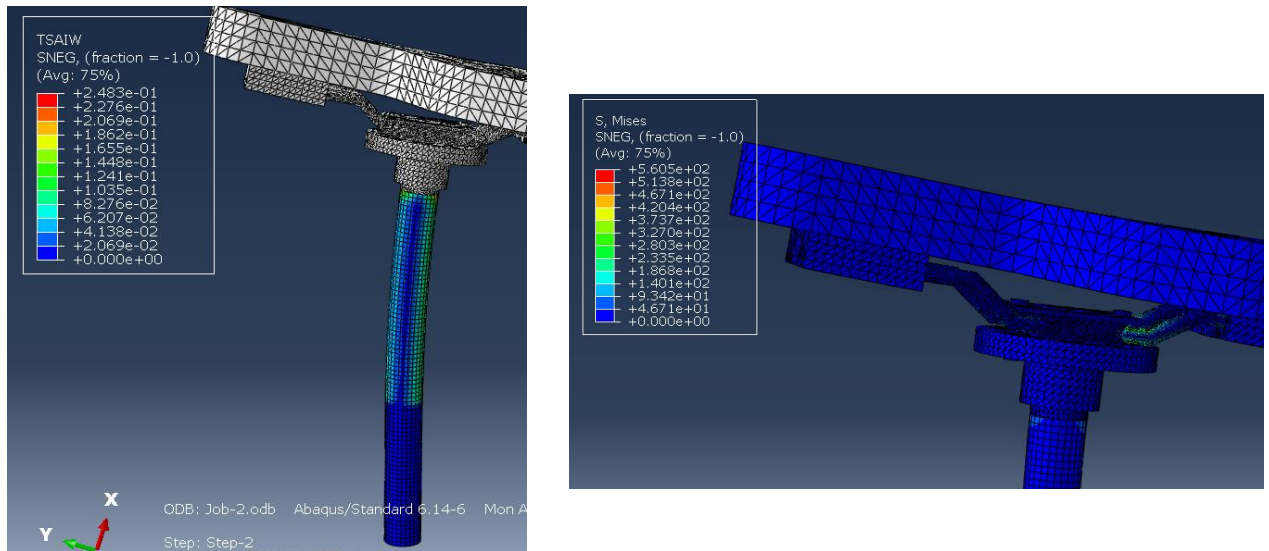


Figura 20. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de fatiga (estático)

$$CS = \frac{1}{TSAIW} = \frac{1}{0,2483} = 4,027 \geq 2 \Rightarrow \text{OK}$$

	Tija fibra de carbono	Tija de aluminio	Límite	Resultado
Tija	-	74,09	270	✓
Sillín	20,13	20,13	30	✓
Adhesivo	20,03	-	30	✓
Enganche sillín	479,9	479,9	450	?
Abrazadera	560,5	560,4	450	?
Varillas	488,5	488,5	450	?
Tornillos	12,52	12,33	450	✓

Tabla 6. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo estático de fatiga.

En este ensayo, ocurre la misma situación que en el ensayo de seguridad con la fuerza vertical, existen 3 piezas con zonas en las que la tensión es puntualmente mayor que el límite elástico. Analizando de nuevo las secciones en las que aparecen estos picos de tensiones se saca la misma conclusión que anteriormente.

