



Trabajo Fin de Grado

CÁLCULO, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA DE BICICLETA EN FIBRA DE CARBONO

CALCULATION, DESIGN AND MANUFACTURING OF A CARBON FIBER
BICYCLE SEATPOST

Autor/es

Marcos Germán Castillo

Director/es

Jesús Cuartero Salafranca

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Campus Río Ebro

Año 2025

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE GRÁFICAS	11
1. INTRODUCCIÓN y RESUMEN.....	13
2. HISTORIA DE LOS MATERIALES EN EL CICLISMO	14
3. MATERIAL UTILIZADO: FIBRA DE CARBONO	18
3.1. VENTAJAS Y LIMITACIONES.....	18
3.2. TIPO DE MATERIAL Y SU ORIENTACIÓN	18
3.3. CLASIFICACIÓN DE TEJIDOS (WEAVES) Y TRENZADOS (BRAIDS)	19
3.3.1. TEJIDO (WEAVE)	19
3.3.2. TRENZADO (BRAIDING)	22
3.4. CONCLUSIÓN DEL MATERIAL Y ORIENTACIÓN ELEGIDA.....	23
3.5. MATERIAL DEL RESTO DE COMPONENTES DEL SILLÍN.....	24
4. CRITERIO DE TSAI-WU.....	25
4.1. FUNDAMENTOS DEL CRITERIO	25
4.1.1. INTERPRETACIÓN DE LOS TÉRMINOS GENERALES.....	25
4.2. APLICACIÓN DEL CRITERIO A LA FIBRA DE CARBONO	25
4.2.1. INTERPRETACIÓN DE LOS TÉRMINOS A LA APLICACIÓN	25
4.3. FORMA DE EVALUAR EL CRITERIO DE FALLO	26
5. DISEÑO	27
5.1. COMPONENTES DEL SILLÍN	28
5.2. DISEÑO DE LA TIJA	29
5.3. DISEÑO DEL RESTO DE COMPONENTES	30
5.3.1. Abrazadera del Sillín	30
5.3.2. Abrazadera del Sillín para simulación.....	31
5.3.3. Enganche del Sillín.....	31
5.3.4. Tornillos de Pretensión del Sillín (x2).....	32
5.3.5. Sillín (Asiento)	33
5.3.6. Varillas del Sillín (x2).....	33
6. REQUISITOS LEGALES	34
7. ENSAYOS	35
7.1. ENSAYO DE SEGURIDAD.....	35
7.1.1. FUERZA VERTICAL	35
7.1.2. FUERZA HORIZONTAL	36

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

7.2.	ENSAYO DE FATIGA	36
7.3.	ENSAYO PARA LA ETAPA 1 – ENSAYO DE FATIGA	37
7.4.	ENSAYO PARA LA ETAPA 2 – ENSAYO DE RESISTENCIA	37
8.	SIMULACIÓN EN SOWTWARE ABAQUS 6.14 – 6.....	38
8.1.	Condiciones de Contorno	38
8.2.	CONTACTOS.....	39
8.2.1.	CONTACTO SIN DESLIZAMIENTO – TIE	39
8.2.2.	CONTACTO CON DESLIZAMIENTO – FRICCIÓN	41
8.3.	SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS MEDIANTE SOFTWARE	42
8.3.1.	PRETENSIÓN DE LOS TORNILLOS [CRITERIO DE VON MISES]43	
8.3.2.	PRETENSIÓN DE LOS TORNILLOS [CRITERIO DE TSAI – WU]. 44	
8.3.3.	ENSAZO DE FUERZA VERTICAL Y RESULTADOS	45
8.3.3.1.	TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO [ENSAZO DE CARGA VERTICAL].....	48
8.3.3.4.	ENSAZO DE CARGA HORIZONTAL.....	49
8.3.4.1.	TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO [ENSAZO DE CARGA HORIZONTAL].....	53
8.3.5.	ENSAZO DE FATIGA	54
8.3.5.1.	TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO [ENSAZO DE FATIGA]	57
8.3.6.	ENSAZO DE FATIGA – ETAPA 1	58
8.3.6.1.	TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO [ENSAZO DE FATIGA, ETAPA 1]	62
8.3.7.	ENSAZO DE RESISTENCIA – ETAPA 2.....	63
8.3.7.1.	TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO [ENSAZO DE RESISTENCIA, ETAPA 2].....	67
9.	MOLDE.....	68
9.1.	DISEÑO DEL MOLDE.....	68
9.2.	FABRICACIÓN DEL MOLDE	69
9.3.	FABRICACIÓN DE LA TIJA.....	70
10.	ENSAZOS	72
10.1.	ENSAZO DE CARGA VERTICAL.....	75
10.1.1.	COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ABAQUS Y LA PRENSA, ENSAYO DE CARGA VERTICAL.....	76
10.2.	ENSAZO DE FATIGA	78
10.2.1.	COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ABAQUS Y LA PRENSA, ENSAYO DE FATIGA	79

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

10.3.	ENSAYO DE RESISTENCIA ETAPA 2.....	81
10.3.1.	COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ABAQUS Y LA PRENSA, ENSAYO DE RESISTENCIA, ETAPA 2	82
11.	CONCLUSIÓN	84
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1.	Maquina Andante o Draisiana	14
2.2.	Velocípedo	14
2.3.	Bicicleta de Acero al Carbono	15
2.4.	Bicicleta de Aleación de Acero	15
2.5.	Bicicleta de Cromoly	16
2.6.	Bicicleta de Aluminio	16
2.7.	Bicicleta de Fibra de Carbono	17
2.8.	Bicicleta de Titanio	17
3.1.	Plain Weave	20
3.2.	Twill	20
3.3.	4 HS	20
3.4.	5 HS	21
3.5.	8 HS	21
3.6.	Basket	21
3.7.	Biaxial Braiding	22
3.8	Triaxial Braiding	23
5.0.1.	Diseño inicial del sillín	27
5.0.2.	Rediseño propuesto del sillín	27
5.1.1.	Asiento	28
5.1.2.	Componentes	28
5.1.2.1.	Varillas x2	28
5.1.2.2.	Tornillos de pretensión	28
5.1.2.3.	Abrazadera sillín	28
5.1.2.4.	Enganche sillín	28
5.2.1.	Tija	29
5.3.1.1.	Abrazadera sillín original – Vista 1	30
5.3.1.2.	Abrazadera sillín original – Vista 2	30
5.3.1.3.	Abrazadera sillín nuevo – Vista 1	30
5.3.1.4.	Abrazadera sillín nuevo – Vista 2	30
5.3.2.1.	Abrazadera 73° sillín para simulación	31

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

5.3.2.2. Ubicación abrazadera 73°	31
5.3.3.1. Enganche sillín original – Vista 1	31
5.3.3.2. Enganche sillín original – Vista 2	31
5.3.3.3. Enganche sillín nuevo – Vista 1	32
5.3.3.4. Enganche sillín nuevo – Vista 2	32
5.3.4.1. Tornillo de pretensión original	32
5.3.4.2. Tornillo de pretensión nuevo	32
5.3.5.1. Asiento original – Vista 1	33
5.3.5.2. Asiento original – Vista 2	33
5.3.5.3. Asiento nuevo – Vista 1	33
5.3.5.4. Asiento nuevo – Vista 2	33
5.3.6.1. Varilla del sillín	33
7.1.1. Ensayo de Seguridad – Fuerza Vertical	35
7.1.2. Ensayo de Seguridad – Fuerza Horizontal	36
7.2. Ensayo de Fatiga	36
7.3. Ensayo para la etapa 1 – Ensayo de Fatiga	37
7.4. Ensayo para la etapa 2 – Ensayo de Resistencia	37
8.1.1. Condiciones de Contorno – Empotramiento	38
8.2.1.1. TIE Tija – Abrazadera	39
8.2.1.2. TIE Varillas – Sillín	40
8.2.1.3. TIE Abrazadera – Tornillos	40
8.2.1.4. TIE Enganche – Tornillos	41
8.2.2.1. Contacto con Deslizamiento Varillas	41
8.3.1.1. No hay cargas aplicadas, Pretensión	43
8.3.1.2. Pretensión [VON MISES] – Vista 1	43
8.3.1.3. Pretensión [VON MISES] – Vista 2	43
8.3.1.3. Pretensión [VON MISES] – Vista 3	43
8.3.2.1. No hay cargas aplicadas, Tsai - Wu	44
8.3.2.2. Pretensión [TSAIW] – Vista 1	44
8.3.2.3. Pretensión [TSAIW] – Vista 2	44

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

8.3.3.1. Aplicación de Cargas – Ensayo de Carga Vertical	45
8.3.3.2. Pretensión + Carga Vertical	45
8.3.3.3. Sin cargas VS Pretensión + Carga Vertical	46
8.3.3.4. Zona Crítica Tensiones – Ensayo de Carga Vertical	46
8.3.3.5. Zona de Máxima Tensión – Ensayo de Carga Vertical	46
8.3.3.6. Vista General, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Carga Vertical	47
8.3.3.7. Zona Crítica, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Carga Vertical	47
8.3.4.1. Aplicación de Cargas – Ensayo de Carga Horizontal	49
8.3.4.2. Pretensión + Carga Horizontal	49
8.3.4.3. Sin cargas VS Pretensión + Carga Horizontal	50
8.3.4.4. Zona Crítica Tensiones – Ensayo de Carga Horizontal	50
8.3.4.5. Zona de Máxima Tensión – Ensayo de Carga Horizontal	51
8.3.4.6. Vista General, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Carga Horizontal	52
8.3.4.7. Zona Crítica, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Carga Horizontal	52
8.3.5.1. Aplicación de Cargas – Ensayo de Fatiga	54
8.3.5.2. Pretensión + Fatiga	54
8.3.5.3. Sin cargas VS Pretensión + Fatiga	55
8.3.5.4. Zona Crítica Tensiones – Ensayo de Carga Fatiga	55
8.3.5.5. Zona de Máxima Tensión – Ensayo de Carga Fatiga	55
8.3.5.6. Vista General, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Carga Fatiga	56
8.3.5.7. Zona Crítica, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Carga Fatiga	56
8.3.6.1. Aplicación de Cargas – Ensayo de Fatiga, Etapa 1	58
8.3.6.2. Pretensión + Ensayo de Fatiga, Etapa 1	58
8.3.6.3. Sin cargas VS Pretensión + Ensayo de Fatiga, Etapa 1	59
8.3.6.4. Zona Crítica Tensiones – Ensayo de Fatiga, Etapa 1	59
8.3.6.5. Zona de Máxima Tensión – Ensayo de Fatiga, Etapa 1	60
8.3.6.6. Vista General, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga, Etapa 1	61
8.3.6.7. Zona Crítica, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga, Etapa 1	61
8.3.7.1. Aplicación de Cargas – Ensayo de Resistencia, Etapa 2	63
8.3.7.2. Pretensión + Ensayo de Resistencia, Etapa 2	63

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

8.3.7.3. Sin cargas VS Pretensión + Ensayo de Resistencia, Etapa 2	64
8.3.7.4. Zona Crítica Tensiones – Ensayo de Resistencia, Etapa 2	64
8.3.7.5. Zona de Máxima Tensión –Ensayo de Fatiga, Etapa 1	65
8.3.7.6. Vista General, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga, Etapa 1	66
8.3.7.7. Zona Crítica, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga, Etapa 1	66
9.1.1. Ensamblaje del Molde	68
9.2.1. Molde abierto	69
9.2.2. Molde con láminas de fibra de carbono	69
9.3.1. Disposición Briding 30° de la fibra de carbono	70
9.3.2. Peso de las 4 láminas de fibra de carbono	70
9.3.3. Proceso de impregnación	70
9.3.4. Refuerzo de cierre con gatos de fijación	71
10.0.1. Prensa de tracción / compresión Instron Model 8032	72
10.0.2. Cilindro	72
10.0.3. Nivel	73
10.0.4. Inclinación 73°	73
10.0.5. Inclinación 73° - 2	73
10.1.1. Colocación del cilindro a 25 mm del extremo	75
10.1.2. Ensayo Carga Vertical – Inicio	75
10.1.3. Ensayo Carga Vertical – Fin	75
10.1.4. Comparativa entre Abaqus y la prensa, Ensayo de Carga Vertical	76
10.2.1. Colocación del cilindro entre el extremo posterior y la tija	76
10.2.2. Ensayo de Fatiga – Inicio	78
10.2.3. Ensayo de Fatiga – Fin	78
10.2.4. Comparativa de resultados entre Abaqus y la prensa, Ensayo de Fatiga	79
10.3.1. Colocación del cilindro sobre la abrazadera especial	81
10.3.2. Ensayo de Resistencia, Etapa 2 – Inicio	81
10.3.3. Ensayo de Resistencia, Etapa 2 – Fin	81
10.4.4. Comparativa de resultados entre Abaqus y la prensa, Ensayo de Resistencia ..	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Materiales utilizados en la historia del ciclismo	17
Tabla 2: Propiedades Elásticas de la Fibra de Carbono	24
Tabla 3: Propiedades de fallos en la primera capa de Fibra de Carbono	24
Tabla 4: Material y propiedades del resto de componentes	24
Tabla 5: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Carga Vertical	48
Tabla 6: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Carga Horizontal	53
Tabla 7: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Fatiga	57
Tabla 8: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Fatiga – Etapa 1	62
Tabla 9: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Resistencia – Etapa 2	67

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Ensayo de Carga Vertical (650 N)	77
Gráfica 2: Ensayo de Fatiga (1000 N)	80
Gráfica 3: Ensayo de Resistencia – Etapa 2	83

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

1. INTRODUCCIÓN y RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño, cálculo, fabricación y ensayo de una tija de bicicleta para MTB (Mountain Bike) utilizando fibra de carbono como material principal con una orientación “braiding” a 30°. Actualmente en el mercado del ciclismo, las tijas de fibra de carbono que se comercializan presentan una orientación perpendicular unas fibras con otras.