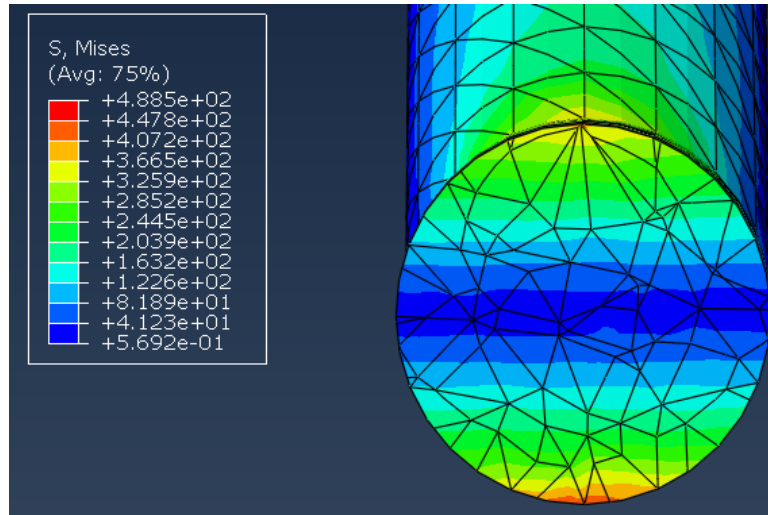


Figura 21. Corte de la varilla – Ensayo de fatiga

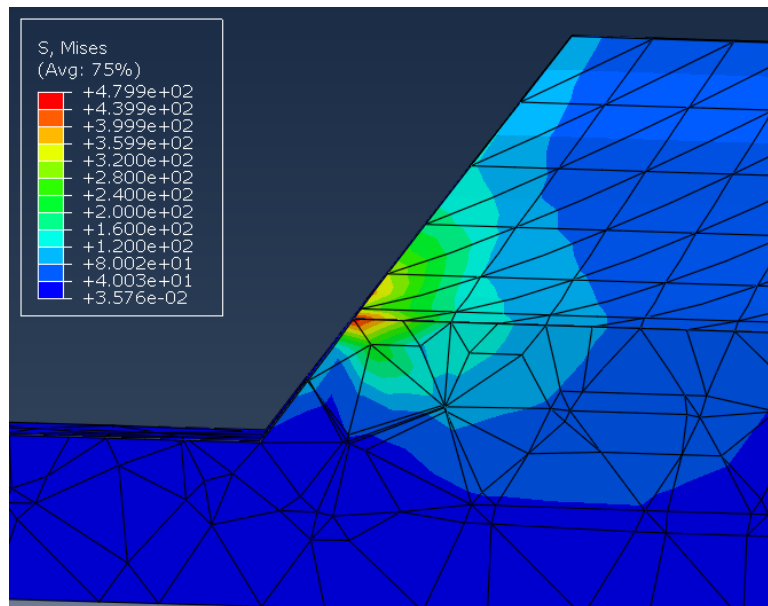


Figura 22. Corte del enganche – Ensayo de fatiga

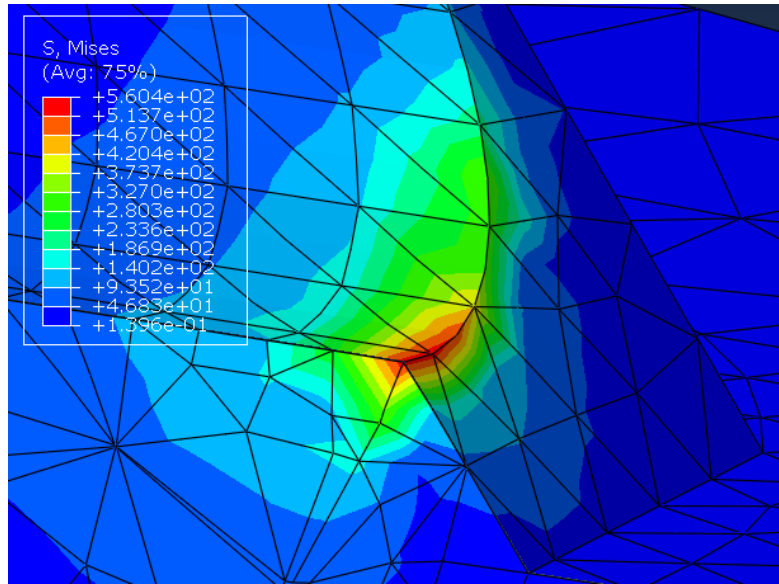


Figura 23. Corte de la abrazadera – Ensayo de fatiga

Las zonas críticas son zonas puntuales, el resto de tensiones cumplen con tensiones menores al límite elástico.

3.3.4 Ensayo para la etapa 1 (Ensayo de fatiga)

Para la valoración de este ensayo, se va a actuar de la misma manera que en el ensayo anterior al ser también un ensayo de fatiga. En el diseño de la pieza a ensayar se ha tenido que crear una barra en la que se ejerce la presión. Además, se elimina del modelo el sillín, el enganche y las varillas. Los tornillos se han incrementado de tamaño para la correcta sujeción de la barra de ensayo.