El desarrollo incluye la creación de cada uno de los componentes del sillín, su posterior ensamblaje y la evaluación de su rendimiento mediante simulaciones y ensayos experimentales.

Inicialmente, el diseño de cada componente del sillín se llevará a cabo utilizando el software Autodesk Inventor, mientras que el ensamblaje y la evaluación de los diferentes casos de carga se realizarán mediante el software de análisis por elementos finitos Abaqus 6.14-6. Una vez validados los cálculos, se procederá a diseñar un molde de PLA (Ácido Poliláctico) mediante impresión 3D para fabricar la tija, tecnología proporcionada por la Universidad de Zaragoza.

La tija se fabricará utilizando un braiding a 30° de fibra de carbono dispuesto en cuatro capas de 0,5 mm de espesor. El proceso de conformado incluye la aplicación de presión mediante cámara flexible dentro del molde, lo que permitirá que las láminas adquieran la forma deseada de la tija y se compacten. Los demás componentes, como el asiento, las varillas y las abrazaderas, serán estándar y no requieren fabricación específica.

Finalmente, se realizarán ensayos experimentales en el taller de la universidad para validar la correspondencia entre los resultados simulados y los empíricos, evaluando la aptitud de la tija para su uso cotidiano.

2. HISTORIA DE LOS MATERIALES EN EL CICLISMO

El primer diseño de una bicicleta fue creado en 1817, por un alemán llamado Karl Drais, quién inventó un vehículo hecho principalmente de madera incluidas las ruedas, el cual era impulsado por la persona que lo llevaba empujando sus pies contra el suelo, ya que no tenía pedales. Este vehículo era conocido como “máquina andante” o “draisiana”.



Figura 2.1: Máquina Andante o Draisiana

Fue en 1860 cuando el francés Pierre Michaux junto con su hijo Ernest crearon el “velocípedo”, el cuál tenía pedales en la rueda delantera y ya empezaron a meter otros materiales como el hierro junto con la madera.

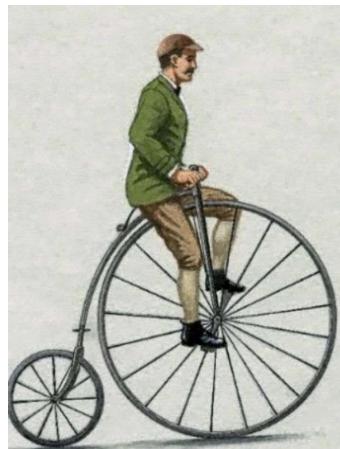


Figura 2.1: Velocípedo

Más tarde, en 1894, una empresa británica, patentó la bicicleta de bambú. Este tipo de bicicletas tenían tubos de bambú unidos con piezas metálicas en las uniones, pero esto fue uno de los principales problemas por los que estos vehículos a pedal no tuvieron éxito debido a la falta de tecnología para poder unir estos tubos sin que se soltaran de las uniones. A día de hoy, las bicicletas se asocian a una movilidad sostenible ya que es un recurso renovable que crece muy rápido y a su vez permite construir cuadros muy fuertes y ligeros.

Fue para el año 1900 cuando se empezó a introducir el acero en las bicicletas. Cronológicamente, el avance de los materiales en el ciclismo fue el siguiente:

1890-1930: Acero al carbono

Un acero muy resistente y económico, pero a la vez muy pesado para su maniobrabilidad. Estas bicicletas llegaron a conocerse como “safety bicycle”.



Figura 2.2: Bicicleta de Acero al Carbono

1940-1960: Aleaciones de acero

Una de las aleaciones a destacar fue el cromo-molibdeno (“cromoly”), la cual era una aleación mucho más ligera y con mayor elasticidad que el acero al carbono tradicional, por lo que permitía absorber mejor los impactos.



Figura 2.3: Bicicleta de Aleación de Acero



Figura 2.4: Bicicleta de Cromoly

1970: Aleaciones de Aluminio

Al mismo tiempo que las bicicletas de acero se empezaron a implementar bicicletas de aluminio y como resultado, el aluminio es mucho más ligero que el acero, lo que supone

una mejor maniobrabilidad. Equipos de ciclismo profesionales comenzaron a usar este material en sus bicicletas debido a que alcanzaban velocidades mucho mayores que con los cuadros de acero. Pero claro, no todo eran puntos positivos en el aluminio, como punto negativo era su fabricación, ya que su soldadura era mucho más compleja por lo que se necesitaba a un personal altamente cualificado para una técnicas tan especializadas.



Figura 2.5: Bicicleta de Aluminio

1980: Primeros Experimentos con Fibra de Carbono

Una vez asumido que el aluminio iba a ser una clara alternativa al acero gracias a los avances en soldadura y tratamiento del aluminio. Empezaron a fabricarse modelos de alta gama en fibra de carbono que solo equipos profesionales y alguna personas con un alto poder adquisitivo se podían permitir debido al alto costo del material.

1990 en adelante: Fibra de Carbono y Titánio

A partir de 1990 es cuando la fibra de carbono empezó a ser más común en la competición y en modelos de alta gama debido a su gran ligereza y a su alta capacidad para absorber impactos y vibraciones del suelo. También se comenzó a implementar el titanio que es todavía más resistente y liviano, pero al ser su costo mucho mayor que la fibra de carbono, ha limitado mucho su uso.



Figura 2.6: Bicicleta de Fibra de Carbono

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO



Figura 2.7: Bicicleta de Titanio

A continuación, se muestra una tabla con las principales características de los materiales nombrados anteriormente:

	Dureza Rockwell	Densidad (kg/m ²)	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 ciclismo

3. MATERIAL UTILIZADO: FIBRA DE CARBONO

La fibra de carbono es un material compuesto por filamentos muy finos de átomos de carbono (de entre 5 y 10 micrómetros) que, dispuestos en una matriz, generan una estructura ligera y resistente. Ofrece ciertas ventajas y limitaciones, pero los más destacables son los siguientes:

3.1. VENTAJAS Y LIMITACIONES

VENTAJAS

- Excelente relación resistencia-peso.
- Alta estabilidad térmica y resistencia a la fatiga.
- Capacidad de personalización según la orientación de las fibras.

LIMITACIONES

- Coste elevado debido a su complejo proceso de fabricación.
- Fragilidad frente a impactos.
- Dificultad en la inspección y mantenimiento.

3.2. TIPO DE MATERIAL Y SU ORIENTACIÓN

La fibra de carbono, en su forma de lámina, es un material ortotropo, lo que implica que sus propiedades mecánicas y físicas varían según la orientación de las fibras. Esta característica es esencial para el diseño de estructuras de alto rendimiento, ya que la fibra de carbono exhibe una simetría específica en planos ortogonales, lo que permite una distribución controlada de las propiedades en diferentes direcciones.

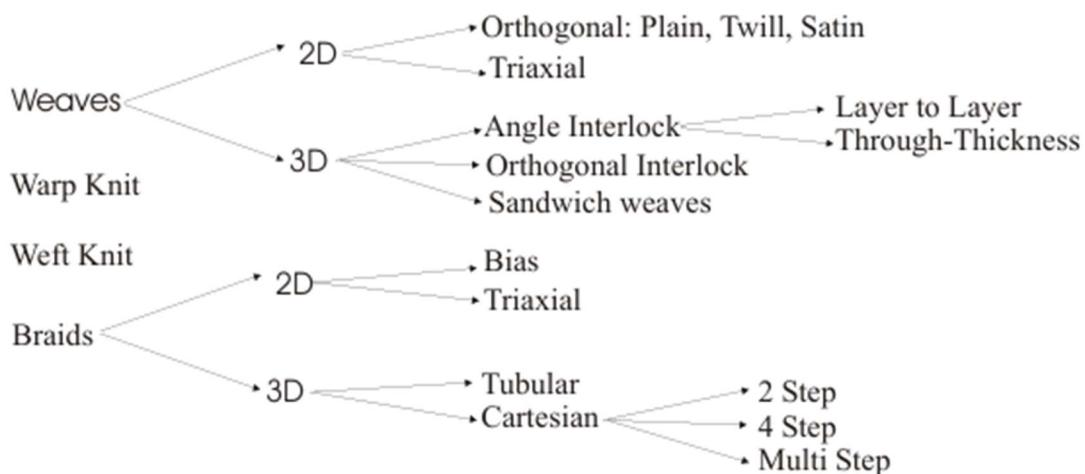
Un material ortotropo se distingue por tener propiedades anisótropas, es decir, sus características no son homogéneas en todas las direcciones espaciales. En el caso de la fibra de carbono, presenta una alta resistencia y rigidez a lo largo de su eje longitudinal, que corresponde a la dirección de las fibras, mientras que en las direcciones transversales (perpendiculares a las fibras), las propiedades mecánicas son considerablemente más débiles. Esta diferencia en el comportamiento mecánico según la orientación de las fibras es un factor clave en el diseño y aplicación de la fibra de carbono en la ingeniería.

El diseño de laminados de fibra de carbono se lleva a cabo mediante la colocación de capas de material en diferentes orientaciones, las cuales son seleccionadas de acuerdo con las exigencias del diseño. Las orientaciones más comunes en los laminados de la fibra de carbono son 0° , $\pm 45^\circ$ y 90° , lo que permite optimizar la resistencia y rigidez en las direcciones específicas que se requieren. En el caso particular del presente estudio, debido a consideraciones estructurales y funcionales que serán expuestas a lo largo de este trabajo, se ha optado por orientar las capas del laminado a 90° , lo que asegura una adecuada distribución de las propiedades mecánicas en las direcciones transversales a las fibras.

3.3. CLASIFICACIÓN DE TEJIDOS (WEAVES) Y TRENZADOS (BRAIDS)

Los materiales compuestos, además de ser clasificados según la técnica de fabricación utilizada, también pueden clasificarse en función de la geometría de la preforma en dos categorías principales: bidimensionales (tejidos) y tridimensionales (briding, trenzados). La distinción clave entre estas dos categorías radica en la disposición y el entrelazado de las fibras, lo que influye en las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de los materiales.

A continuación, se presenta un esquema que, sin entrar en detalles técnicos, proporciona una clasificación general de los textiles utilizados en la fabricación de materiales compuestos, destacando las diferencias en la disposición de las fibras y cómo esto afecta a las propiedades del material.



3.3.1. TEJIDO (WEAVE)

Los materiales compuestos bidimensionales, también conocidos como tejidos, se caracterizan por una disposición de las fibras en dos direcciones principales, generalmente en un patrón plano. Estas fibras se entrelazan de manera que se obtiene una estructura homogénea en términos de orientación, lo que proporciona una resistencia y rigidez en las direcciones del tejido.

En los tejidos planos, las fibras están dispuestas en dos direcciones principales: longitudinal (urdimbre) y transversal (trama). Es así, que las fibras siguen unos patrones específicos: Plain (plano o liso), Twill (sarga), HS (satinado) y Basket (cesta)¹

PLAIN (PLANO O LISO)

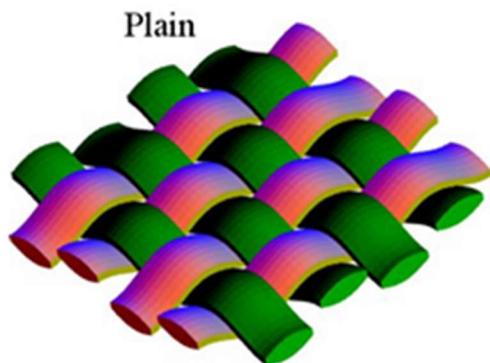


Figura 3.1: Plain Weave

Cada hilo longitudinal pasa por encima y por debajo de cada hilo transversal alternándose. Es el patrón más sencillo y uniforme.

Su principal aplicación es donde se requiere una distribución uniforme de propiedades mecánicas como paneles y carcassas estructurales.