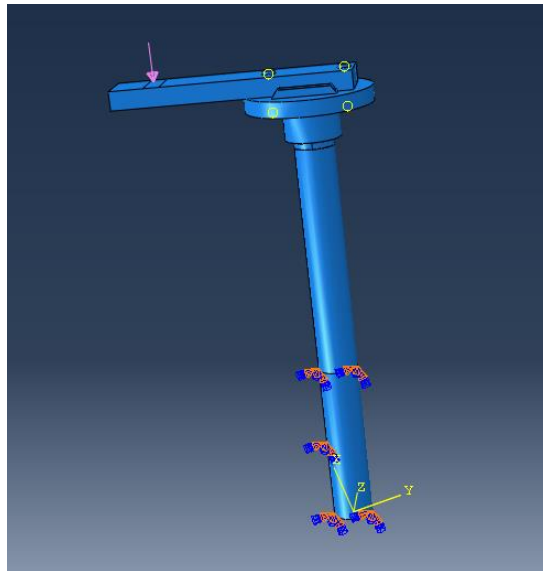


Figura 24. Caso de carga - Ensayo para la etapa 1 Abaqus

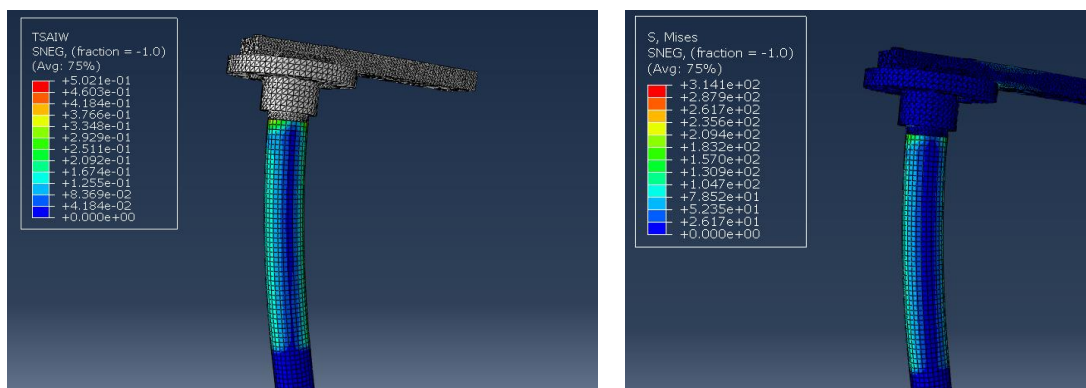


Figura 25. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de la etapa 1 (estático)

$$CS = \frac{1}{TSAIW} = \frac{1}{0,5021} = 1,99 \approx 2 \Rightarrow \text{OK}$$

En este caso, según el criterio de fallo de Tsai-Wu, la tija soporta presiones mucho mayores a la de los ensayos anteriores. El coeficiente de seguridad tiene un valor muy proximo al límite establecido de 2 por lo que se ha validado el ensayo.

	Tija fibra de carbono	Tija de aluminio	Límite	Resultado
Tija	-	167,5	270	✓
Adhesivo	28,15	-	30	✓
Abrazadera	314,41	357,53	450	✓
Tornillos	46,74	46,21	450	✓
Barra ensayo	123,0	123,0	450	✓

Tabla 7. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo estático de etapa 1.

3.3.5 Ensayo para la etapa 2 (Ensayo de resistencia)

Para realizar este ensayo se aplica la carga directamente sobre la pieza enganche del sillín.



Figura 26. Caso de carga - Ensayo para la etapa 2 Abaqus

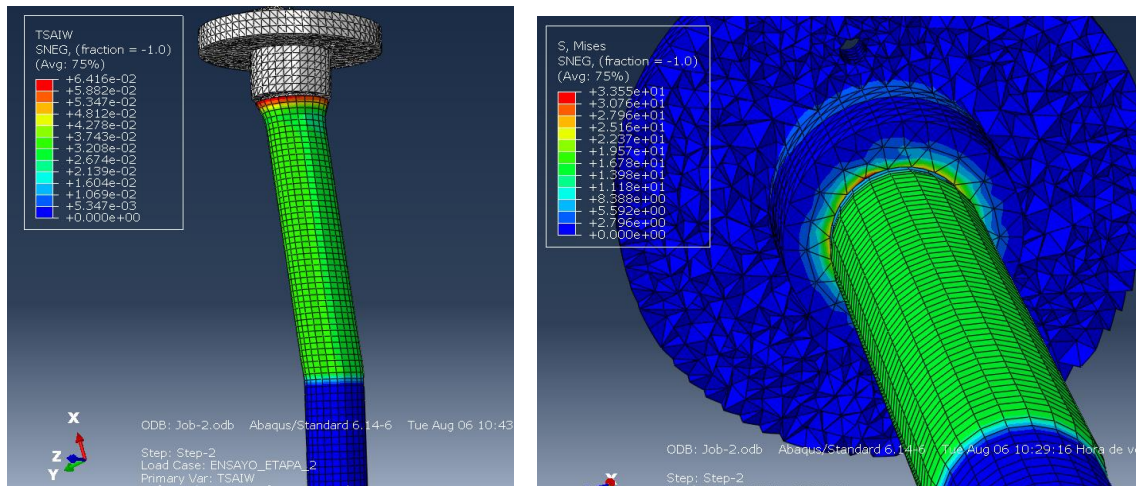


Figura 27. Resultados (Tsai-Wu y Tensiones) para ensayo de la etapa 2

$$CS = \frac{1}{TSAIW} = \frac{1}{0,06416} = 15,58 \geq 2 \Rightarrow \text{OK}$$

	Tija fibra de carbono	Tija de aluminio	Límite	Resultado
Tija	-	16,42	270	✓
Adhesivo	4,24		30	✓
Abrazadera	30,94	33,55	450	✓

Tabla 8. Resultados de tensión resultante [MPa] de cada pieza ensayo de etapa 2

El conjunto diseñado cumple con todos los ensayos, así que la tija de fibra de carbono de 4 capas queda validada de forma teórica. Respecto a su comparación con la tija ya existente de aluminio, se ve que hay un comportamiento similar en términos de tensiones resultantes en el todo el conjunto.