TWILL (SARGA)

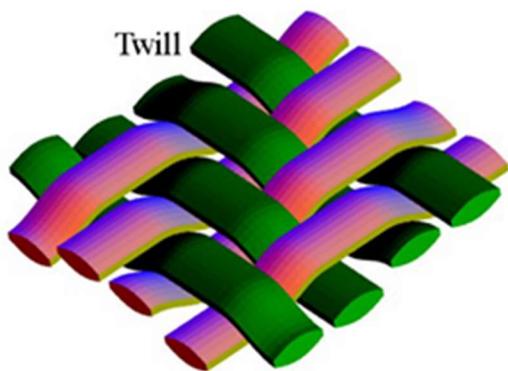


Figura 3.2: Twill

Cada hilo longitudinal pasa sobre dos o más hilos transversales y luego bajo uno, creando un patrón diagonal en la superficie.

Ofrece mayor flexibilidad y resistencia a la deformación que el tejido liso. Se usa en piezas que requieren una mayor adaptabilidad, es decir, es idóneo para formas complejas como tuberías o superficies curvas generalmente.

4 HS (SATINADO DE 4 HILOS)

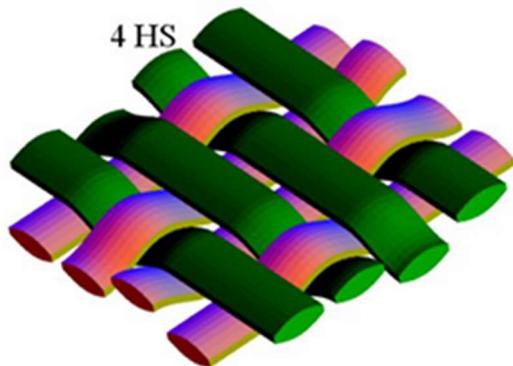


Figura 3.3: 4 HS

Un hilo pasa por encima de tres hilos y luego por debajo de uno, lo que reduce la cantidad de interlazado en comparación con los tejidos anteriores.

Es flexible y suave, ideal para piezas curvas donde se busque reducir la concentración de tensiones

5 HS (SATINADO DE 5 HILOS)

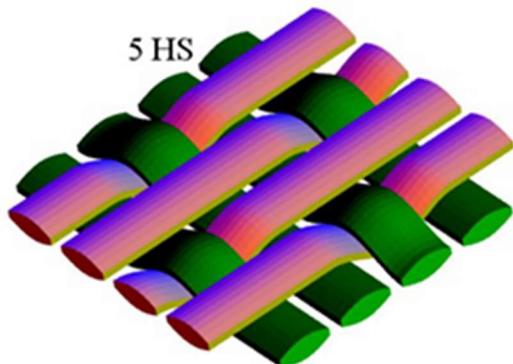


Figura 3.4: 5 HS

Similar al 4 HS, pero ahora un hilo se pasa por encima de cuatro hilos y por debajo de uno, siendo así todavía más suave y flexible.

Es común verlo en componentes aeroespaciales y automotrices donde su principal objetivo es la resistencia y ligereza, pero con menor rigidez.

8 HS (SATINADO DE 8 HILOS)

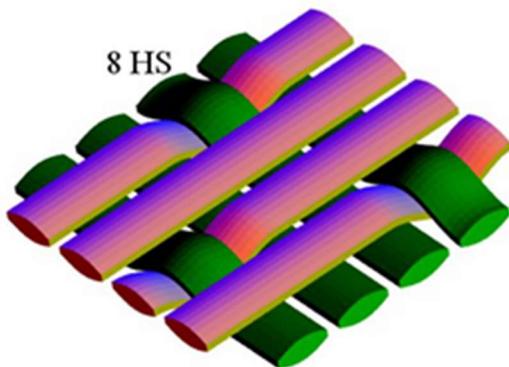


Figura 3.5: 8 HS

Lo mismo que los anteriores, un hilo pasa por debajo de siete hilos y luego por debajo de uno, entonces es todavía mucho más liso y hay menos entrelazamiento.

Este tipo de tejido es ideal para laminados donde la resistencia y la suavidad juegan un papel fundamental, por ejemplo en el sector aeroespacial y marítimo.

BASKET (CESTA)

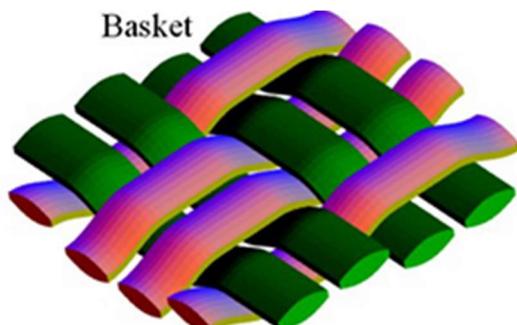


Figura 3.6: Basket

Es una variante del tejido liso, pero con más de un hilo longitudinal y transversal, en la imagen vemos que hay dos y dos.

Ofrece una mayor resistencia al desgaste y aparentemente da un toque más decorativo. Por lo que su principal aplicación es en estructuras que requieren una resistencia adicional y diseño estético.

3.3.2. TRENZADO (BRAIDING)

Los materiales compuestos tridimensionales, o trenzados, conocidos como braiding, poseen una geometría más compleja, en la que las fibras se disponen en tres direcciones. Esta configuración proporciona una mayor integridad estructural y un mejor comportamiento mecánico en todas las direcciones del material, haciéndolos ideales para estructuras sometidas a esfuerzos multidireccionales.

A diferencia de los tejidos, que limitan el entrelazado a un solo plano, los trenzados son capaces de envolver estructuras tridimensionales. Esto los convierte en una opción preferente para componentes de geometrías cilíndricas, tubulares o formas que demandan un refuerzo multidireccional.

Debido a estas propiedades, el braiding encuentra aplicaciones destacadas en tuberías, vigas y otros elementos estructurales, siendo especialmente relevantes en sectores como el automotriz, aeroespacial y marítimo. Además, dentro de los materiales compuestos trenzados se distinguen dos tipos de materiales: 2x2 biaxial braiding (trenzado biaxial), en el que las fibras se entrecruzan en dos direcciones, y el triaxial braiding (trenzado triaxial), que incorpora una tercera dirección, proporcionando un refuerzo aún más completo. Estos avances en la disposición de fibras permiten el desarrollo de materiales innovadores adaptados a exigencias estructurales y funcionales específicas.

2X2 BIAXIAL BRAIDING (TRENZADO BIAXIAL)

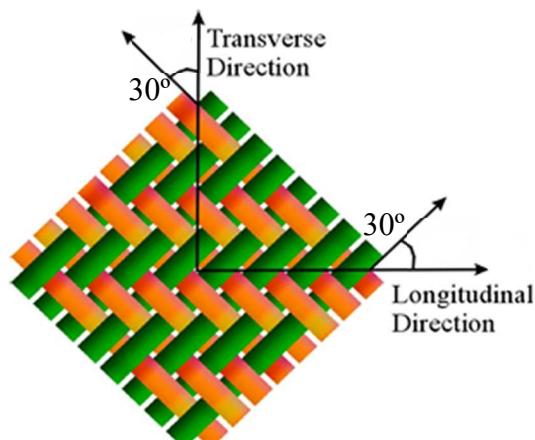


Figura 3.7: Biaxial Braiding

En el trenzado biaxial, como su propio nombre indica, las fibras están dispuestas en dos direcciones principales, longitudinal y transversal, ambas inclinadas formando un ángulo de entrecruzamiento de $\pm 30^\circ$ que hacen formar un patrón repetitivo y uniforme. El término 2x2 indica que dos hilos longitudinales se cruzan con otros dos hilos transversales.

Poseen una gran flexibilidad, aparte de aportar un buen equilibrio resistencia-rigidez en las dos direcciones, lo que le permite amoldarse muy bien a formas complejas durante la fabricación.

Por otro lado, debido al entrecruzamiento entre las fibras su resistencia a fuerzas de corte es muy elevada.

Sus principales aplicaciones son en estructuras tubulares y componentes de chasis en aplicaciones automotrices y aeroespaciales. También tiene una gran aplicación en el sector eólico, concretamente en las palas de las turbinas eólicas y también se aplica en el sector marítimo, concretamente en los cascos de las embarcaciones.

TRIAXIAL BRAIDING (TRENZADO TRIAXIAL)

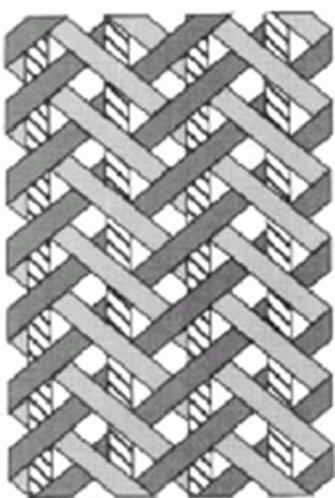


Figura 3.8: Triaxial Braiding

En el trenzado triaxial, a diferencia del biaxial, se añade un tercer conjunto de fibras en la dirección longitudinal del eje principal, que es la encargada de proporcionar rigidez y resistencia unidireccional a la estructura. Luego están los otros dos conjuntos de fibras inclinadas a $\pm 30^\circ$, que se entrecruzan con el conjunto de fibras longitudinales. Esta estructura ofrece un patrón mucho más denso y estable que el anterior.

A comparación del trenzado biaxial, este ofrece una mayor resistencia y rigidez gracias a las fibras longitudinales, pero es menos flexible que el biaxial, por lo que se adapta menos a formas complejas. Ofrece una mayor resistencia a la deformación y es capaz de soportar mayores cargas en múltiples direcciones y a su vez mejora el comportamiento frente a las fuerzas torsionales

y de flexión.

Es idóneo en aplicaciones donde hay que someterse a una combinación de resistencia multidireccional y estabilidad dimensional, siendo así, vigas aeroespaciales, barras de torsión y por lo general en partes estructurales sometidas a esfuerzos complejos. También se puede ver en otros sectores como los productos deportivos (bastones de esquí) y en el sector médico como las prótesis.

3.4. CONCLUSIÓN DEL MATERIAL Y ORIENTACIÓN ELEGIDA

Tras haber analizado los diferentes tipos de tejidos y trenzados, se ha determinado que el material más adecuado para la fabricación de nuestra tija es la **Fibra de Carbono 12K de Trenzado Biaxial 2x2 con un Braiding de $\pm 30^\circ$ y un volumen de fibra del 45%**.

El término 12K se refiere al número de filamentos individuales que conforman cada hebra de fibra de carbono. En este caso, cada hebra estará compuesta por 12.000 filamentos individuales. Este tamaño influye directamente en el peso, espesor y flexibilidad de la fibra de carbono. Por ejemplo, tamaños más pequeños como 1K, 3K o 6K generan fibras más finas y flexibles, mientras que tamaños mayores como 12K, 24K o 50K producen fibras más gruesas, rígidas y robustas. El 12K representa un equilibrio entre resistencia, rigidez y viabilidad para aplicaciones estructurales, lo que lo hace ideal para la tija.

El trenzado biaxial 2x2, por su parte, garantiza un entrecruzamiento de las fibras en dos direcciones principales, lo que aporta un refuerzo multidireccional adecuado para la geometría de la tija. El ángulo de entrecruzamiento de $\pm 30^\circ$ se ha seleccionado para optimizar la distribución de tensiones y garantizar una alta resistencia en condiciones de carga típicas de este tipo de estructuras. Además, el volumen de fibra de 45% asegura un equilibrio adecuado entre las propiedades mecánicas del material compuesto y su peso, evitando una concentración excesiva de fibra que podría comprometer la resistencia a la delaminación.

A continuación, se describen las propiedades elásticas y de fallo correspondientes a la primera capa de fibra de carbono seleccionada para este proyecto, lo que permitirá

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

comprender en detalle las capacidades del material propuesto. Esta configuración asegura un rendimiento óptimo para las exigencias estructurales y funcionales del diseño de la tija, garantizando una solución eficiente y de alto rendimiento.

PROPIEDADES ELÁSTICAS		
E ₁₁ [MPa]	76.100	Módulo elástico en la dirección principal
E ₂₂ [MPa]	18.100	Módulo elástico en la dirección transversal
G ₁₂ [MPa]	12.700	Módulo de corte: esfuerzos de corte en plano 1 y 2
μ [-]	0,18	Coeficiente de Poisson
ρ [kg/m ³]	1.560	Densidad

Tabla 2: Propiedades Elásticas de la fibra de carbono

Estos valores son resultado del comportamiento del material antes del fallo, en su rango elástico, antes de comenzar su plastificación. Por lo general, se realizan mediante ensayos lineales y no destructivos.

PROPIEDADES DE FALLO EN LA PRIMERA CAPA (1 ^{er} PLY)		
X _t [MPa]	76.100	Resistencia a tracción en la dirección principal
X _c [MPa]	18.100	Resistencia a compresión en la dirección principal
Y _t [MPa]	12.700	Resistencia a tracción en la dirección transversal
Y _c [MPa]	0,18	Resistencia a compresión en la dirección transversal
S ₁₂ [MPa]	1.560	Resistencia a los esfuerzos de corte en los planos 1 y 2

Tabla 3: Propiedades de fallo en la primera capa de fibra de carbono

A diferencia de las propiedades elásticas, estos valores son el resultado del estudio de los límites de resistencia del material, es decir, de las tensiones o esfuerzos máximos que puede soportar el material antes del fallo. Las propiedades de fallo requieren ensayos destructivos.

Para evaluar el comportamiento mecánico de la fibra trenzada, se fabricaron piezas de carbono, las cuales, se sometieron a ensayos de tracción y compresión. Con estos ensayos se pudieron obtener valores para las propiedades elásticas y de fallo. Las pruebas fueron realizadas conforme a la norma ASTM 3039/D 3039M, que es la norma estándar reconocida internacionalmente para este tipo de ensayos.

3.5. MATERIAL DEL RESTO DE COMPONENTES DEL SILLÍN

Los materiales utilizados para el resto de componentes son los siguientes:

COMPONENTE	MATERIAL	σ _y [MPa]	E [GPa]
Sillín	Polipropileno (PE)	37	1,3
Abrazadera, Enganche, Tornillos y Varillas	Acero Cromolí	450	210
Tija	Aluminio 6061	270	69

Tabla 4: Material y propiedades del resto de componentes

4. CRITERIO DE TSAI-WU

Para predecir el fallo de materiales compuestos bajo diferentes situaciones de tensiones aplicadas, en nuestro caso, la fibra de carbono, utilizamos el criterio de Tsai-Wu, un modelo muy utilizado en la mecánica de materiales anisótropos que se basa en una aproximación tensorial que combina tanto las tensiones normales como las cortantes. Es especialmente útil para compuestos laminados que presentan propiedades diferentes según la dirección de las fibras. Es un criterio mucho más preciso que otros criterios como el de Von Mises o el de Tresca, especialmente para materiales anisótropos, es decir, materiales donde las propiedades de estos dependen de la dirección en la que se miden dentro del material, ya que el comportamiento del material no es el mismo en todas las direcciones².

4.1. FUNDAMENTOS DEL CRITERIO

La ecuación general del criterio de Tsai-Wu se describe de la siguiente forma:

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j \leq I$$

4.1.1. INTERPRETACIÓN DE LOS TÉRMINOS GENERALES

- $F_i\sigma_i$ viene siendo las contribuciones lineales que reflejan los efectos directos de las tensiones individuales.
- $F_{ij}\sigma_i\sigma_j$ son las contribuciones cuadráticas que consideran interacciones y no linealidades.

4.2. APLICACIÓN DEL CRITERIO A LA FIBRA DE CARBONO

Si aplicamos la ecuación general del criterio de Tsai-Wu a un material compuesto anisótropo como es el caso de la fibra de carbono, el resultado es el siguiente:

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

4.2.1. INTERPRETACIÓN DE LOS TÉRMINOS A LA APLICACIÓN

- σ_1, σ_2 : Tensiones normales en la dirección longitudinal y transversal del material.
- σ_{12} : Tensión de cortadura en el plano principal.
- F_1, F_2 : Coeficientes asociados con las tensiones normales σ_1 y σ_2 . Están directamente relacionadas con la resistencia a tensión y compresión en cada dirección. Estos coeficientes se definen como:

$$F_1 = \frac{1}{x_t} - \frac{1}{x_c} \quad F_2 = \frac{1}{y_t} - \frac{1}{y_c}$$

- F_{11}, F_{22} : Coeficientes asociados con las tensiones cuadráticas σ_1^2 y σ_2^2 . Describe como la resistencia del material se acumula de manera no lineal al aumentar las tensiones tanto de tracción como de compresión. Estos coeficientes se definen como:

$$F_{11} = \frac{1}{x_t x_c} \quad F_{22} = \frac{1}{y_t y_c}$$

- F_{66} : Coeficiente asociado a la tensión de corte cuadrática σ_{12}^2 . Describe la capacidad del material para resistir tensiones de corte. Este coeficiente se define como:

$$F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2}$$

- F_{12} : Coeficiente que representa la interacción entre las tensiones normales σ_1 y σ_2 . Es un término cruzado que describe cómo las combinaciones de tensiones tanto en la dirección longitudinal como transversal afecta al fallo del material. Este coeficiente se define como:

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}}$$

4.3. FORMA DE EVALUAR EL CRITERIO DE FALLO

El modo de evaluar este criterio de fallo es mediante un Coeficiente de Seguridad (CS) que se calcula con la inversa del valor que nos da el criterio de Tsai-Wu, que lo obtendremos directamente de Abaqus. Para validar que nuestra tija es apta el CS tiene que dar mayor o igual a 2 y a su vez intentar que el resto de piezas no se deformen en los ensayos.

$$CS = \frac{1}{TsaiWu} \geq 2$$

5. DISEÑO

Para abordar el diseño completo del sillín, el punto de partida fue un sillín existente proporcionado por el departamento (sin incluir la tija), el cuál se empleará para realizar los ensayos empíricos. Con el objetivo de obtener resultados lo más representativos posible en las simulaciones, se ha buscado replicar en la medida de lo posible las características principales del sillín que será probado en el taller. Este enfoque permite correlacionar los datos obtenidos de los ensayos con los resultados de la simulación, asegurando una mayor validez en el análisis comparativo.

Inicialmente, se consideró como referencia el diseño de un sillín desarrollado previamente por un compañero en su Trabajo din de Máster (TFM). Sin embargo, tras un análisis detallado, no quede completamente satisfecho con ese diseño, lo que me llevó a realizar un rediseño casi completo del sillín. Cabe mencionar que algunos componentes, como la tija y las varillas que soportan el sillín se mantuvieron sin cambios, ya que estos cumplían adecuadamente con los requerimientos funcionales y estéticos del proyecto.

El nuevo diseño busca mejorar aspectos claves como la distribución de esfuerzos, la geometría y la ergonomía, adaptándose mejor a las necesidades del presente proyecto. Para ilustrar los cambios realizados, a continuación, se presentan imágenes comparativas entre el diseño inicial y el rediseño propuesto.

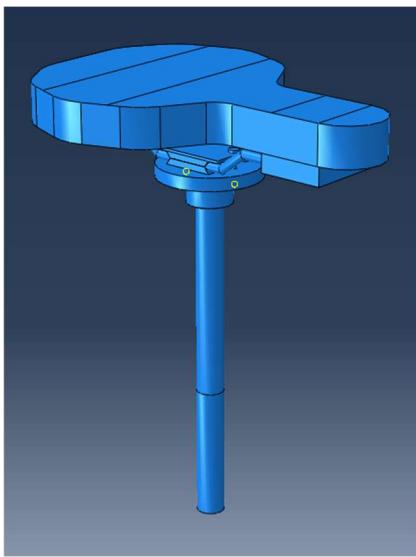


Figura 5.0.1: Diseño Inicial del Sillín

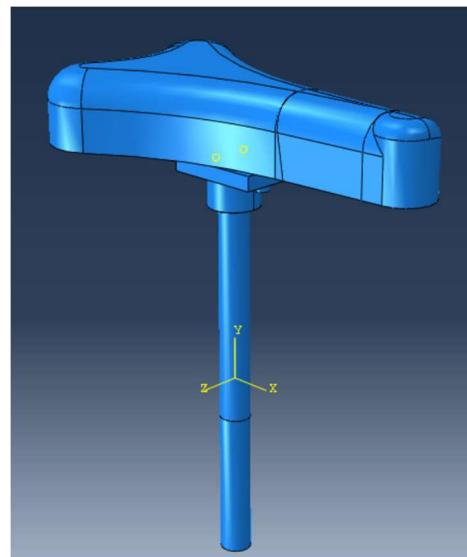


Figura 5.0.2: Rediseño Propuesto del Sillín

5.1. COMPONENTES DEL SILLÍN



Figura 5.1.1: Asiento



Figura 5.1.2.1: Varillas x2



Figura 5.1.2.2: Tornillos de Pretensión



Figura 5.1.2: Componentes



Figura 5.1.2.3: Abrazadera Sillín



Figura 5.1.2.4: Enganche Sillín

5.2. DISEÑO DE LA TIJA

La tija es una pieza intermedia que va alojada entre el cuadro y el sillín. Al ser una pieza más pequeña y simple que con las que conecta, su dimensión depende estas, es decir, el cuadro y el sillín.

Un mal diseño puede originar tanto holgura entre piezas, como un sobredimensionamiento de las piezas que haría que no encajasen, por lo que no se podría montar el sillín.

Para el dimensionado de la tija, es fundamental definir tanto los diámetros exteriores como los interiores, ya que estos determinan aspectos clave de su funcionalidad y resistencia. En cuanto a los diámetros exteriores, estos deben ajustarse con precisión a las dimensiones de las piezas con las que van a encajar, dado que ambos extremos de la tija actúan como elementos de conexión (“machos”) en las uniones. Por el contrario, los diámetros interiores no están sujetos a requerimientos dimensionales estrictos, pero desempeñan un papel crucial, ya que influyen directamente en el espesor de la tija.

El espesor de la tija es un parámetro crítico, ya que afecta tanto a la resistencia como al costo de fabricación. Un espesor excesivamente delgado podría comprometer la resistencia estructural de la tija, provocando su rotura bajo carga, mientras que un espesor demasiado grueso incrementa el peso y el costo del material, haciéndola menos eficiente. Por lo tanto, uno de los objetivos principales de este trabajo es determinar un espesor óptimo que garantice la rigidez necesaria con el menor coste posible.

A partir de las mediciones realizadas en las piezas de conexión, se ha determinado que el diámetro exterior de la tija debe ser de 24,2 mm en la unión con la abrazadera del sillín y medirá 100mm de largo y el diámetro exterior de la unión con el cuadro será de 28,2 mm y medirá 410 mm. Estas dimensiones establecen las pautas para el diseño de la pieza.

Con estos requisitos definidos, se optó por un diseño sencillo y funcional, evitando detalles estéticos o incorporando formas complejas ya que la prioridad es garantizar la funcionalidad y minimizar el peso, cumpliendo con los requisitos específicos del proyecto.

Además, es importante destacar que la fabricación de esta pieza se llevará a cabo en el taller de la Universidad de Zaragoza, que cuenta con herramientas y maquinaria.



Figura 5.2.1: Tija

Al haber dos diámetros diferentes, se ha hecho un diseño con dos zonas diferenciadas. La zona inferior, de mayor diámetro, también va ser la más larga (410 mm). Esto se debe a que la regulación de la altura del sillín se hace con la abrazadera de la tija, moviendo la propia tija, por lo que la altura se puede regular un total de 20 cm.

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 (100 mm).

5.3. DISEÑO DEL RESTO DE COMPONENTES

A continuación, igual que al principio del punto 5, se va a mostrar el diseño de cada pieza comparándolas con las piezas que había inicialmente.