3.4 Optimización de la tija

La tija en un principio se diseñó, de forma continuista a otros proyectos del departamento con 4 capas de fibra de carbono, sumando un espesor de 2 milímetros de tija. Pero ¿se podría reducir alguna capa? Por tanto, se van a repetir los mismos ensayos de validación de la tija para tijas de 2 y 3 capas de fibra de carbono.

Este estudio quizá para la fabricación de una tija unitaria como es este caso no tiene mucha relevancia. Pero en un entorno de fabricación industrial sería un estudio muy importante. El poder ahorrar un 25% o incluso un 50% de material en cada tija conllevaría a una reducción de coste de fabricación significativa.

A continuación, se muestra una tabla resumen de todos los resultados de los análisis de criterio de fallo de Tsai-Wu, contando con 3 diferentes: la tija de 4 capas de fibra (2mm) que corresponde a la que se ya he estudiado en anterioridad, la tija de 3 capas (1,5mm) y la tija de 2 capas (1 mm).

Como resulta evidente, el ensayo de la etapa 1 va a ser el ensayo limitante para cualquier tipo de tija. En la tija de 4 capas ya se encuentra en el límite establecido con el coeficiente de seguridad por lo que con espesores menores no va a poder cumplir. Sin embargo, se va a realizar el estudio para ver si puede cumplir esta condición en el resto de ensayos. Y si en futuros estudios se pudiese fabricar la tija con estas condiciones y ver si cumplen los ensayos en el taller físico.

	4 capas		3 capas		2 capas	
Ensayo de seguridad 1	3,39	✓	2,36	✓	1,44	✗
Ensayo de seguridad 2	7,36	✓	5,35	✓	3,46	✓
Ensayo de fatiga	4,03	✓	2,80	✓	1,71	✗
Ensayo etapa 1	1,99	✓	1,38	✗	0,89	✗
Ensayo etapa 2	15,58	✓	11,06	✓	6,86	✓

Tabla 9. Resultados de Coeficiente de seguridad en criterio de fallo de Tsai-Wu para 2,3, y 4 capas de fibra

Como se observa en la Tabla 9, para 2 y 3 capas no se podría homologar la tija de acorde a la norma. El ensayo de la etapa 1 resulta desfavorable para estas dos configuraciones, para 2 capas parece muy complicado poder alcanzar el correcto funcionamiento con alguna modificación dimensional. Para 3 capas, en alguna línea futura, se podría

optimizar un cambio de diseño y poder lograr conseguir cumplir con la certificación de todos los ensayos.

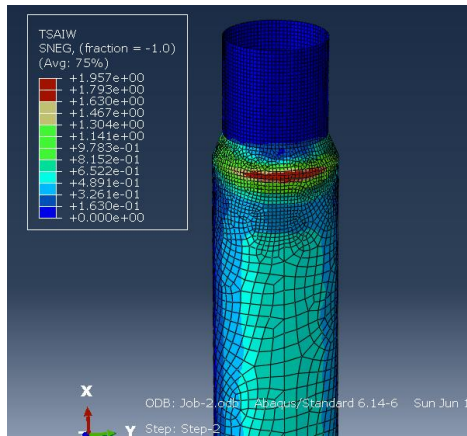


Figura 28. Resultados del criterio de Tsai-Wu para tija con 2 capas de fibra

La zona más crítica y por la que se rompe la tija con estas configuraciones es la zona de transición entre los dos diámetros, justo donde se aloja el adhesivo. Un refuerzo de esa zona también podría conllevar a poder superar todos los ensayos.

4. FABRICACIÓN

4.1 Fabricación del molde

En la fabricación de piezas compuestas, los moldes juegan un papel crucial. La tecnología de impresión 3D ha revolucionado la manera en que estos moldes pueden ser diseñados y fabricados. En este proyecto, se ha utilizado un molde fabricado mediante impresión 3D. Esta metodología no solo permite la creación de moldes complejos y personalizados de manera rápida y eficiente, sino que también optimiza el proceso de producción de piezas compuestas.

La impresión 3D ofrece la capacidad de diseñar geometrías complejas y estructuras internas que serían difíciles de lograr con métodos tradicionales de fabricación de moldes, y en muchos casos, resultan ser más costosos. Esta flexibilidad permite la producción de piezas compuestas ligeras y optimizadas, adaptadas a necesidades específicas. Además, el uso de la impresión 3D en la fabricación de moldes puede agilizar el proceso de producción, reducir costos y facilitar la creación de piezas experimentales o prototipos.



Figura 29. Molde de fabricación de la tija

Es fundamental considerar los materiales utilizados para la impresión 3D de los moldes, ya que deben soportar las temperaturas y presiones implicadas en el proceso de fabricación de los compuestos. En este caso, se ha empleado PLA (ácido poliláctico), un material comúnmente utilizado en la impresión 3D debido a su asequibilidad y facilidad de uso. Sin embargo, el PLA presenta limitaciones en aplicaciones de alta temperatura

debido a su baja temperatura de transición vítrea, aproximadamente 65°C , lo que puede provocar que se ablande o deforme al exponerse a temperaturas más altas.