5.3.1. Abrazadera del Sillín

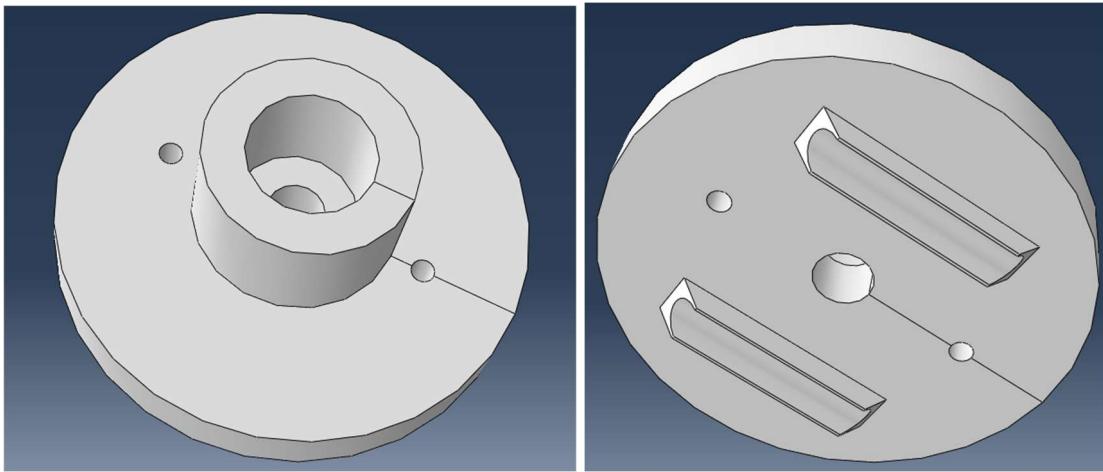


Figura 5.3.1.1: Abrazadera Sillín Original - Vista 1

Figura 5.3.1.2: Abrazadera Sillín Original – Vista 2

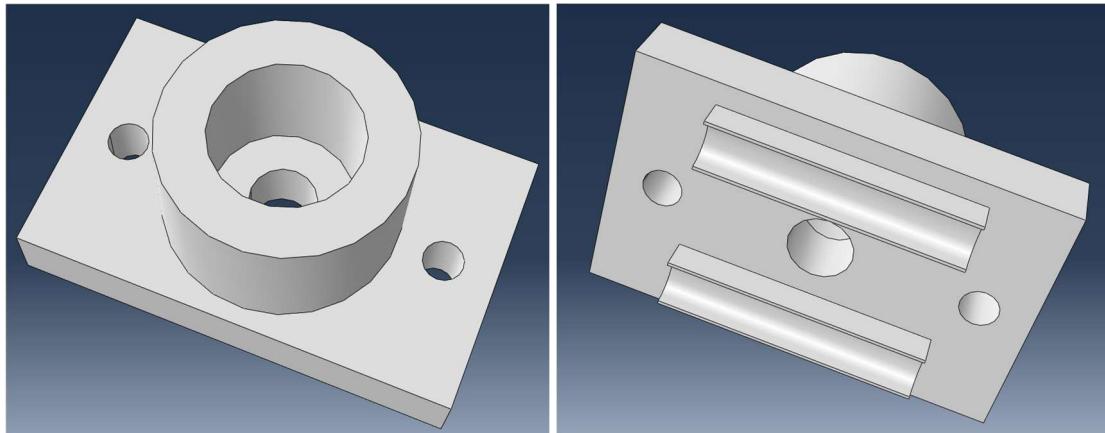


Figura 5.3.1.3: Abrazadera Sillín Nueva - Vista 1

Figura 5.3.1.4: Abrazadera Sillín Nueva – Vista 2

La geometría inicial de la abrazadera no gustó nada, por lo que se hizo un rediseño completo de la abrazadera del sillín, lo único que se mantuvo fue las cavidades donde se introducen los tornillos (agujeros de los lados) que son de 6 mm de diámetro.

5.3.2. Abrazadera del Sillín para simulación

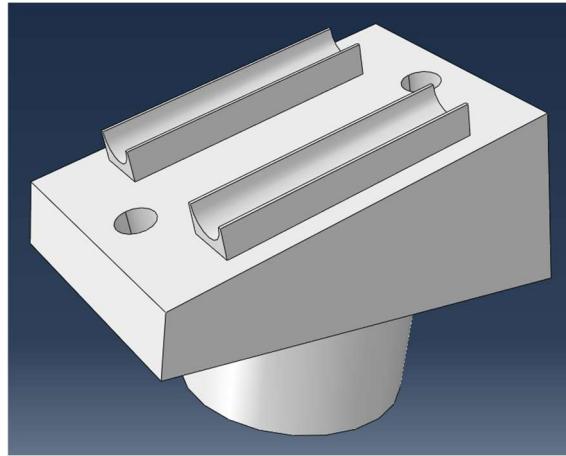


Figura 5.3.2.1: Abrazadera 73° sillín para simulación

Esta abrazadera si ha diseñado con el fin de poder realizar los ensayos con una orientación de la tija a 73° sobre el eje horizontal, esta forma, el sillín se mantiene paralelo al eje horizontal mientras que la tija lleva una cierta inclinación.

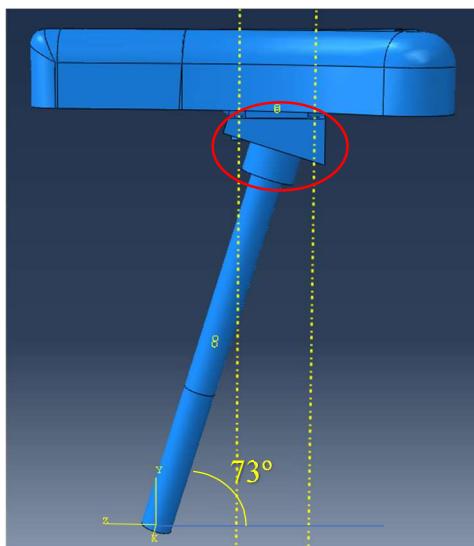


Figura 5.3.2.2: Ubicación Abrazadera 73°

5.3.3. Enganche del Sillín

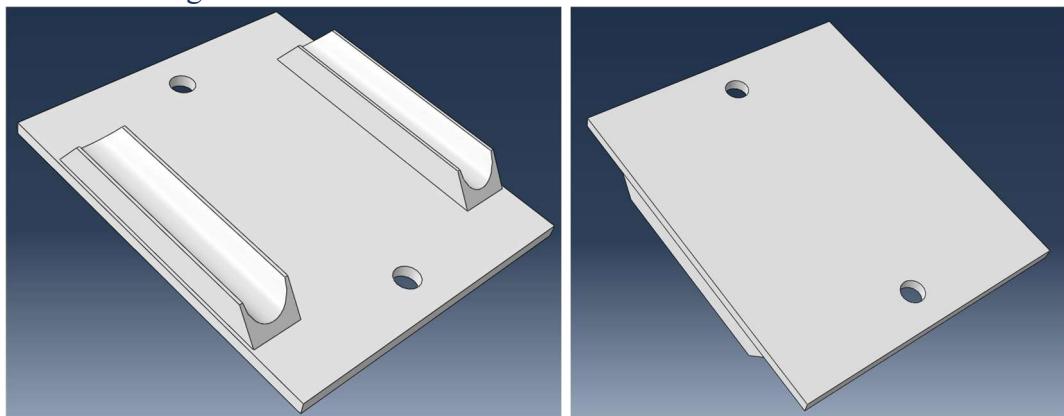


Figura 5.3.3.1: Enganche Sillín Original - Vista 1

Figura 5.3.3.2: Enganche Sillín Original – Vista 2

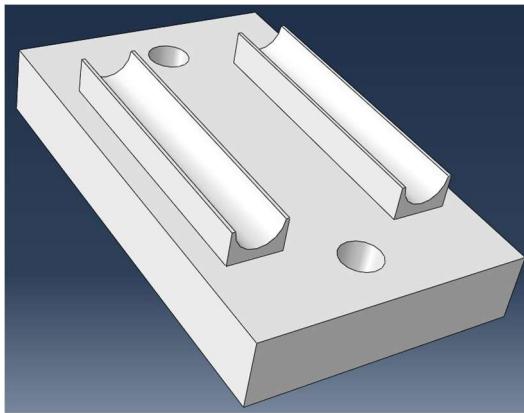


Figura 5.3.3.3: Enganche Sillín Nuevo - Vista 1

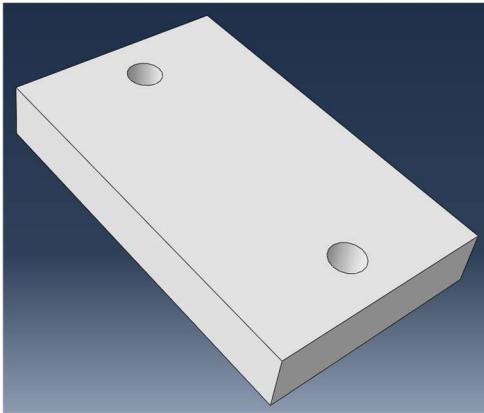


Figura 5.3.3.4: Enganche Sillín Nuevo – Vista 2

La geometría es parecida al original, los cambios que se hicieron fueron principalmente, la reducción del tamaño y por lo tanto la separación entre las cavidades donde se van a poner las varillas será más pequeña y el aumento del espesor del enganche, ya que el original era muy fino y podría ser susceptible a la rotura.

5.3.4. Tornillos de Pretensión del Sillín (x2).

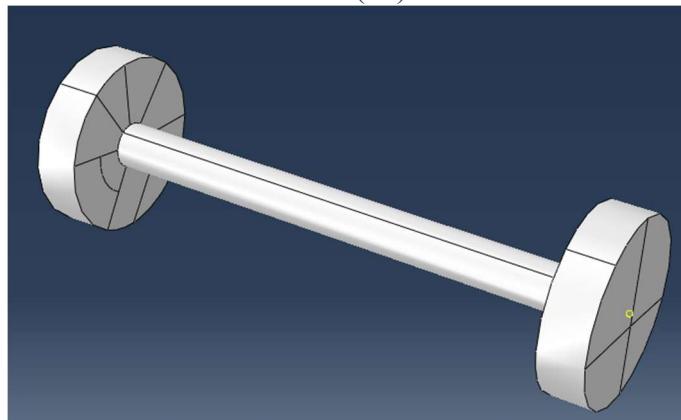


Figura 5.3.4.1: Tornillo de Pretensión Original

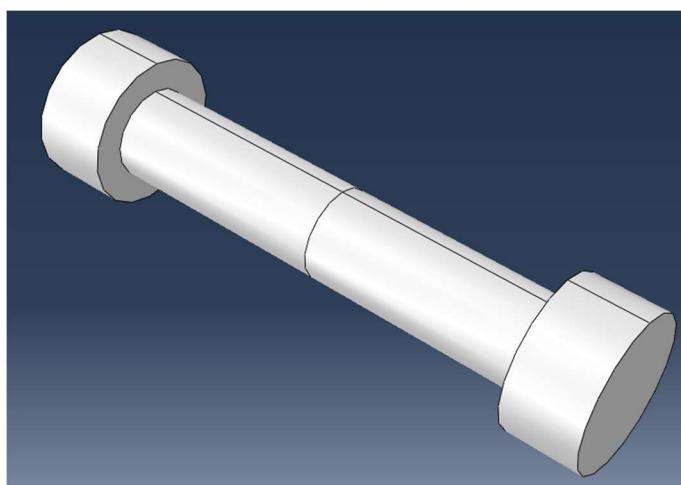


Figura 5.3.4.2: Tornillo de Pretensión Nuevo

El rediseño del tornillo ha sido la modificación más necesaria entre todas las piezas, ya que partía de una cabeza muy fina y una métrica de M2, lo que nos lleva a la conclusión

que el diseño inicial del tornillo está mal diseñado. Por lo que las modificaciones han sido, un aumento de longitud, una cabeza más ancha y aumentar la métrica a M6.

5.3.5. Sillín (Asiento)

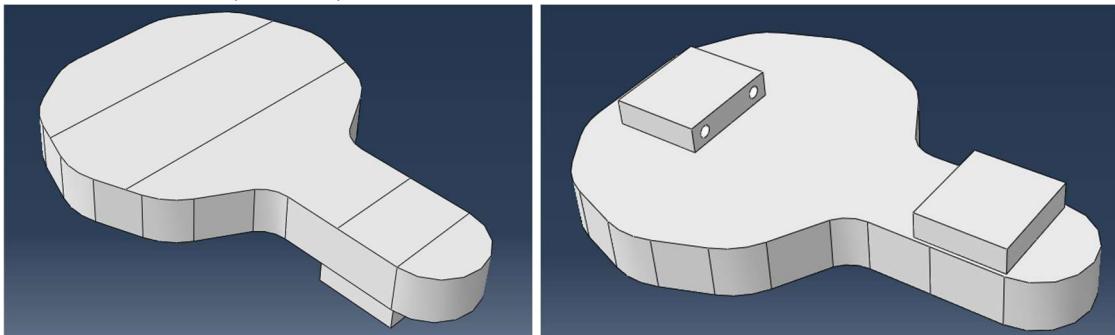


Figura 5.3.5.1: Asiento Original - Vista 1

Figura 5.3.5.2: Asiento Original – Vista 2

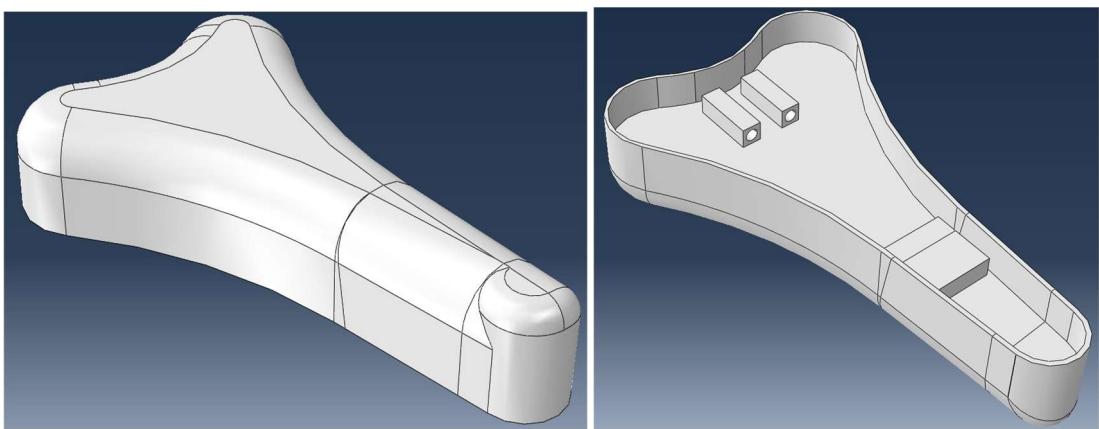


Figura 5.3.5.3: Asiento Nuevo - Vista 1

Figura 5.3.5.4: Asiento Nuevo – Vista 2

Como se puede observar, el nuevo diseño del asiento es el más notorio al resto de piezas. Al igual que en la abrazadera, el diseño original no gustó nada, por lo que se hizo un rediseño totalmente nuevo aproximándose lo máximo posible al sillín de ensayo.