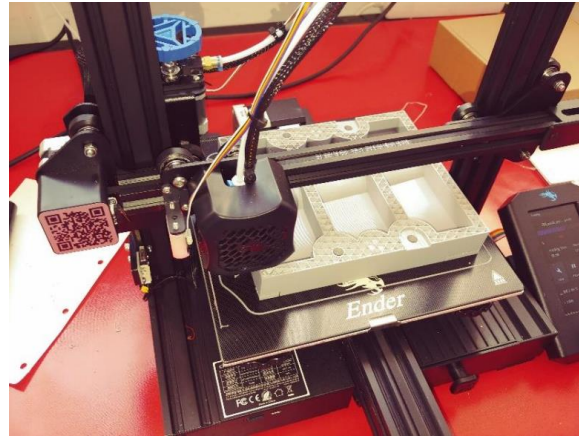


Figura 30. Fabricación de un molde con impresión 3D

Para superar las limitaciones del PLA en aplicaciones de moldeo de compuestos, se han implementado varias estrategias. En este proyecto, se decidió mejorar el molde cubriéndolo con una capa protectora de resina epoxi en lugar de una barrera de gelcoat. Esta decisión se tomó a partir de experiencias previas negativas con el uso de gelcoat, donde los primeros intentos de cubrir el molde de PLA con gelcoat llevaron a la delaminación del gelcoat del molde. En cambio, al seleccionar una capa de resina epoxi, no se presentaron más problemas.



Figura 31. Refuerzo de resina epoxi en el molde

4.2 Fabricación de la tija

Una vez fabricado el molde, se procede a fabricar la tija. En primer lugar, hay que cortar las 4 capas de fibra de acorde a las necesidades dimensionales de la tija que con las que se ha diseñado el molde. Las fibras para fabricación de este tipo de piezas vienen comercializadas en mallas circulares, estas mallas presentan poca resistencia a ensanchar las fibras y ampliar el diámetro de la malla, por lo que se tiene cuidado para abrirlas y no sobrepasar el diámetro establecido que puede provocar pliegues durante el proceso de fabricación en el molde.

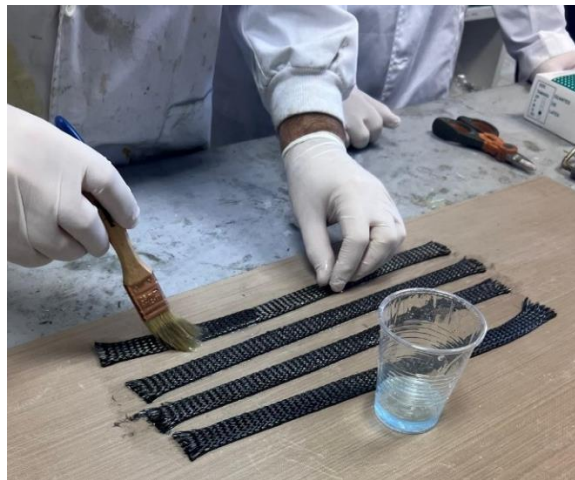


Figura 32. Impregnación de las fibras de carbono con resina Greenpoxy33 + SD4770

Los trozos de fibra cortados se impregnan de con la resina epoxi elegida (Greenpoxy33 + SD4770) para que estas se unan con facilidad. El siguiente paso es introducir los trozos de fibra uno sobre otro, para formar un bloque único de 4 capas.

Las necesidades dimensionales restrictivas de la tija se encuentran en la zona exterior de la misma, ya que es la zona de contacto con otras. Estas zonas externas vienen delimitadas por la cavidad del molde, pero al ser un objeto hueco es necesario que algo expanda las fibras y que estas se amolden a la forma de la cavidad. Por ello se ha diseñado un tubo neumático que se introduce en la zona interna de las mallas de fibra. El tubo se llenará de aire a 2 bares presión para conseguir que el compuesto tome la forma del molde.



Figura 33. Cilindro neumático y fibra ya introducidas en el molde.

Una vez introducidas las fibras, se cierra el molde con los tornillos pasantes que se encuentra en el exterior. Adicionalmente, se fija una serie de gatos de fijación para que el molde quede completamente cerrado.



Figura 34. Molde cerrado con gatos de fijación

El último y definitivo proceso de fabricación es la curación de la tija, en la que se introduce el molde en un horno a 45 grados centígrados durante 8 horas. Durante ese proceso, las fibras y la resina conforman el material compuesto y forman una única pieza.

El proceso de desmoldeo también es un proceso clave, una simple presencia de alguna gota de resina epoxi en el macho del molde puede hacer que se pegue a la capa superficial de carbono y esta se rompa.