5.3.6. Varillas del Sillín (x2)

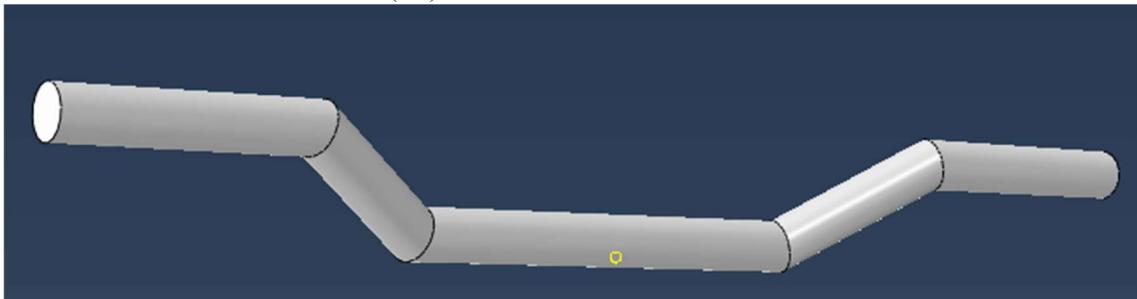


Figura 5.3.6.1: Varilla del Sillín

Junto con la tija, las varillas del sillín han sido las únicas piezas que se han mantenido originales.

6. REQUISITOS LEGALES

El Real Decreto 2406/1985, del 20 de noviembre³, 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. El cuál posteriormente se deroga, con efectos desde el 22 de noviembre de 2014, por Real Decreto 339/2014, de 9 de mayo⁴.

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 necesarios para la validación de la tija.

La validación de la tija se basa en su capacidad para superar el conjunto de ensayos sin experimentar fracturas ni fallos estructurales. Este criterio asegura que la pieza cumple con los requisitos de resistencia y rigidez establecidos en el diseño. Por otro lado, las piezas auxiliares como el sillín, las varillas, la abrazadera, el enganche y los tornillos son componentes ya comercializados, lo que significa que han pasado por sus propios procesos de validación y pruebas de calidad antes de salir al mercado.

Es importante destacar que, durante los ensayos, una fractura o deformación en estas piezas auxiliares no se consideraría como un fallo de la tija en sí. Sin embargo, en caso de que esto ocurriera, sería necesario sustituir el componente dañado para poder continuar los ensayos en condiciones adecuadas. Este procedimiento asegura que las pruebas se realicen bajo escenarios controlados y representativos, minimizando posibles interferencias en los resultados.

Un caso particular que merece mención es el de las varillas situadas debajo del sillín, las cuales son propensas a romperse con el uso prolongado de la bicicleta. Aunque se trata de un comportamiento relativamente frecuente, el objetivo del presente trabajo es garantizar que todas las piezas, incluidas las auxiliares, puedan completar los ensayos sin necesidad de ser reemplazadas. Este enfoque refuerza la robustez del conjunto y evita interrupciones en las pruebas, maximizando la eficiencia y fiabilidad del proceso de validación.

7. ENSAYOS

En todos los ensayos de simulación, se han sustituido las fuerzas de contacto puntual por una presión equivalente en una zona de contacto. Esto se debe a que, al ejercer una fuerza de contacto puntual, los resultados que se obtenían eran unas magnitudes de tensión muy elevadas que no correspondían con una simulación realista del ensayo³.

7.1. ENSAYO DE SEGURIDAD

Para llevar a cabo el ensayo, es imprescindible fijar correctamente la tija al cuadro de la bicicleta, asegurándose de que se introduce hasta la profundidad mínima de inserción especificada por la normativa, que en este caso es de 100 mm. Este paso es crucial para garantizar la seguridad y estabilidad de la unión durante el ensayo.

Una vez que la tija está colocada y asegurada en su posición, se procede a montar el sillín sobre la misma. Con el conjunto completamente ensamblado y verificado, se pueden iniciar los ensayos correspondientes, siguiendo los protocolos establecidos para evaluar el rendimiento y la resistencia de la tija bajo condiciones específicas de carga y uso.

Para comparar resultados, una vez que se haga cada ensayo con la tija de fibra de carbono, se hará el mismo ensayo, pero con una tija de aluminio. Y con ello poder observar el comportamiento de una frente a la otra.

7.1.1. FUERZA VERTICAL

En primer lugar y durante 1 minuto, se aplica una fuerza vertical F_1 a 650N a 25 mm del principio del sillín y posteriormente se retira esa fuerza.

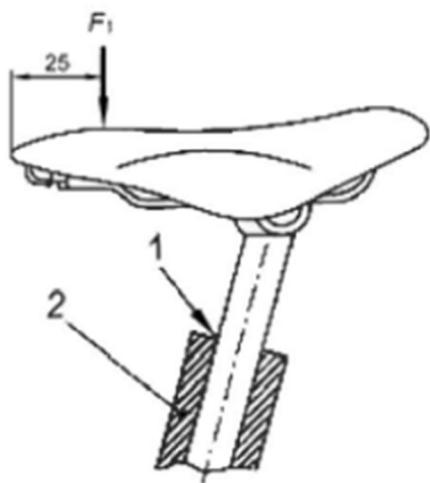


Figura 7.1.1: Ensayo de Seguridad - Fuerza Vertical

7.1.2. FUERZA HORIZONTAL

Ahora se aplica una fuerza horizontal F_2 de 250N en un lateral a 25 mm del principio del sillín durante otro minuto y posteriormente se retira.

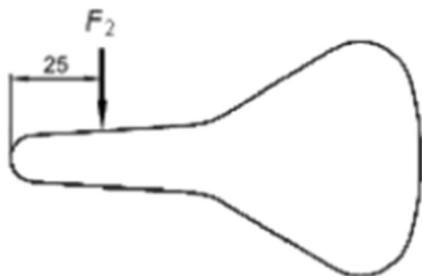


Figura 7.1.2: Ensayo de Seguridad - Fuerza Horizontal

7.2. ENSAYO DE FATIGA

Para este ensayo es necesario anclar la tija en un ángulo que simule la posición de la tija respecto al cuadro, es decir, unos 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 1000N durante 200.000 ciclos y la frecuencia de aplicación no debe superar los 4Hz.

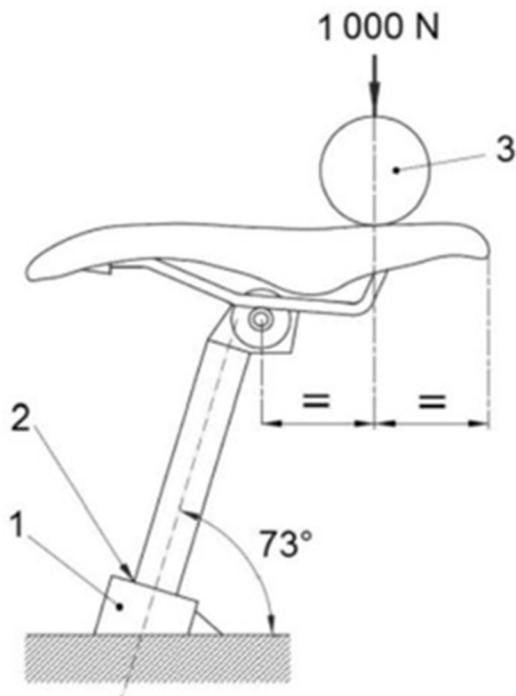


Figura 7.2: Ensayo de Fatiga

7.3. ENSAYO PARA LA ETAPA 1 – ENSAYO DE FATIGA

Al igual que en el ensayo anterior de fatiga, en este también se va a anclar a 73° sobre el eje horizontal. Sobre la abrazadera del sillín hay que anclar una barra a 10° sobre el eje horizontal. A 70 mm aproximadamente de esta barra se tiene que aplicar una fuerza F_3 de 1200 N durante 100.000 ciclos a una frecuencia de 4Hz.

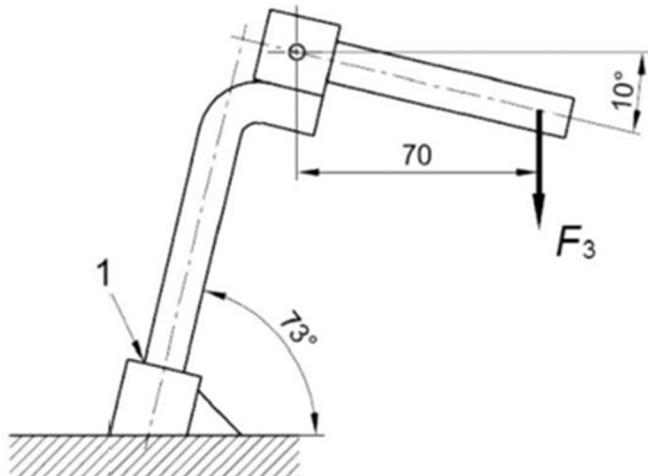


Figura 7.3: Ensayo para la Etapa 1 - Ensayo de Fatiga

7.4. ENSAYO PARA LA ETAPA 2 – ENSAYO DE RESISTENCIA

Se vuelve a colocar la tija a 73° sobre el eje horizontal con la abrazadera del sillín acoplada. Se aplica una fuerza F_4 sobre la abrazadera de 2000 N durante 1 minuto.

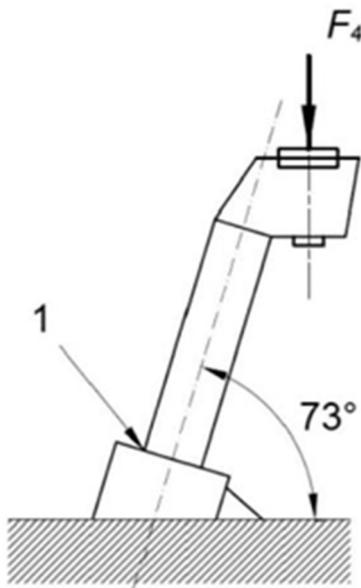


Figura 7.4: Ensayo para Etapa 2 - Ensayo de Resistencia

8. SIMULACIÓN EN SOFTWARE ABAQUS 6.14 – 6

Para abordar el análisis del proyecto, se ha seguido una metodología orientada a la precisión y validación estructural, considerando la resistencia y durabilidad del material compuesto utilizado. Este proyecto se centra en un **cálculo no lineal**, dado que el modelo está sujeto a **grandes desplazamientos** que aparecen debido a los diferentes tipos de cargas que se le van a someter a la tija y a **complejas interacciones** entre los componentes que forman el conjunto.

El análisis se ha desarrollado en dos etapas (steps):

- 1. Step de Pretensión (Prestress):** En esta fase inicial, la condición de pretensión se aplica sobre los tornillos ubicados entre la abrazadera y el enganche, simulando las tensiones iniciales necesarias para garantizar un ajuste óptimo y la correcta transmisión de esfuerzos en el sistema.
- 2. Step de Carga:** En este segundo step, se aplica la carga correspondiente a los ensayos mencionados anteriormente.

8.1. Condiciones de Contorno

Como condición de contorno se ha aplicado un empotramiento (encastre) en los 100 primeros mm de la tija (coloreado en rojo), que simula la distancia que se fija la tija en el cuadro de la bicicleta.

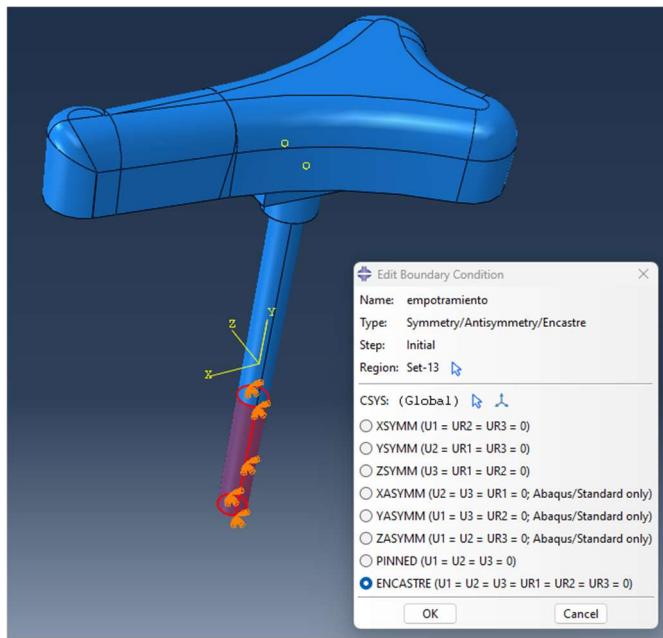


Figura 8.1.1: Condición de Contorno – Empotramiento

8.2. CONTACTOS

Una vez está el sillín completo ensamblado, toca saber que tipo de contacto hay entre componentes, en nuestro caso, no vamos a centrar en dos tipos de contactos: contacto sin deslizamiento (TIE) y contacto con deslizamiento (Fricción).

Para establecer un contacto entre dos superficies hay que saber cuál es la superficie maestra (“master surface”) y cuál es superficie esclava (“slave surface”):

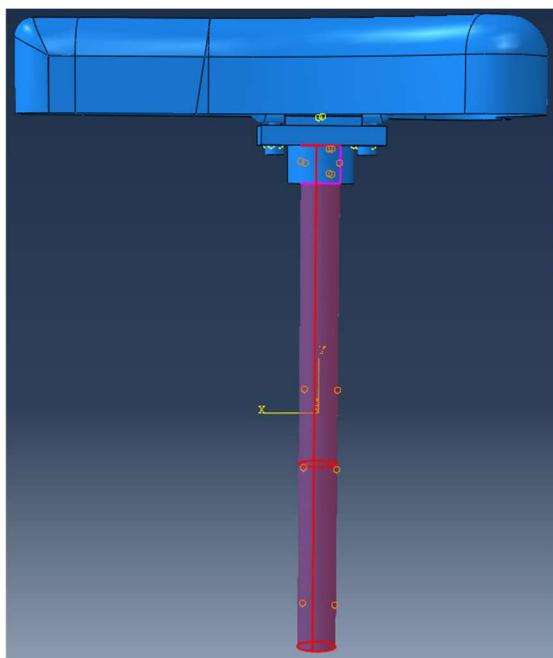
- **Master Surface:** Tanto en contacto con deslizamiento como sin deslizamiento (TIE), la superficie maestra es la superficie que se considera más rígida.
- **Slave Surface:** En el contacto con deslizamiento es la superficie que se desliza sobre la master Surface dependiendo de las condiciones de fricción y la carga aplicada, mientras que en el contacto sin deslizamiento (TIE) es la superficie más flexible que se ajusta a la master Surface sin permitir el deslizamiento.

8.2.1. CONTACTO SIN DESLIZAMIENTO – TIE

Un contacto TIE (TIE Constraint) es un tipo de restricción que se utiliza para unir dos superficies o cuerpos de manera que se comporten como una sola entidad durante el análisis. Se suele usar cuando se quiere modelar situaciones en las que no hay deslizamiento relativo entre dos superficies y tienen que estar adheridas entre sí de manera rígida, sin separación.

A continuación, se va indicar que componentes tienen contacto TIE entre ellos, formando un solo cuerpo, donde la master Surface es de color rojo y la slave Surface es de color rosa fuxia:

Tija – Abrazadera



Toda la superficie exterior de la tija es la superficie maestra mientras que la superficie interior de la abrazadera es la superficie esclava.

Figura 8.2.1.1: TIE Tija - Abrazadera

Varillas – Sillín

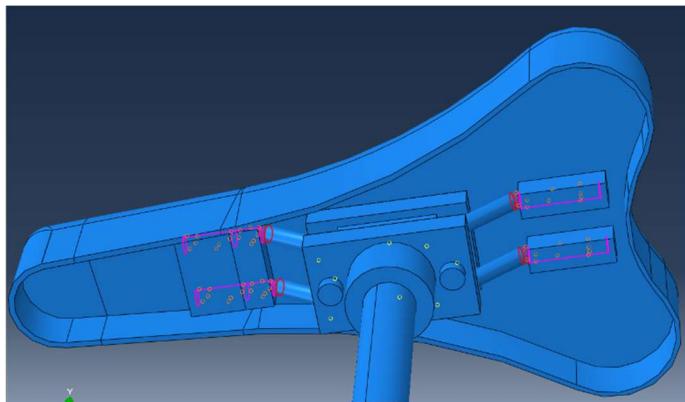


Figura 8.2.1.2: TIE Varillas - Sillín

Las superficies de los extremos de las varillas corresponden a la superficie maestra mientras que las cavidades del sillín donde estas encajan son las superficies esclavas.

Abrazadera – Tornillos

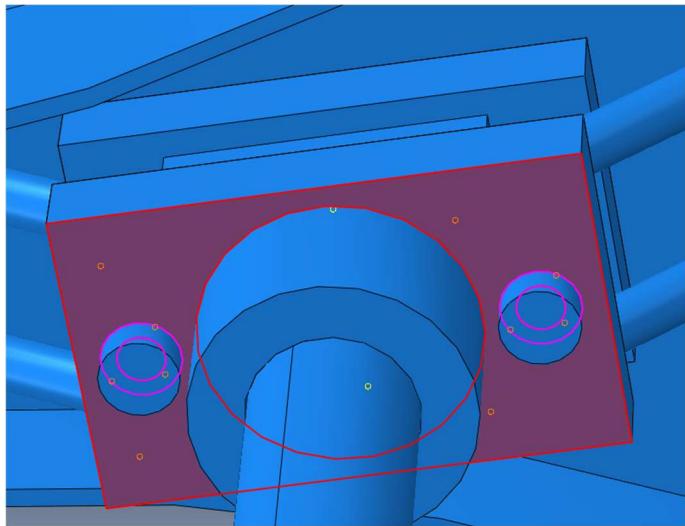


Figura 8.2.1.3: TIE Abrazadera - Tornillos

La superficie inferior de la abrazadera corresponde con la superficie maestra y las superficies de los tornillos que están en contacto con la superficie de la abrazadera son las superficies esclavas.

Enganche – Tornillos

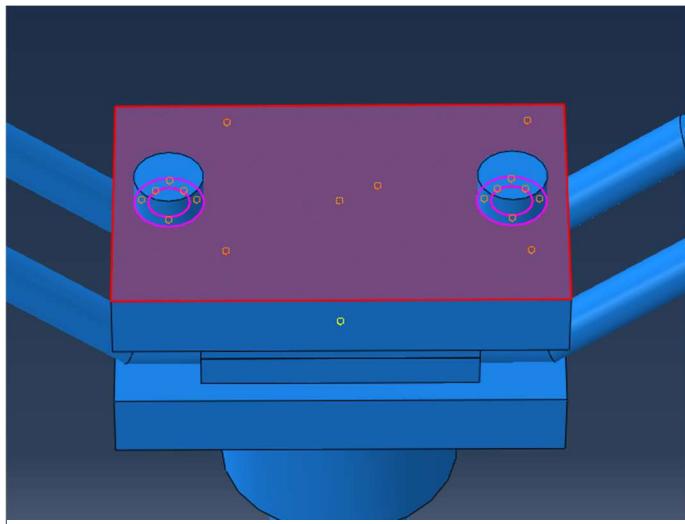


Figura 8.2.1.4: TIE Enganche – Tornillos

La superficie superior del enganche corresponde con la superficie maestra, mientras que las superficies de los tornillos que entran en contacto con la superficie del enganche son las superficies esclavas.

8.2.2. CONTACTO CON DESLIZAMIENTO – FRICTION

El contacto con deslizamiento es un tipo de interacción para modelar la situación en la que dos superficies en contacto pueden deslizarse una respecto a otra. Este tipo de contacto es útil cuando se espera que haya movimiento relativo entre las superficies debido fuerzas de fricción o cargas externas.

En nuestro proyecto únicamente nos encontramos con un tipo de contacto con deslizamientos que es el que hacen las varillas con la abrazadera y el enganche cuando se le aplica la pretensión de los tornillos.

Varillas – Abrazadera – Enganche [Carga: Pretensión de los tornillos]

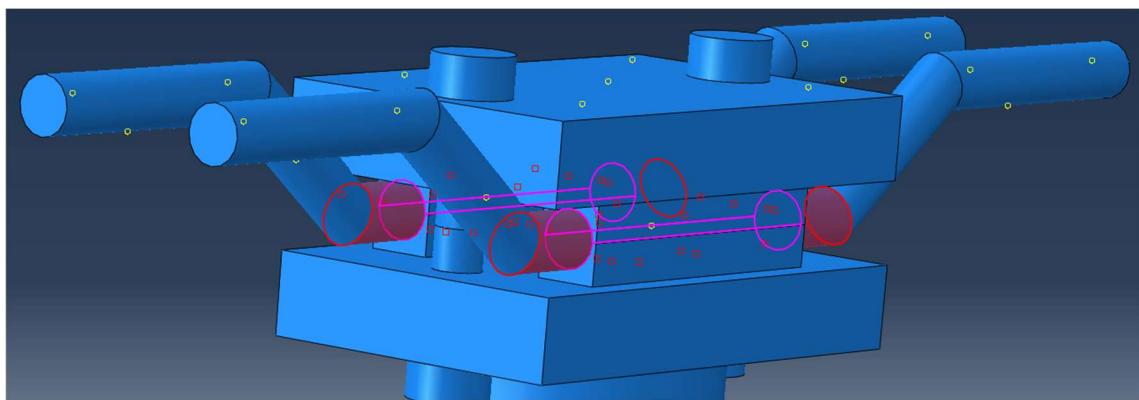


Figura 8.2.2.1: Contacto con Deslizamiento Varillas

Se observa que la superficie maestra es la superficie central de las varillas, y las cavidades donde estas están introducidas son las superficies esclavas, superficies correspondientes a la abrazadera (superficies inferiores) y el enganche (superficies superiores).

A este tipo de contacto se le ha aplicado un coeficiente de fricción de 0,3, lo que significa que las superficies de contacto experimentan una resistencia moderada al deslizamiento, pero no llega a ser un movimiento libre.

En términos físicos, esto significa que la fuerza tangencial máxima que se puede aplicar antes de que las superficies comiencen a deslizarse entre sí es del 30% de la fuerza normal.

Según el modelo de Coulomb, cuando se excede esta fuerza tangencial máxima, las superficies comenzarán a deslizarse unas sobre otras.

$$\text{Modelo de Coulomb: } F_t = \mu \times F_n$$

- F_t : Fuerza Tangencial máxima
- F_n : Fuerza Normal (Fuerza perpendicular a las superficies de contacto)
- μ : Coeficiente de fricción

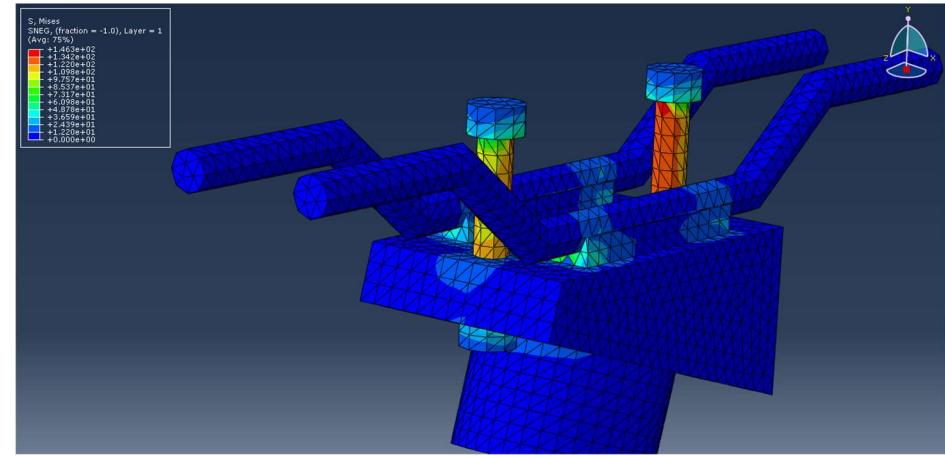
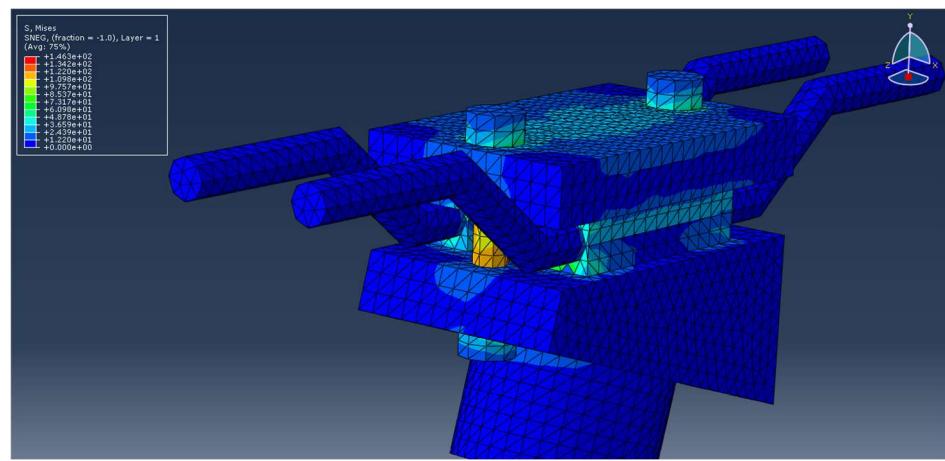
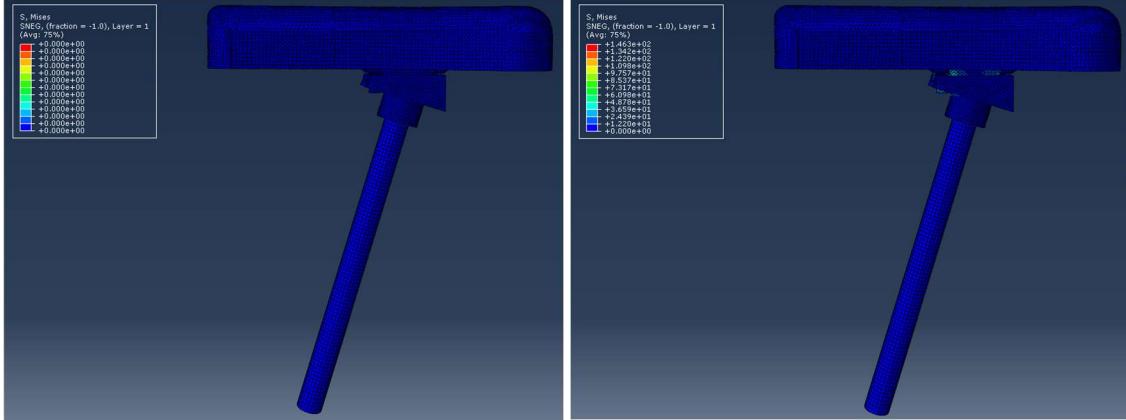
8.3. SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS MEDIANTE SOFTWARE