Si la tija se encuentra en perfectas condiciones, se liman las posibles imperfecciones generadas en los bordes de la tija con el fin de obtener una tija estética y funcionalmente bien formada.

5. ENSAYOS DE VALIDACIÓN

La pieza ya ha quedado ensayada de manera teórica en apartados anteriores, lo que valdría para un análisis utópico de una tija. Como ya se ha comentado, esta tija va a ser utilizada en una bicicleta real por lo que, partiendo de los resultados obtenidos en la simulación por software, se van a realizar ensayos físicamente. También se ha considerado realizar los mismos ensayos para la tija de aluminio, por tener un comparativa real entre ambas.

Cabe decir que este análisis es mucho más representativo en cuanto a alcance de los objetivos. Todas las piezas auxiliares utilizadas (sillín, varillas...) son piezas reales de bicicleta, que han superado sus propios ensayos de validación para su posterior comercialización. Esto conlleva que la tija se enfrenta a un entorno más fiable y realista que las piezas diseñadas en el software por mí.

Estos ensayos se van a realizar en el taller de la propia Universidad de Zaragoza. La principal máquina de ensayos a utilizar será una prensa tracción/compresión Instron.

Los resultados del ensayo se van a extraer del propio software del que dispone la prensa. En él, se obtendrán graficas tensión-deformación. La dinámica de ensayo va a ser siempre la misma, habrá una rampa de subida de tensión hasta conseguir la necesaria para cada ensayo y se mantendrá un minuto esa presión sobre la tija.

5.1 Ensayo de seguridad

Como primer ensayo, se ha realizado el ensayo de seguridad de fuerza vertical. Se ha fijado la tija en el soporte simulando un cuadro de bicicleta y se le ha aplicado la fuerza de 650N durante 1 minuto.



Figura 35. Ensayo de seguridad vertical para tija de fibra de carbono (izda) y aluminio (dcha)

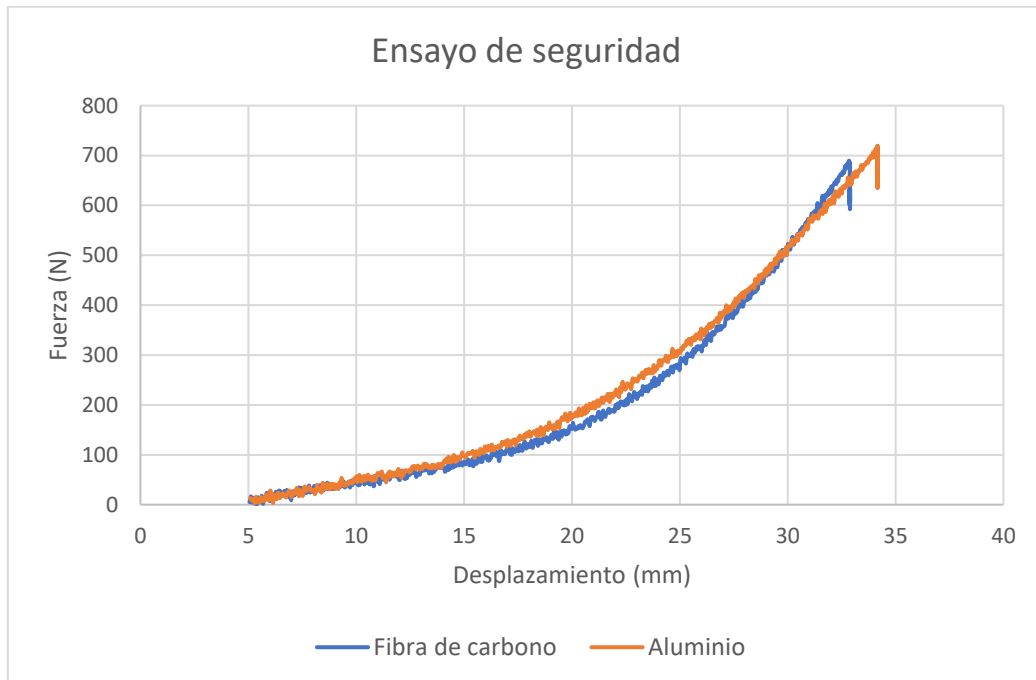


Figura 36. Gráfica fuerza-desplazamiento ensayo de seguridad.

Tal y como muestra la gráfica, ambos conjuntos de comportan de manera similar. Existe una curva de desplazamiento normal con un comportamiento elástico, ya que no se observa ningún punto de rotura de los conjuntos. Las líneas verticales que aparecen en la gráfica corresponden al punto en el que se deja de ejercer presión y se intenta mantener durante 1 minuto como indica la norma.

Como análisis de la curva, se puede decir que de los 5 a los 25 mm de desplazamiento corresponden a la propia almohadilla del sillín, pero una vez superado ese límite, la pendiente cambia ligeramente y la presión afecta sobre todo el conjunto.

Al dejar de aplicar presión y liberar el conjunto, todos los elementos vuelven a su forma original sin ningún tipo de deformación.

El ensayo de seguridad de la fuerza horizontal no se ha podido realizar al no haber podido conseguir un encastre de la pieza en esa dirección sin que se mueva al ejercer la fuerza, ni tampoco se dispone en el taller de una prensa en sentido horizontal. De todas formas, este ensayo es uno de los menos restrictivos de acorde a las simulaciones realizadas anteriormente.

5.2 Ensayo de fatiga

Para este ensayo se ha tenido el mismo problema que en el ensayo simulado, no se disponía de maquinaria necesaria para realizar los ciclos de fatiga. Por lo que se ha decidido realizar un ensayo en estático y manteniendo la fuerza durante 1 minuto como en el ensayo anterior.

Para los ensayos de aquí en adelante fue necesario realizar un utillaje para colocar la tija a 73° sobre la horizontal. El utillaje se diseñó de tal forma que la profundidad coincidiese con la mínima profundidad de 10 centímetros que marca la norma para hacer los ensayos.



Figura 37. Ensayo de fatiga para tija de aluminio

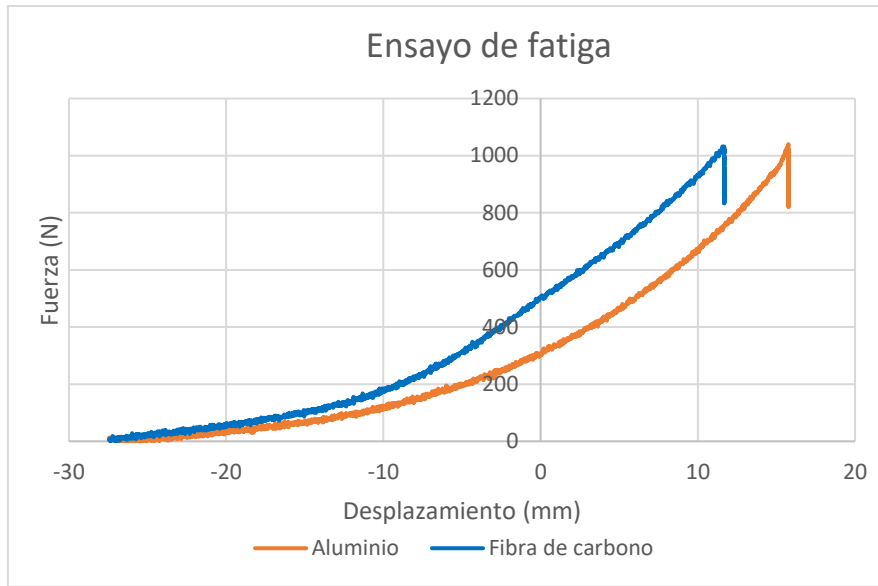


Figura 38. Gráfica fuerza-desplazamiento ensayo de fatiga.

Los resultados de este ensayo son similares a los obtenidos en el ensayo anterior, ambas tijas se comportan de manera elástica y no sufren ninguna deformación. También existe un cambio de pendiente en torno a los 200N, pero en este caso al llevar la fuerza aplicada hasta un total de 1000N existe menor forma de curva.

5.3 Ensayo de la etapa 2

El ensayo de la etapa 1 no pudo realizarse debido a la dificultad del diseño de la pieza sobre la que se aplica la fuerza.

Respecto al ensayo de la etapa 2, cabe decir que en cuanto a valores absolutos de fuerza es el más exigente. Se realizó con una pieza similar a la abrazadera original ya que en esta existía menor posibilidad de deslizamiento de la pieza que ejerce la fuerza de la propia prensa.



Figura 39. Ensayo de la etapa 2 para tija de fibra de carbono

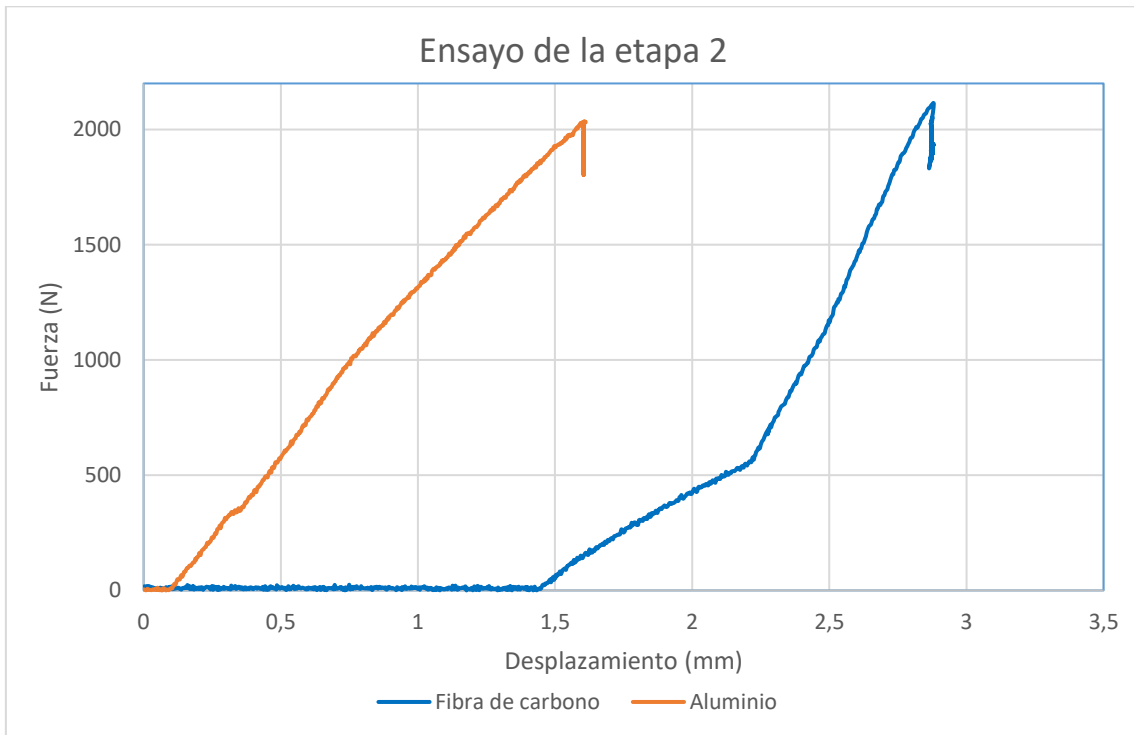


Figura 40. Gráfica fuerza-desplazamiento ensayo de la etapa 2.

Aún con todo, en el ensayo de la tija de fibra de carbono, se muestran con claridad pequeños desplazamientos de la pieza (de 0 a 1,5mm) y un desplazamiento más progresivo (de 1,5 a 2,2 mm).

Pese a esta circunstancia, una vez superados los 500N de carga aplicada la pendiente de ambos materiales es similar y superan ambos el ensayo sin dificultad.

Con este se concluyen todos los ensayos realizados en el taller y la tija de fibra de carbono fabricada en la universidad ha superado todos ellos.

Como comparativa general entre la tija fabricada en aluminio y la de fibra de carbono se podría decir que ambas serían totalmente funcionales. Analizando todas las gráficas, destaca la pequeña diferencia de pendiente entre ambos materiales. Esto indica que la tija de fibra de carbono al tener mayor pendiente tiene un menor desplazamiento y por ende absorbe más la fuerza aplicada.

6. CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS

El objetivo del trabajo se ha cumplido, la tija ha quedado validada de acorde a los ensayos de validación recogidos en la norma. Por lo que ya podría usarse en una bicicleta convencional y verificar que es apta. Para ello se ha hecho primero un análisis y justificación del material a utilizar, valorando las ventajas que aporta la fibra de carbono trenzada. A continuación, se ha validado la tija en el software previo a su fabricación. Finalmente, se ha ensayado en el taller la pieza.

Este análisis se ha realizado con una versión de Abaqus con licencia de estudiante, para un resultado más completo y certero se podrían realizar una serie de mejoras. En primer lugar, se podría realizar un mallado más fino en las zonas de conflicto de concentración de tensiones. Los contactos entre piezas, para ser más realistas deberían tener rozamiento entre ellos.

Como línea futura de este proyecto, cabría la posibilidad de poder optimizar la tija.

Se podría analizar un cambio de diseño y ver si existe alguno más confortable de acorde a la bicicleta portante. Este cambio de diseño también iría unido a la idea de reducir el número de capas de fibra de carbono evitando así costes de material.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. De Santiago, Q. C. (2021, 12 mayo). *La evolución de los materiales para construir bicicletas*. Cycle City México. <https://www.cyclecity.mx/materiales-para-construir-bicicletas/>
- [2] Profesores de la asignatura (Curso 2023/24). Diapositivas asignatura *Nuevas tecnologías en máquinas y vehículos*. Máster en Ingeniería Industrial.
- [3]. Carrera M, Cuartero J, Miravete A et al. Crash Behaviour of a Carbon Fibre Floor Panel. *International Journal of Vehicle Design*, 44, 2007
- [4]. *BOE-A-2014-5399 Real Decreto 339/2014, de 9 de mayo, por el que se establecen los requisitos para la comercialización y puesta en servicio de las bicicletas y otros ciclos y de sus partes y piezas, y por el que se modifica el Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre.* (s. f.). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2014-5399>
- [5]. *Criterio de error Tsai-Wu - 2016 - Ayuda de SOLIDWORKS.* (s. f.). https://help.solidworks.com/2016/spanish/SolidWorks/cworks/r_tsaiwu_failure_criterio n.htm