Para simular los ensayos en Abaqus, primero tenemos que aplicar el orden de los steps, que como se ha mencionado anteriormente, primero está el step de la precarga que se aplica sobre los tornillos, donde se les aplica un par de apriete de 8 Nm (4 Nm a cada uno), que vienen siendo 6 kN de precarga (3 kN por cada tornillo) para las condiciones de un tornillo de M6 de grado 8.8 sin lubricación⁵. Luego en el segundo step, se les aplica a los diferentes tipos de carga que se va aplicar a cada ensayo.

- Ensayo de Fuerza Vertical (Carga de 650 N en la parte delantera superior del sillín)
- Ensayo de Fuerza Lateral (Carga de 250 N en la parte delantera del sillín, sobre un lateral)
- Ensayo de Fatiga (Carga de 1000 N con una frecuencia de 200.000 ciclos a 4 Hz en la parte trasera superior del sillín)
- Ensayo de Fatiga – Etapa 1 (Carga de 1200 N con una frecuencia de 100.000 ciclos a 4 Hz donde se eliminan todos los componentes menos la tija y la abrazadera y se añade una barra que es donde se va a aplicar la carga a 70 mm)
- Ensayo de Resistencia – Etapa 2 (Carga de 1000N donde se eliminan todos los componentes menos la tija y la abrazadera y se aplica la carga sobre la abrazadera)

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

8.3.1. PRETENSIÓN DE LOS TORNILLOS [CRITERIO DE VON MISES]



8.3.2. PRETENSIÓN DE LOS TORNILLOS [CRITERIO DE TSAI – WU]

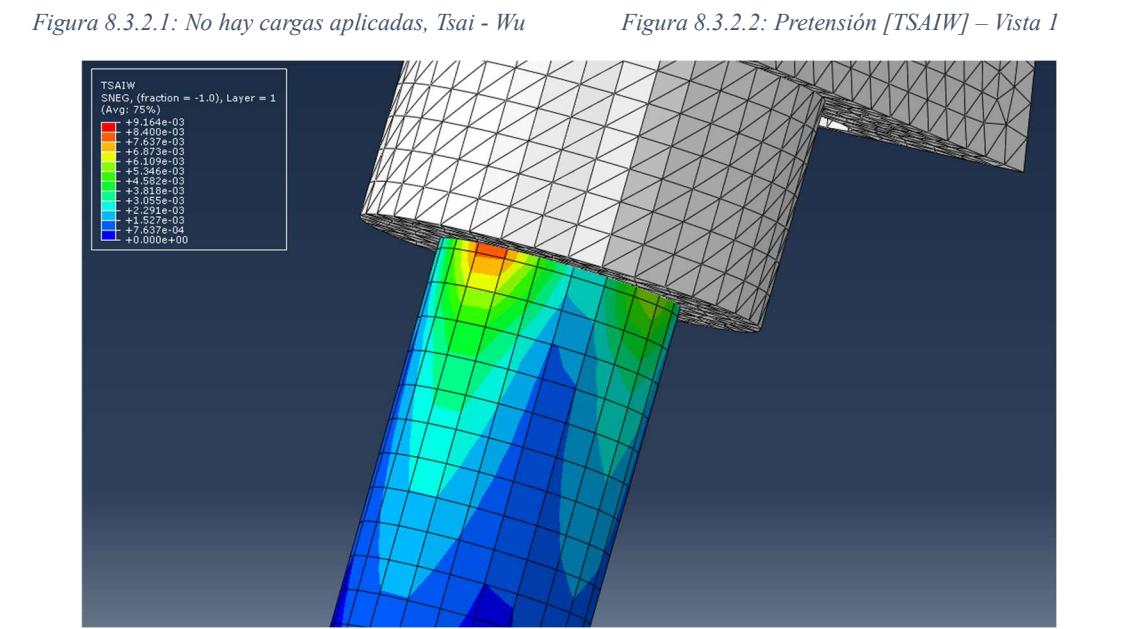
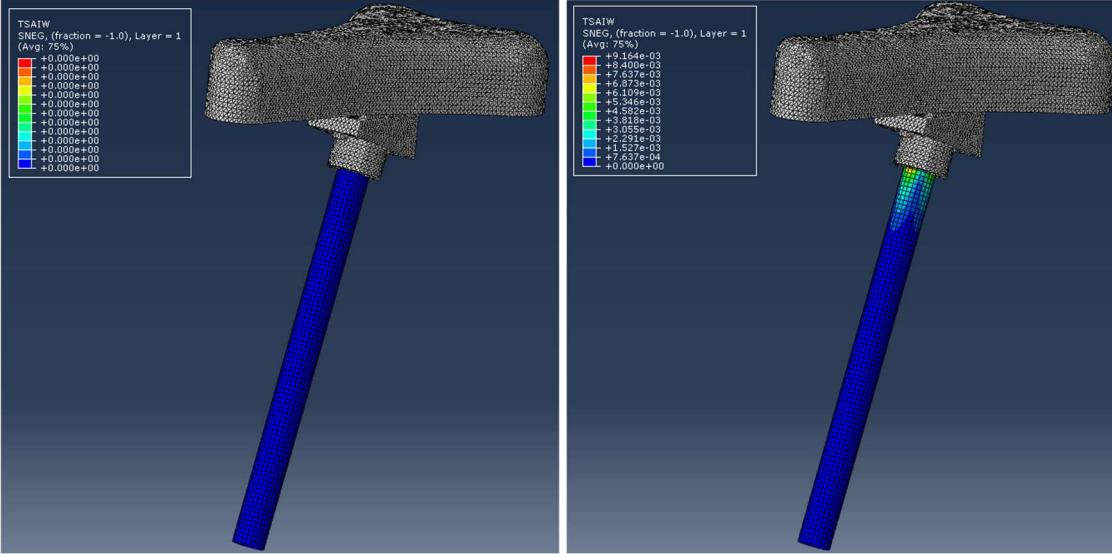
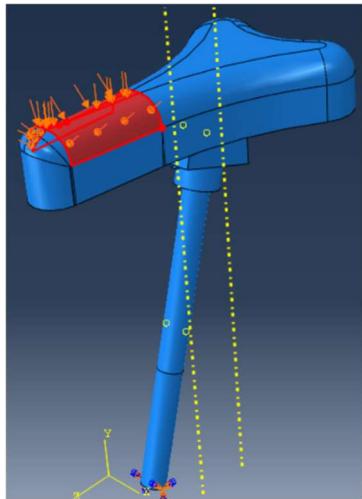


Figura 8.3.2.3: Pretensión [TSAIW] – Vista 2

La pretensión de 8 Nm de los tornillos tanto para el criterio de Von Mises como el criterio de Tsai – Wu es la misma para cada caso de carga.

8.3.3. ENSAYO DE FUERZA VERTICAL Y RESULTADOS



En este ensayo se tiene que aplicar una carga puntual de 650 N, pero por lo comentado anteriormente, aplicar una carga puntual en estos casos, pueden dar resultados muy elevados que no son concordes a lo buscado, por lo que se ha decidido aplicar esa carga pero en la superficie indicada en la imagen (5240 mm^2) y así junto con el valor de la carga nos dará un valor de presión aplicada sobre esa superficie.

$$P = \frac{F}{S} = \frac{650}{5240} = 0.124 \text{ MPa}$$

Figura 8.3.3.1: Aplicación de Cargas
- Ensayo de Carga Vertical

Distribución de Tensiones de Von Mises – Ensayo de Carga Vertical

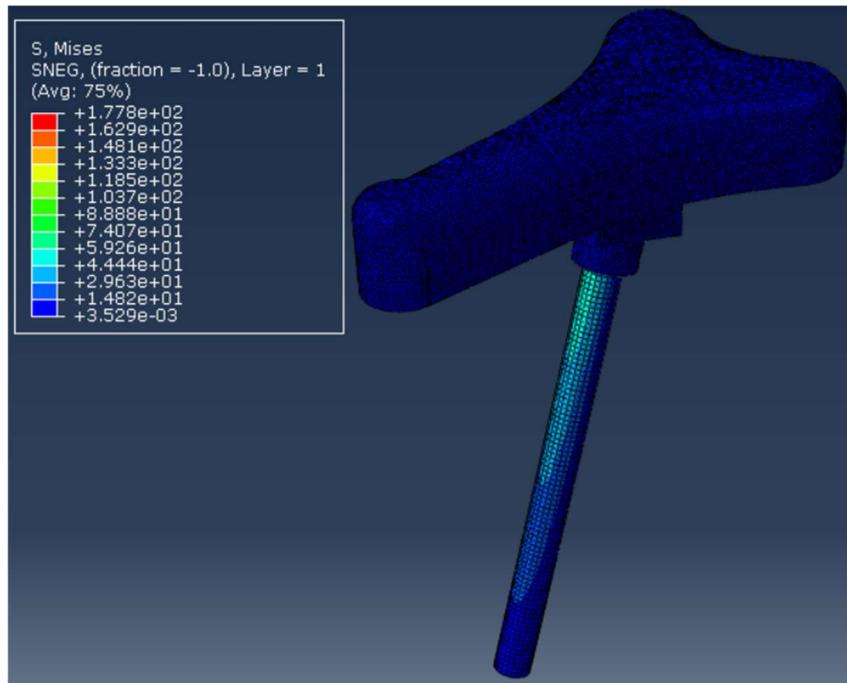


Figura 8.3.3.2: Pretensión + Carga Vertical

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

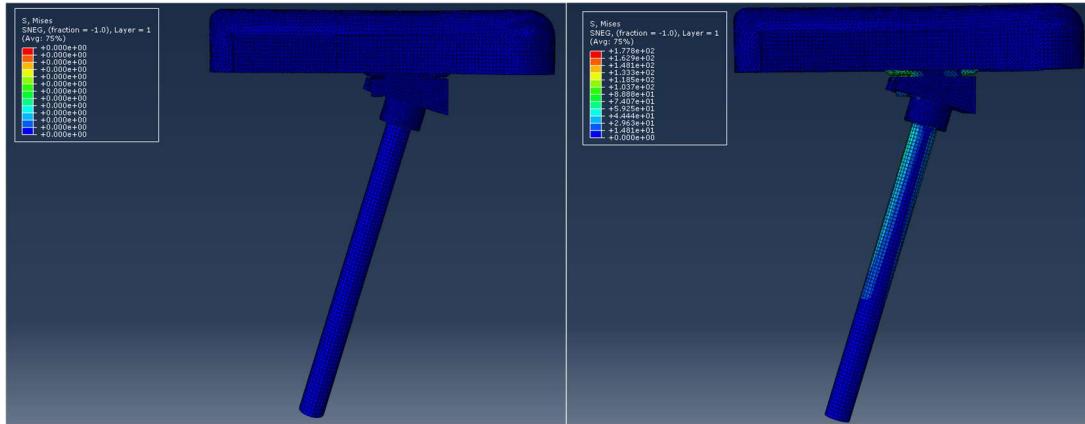


Figura 8.3.3.3: Sin cargas VS Pretensión + Carga Vertical

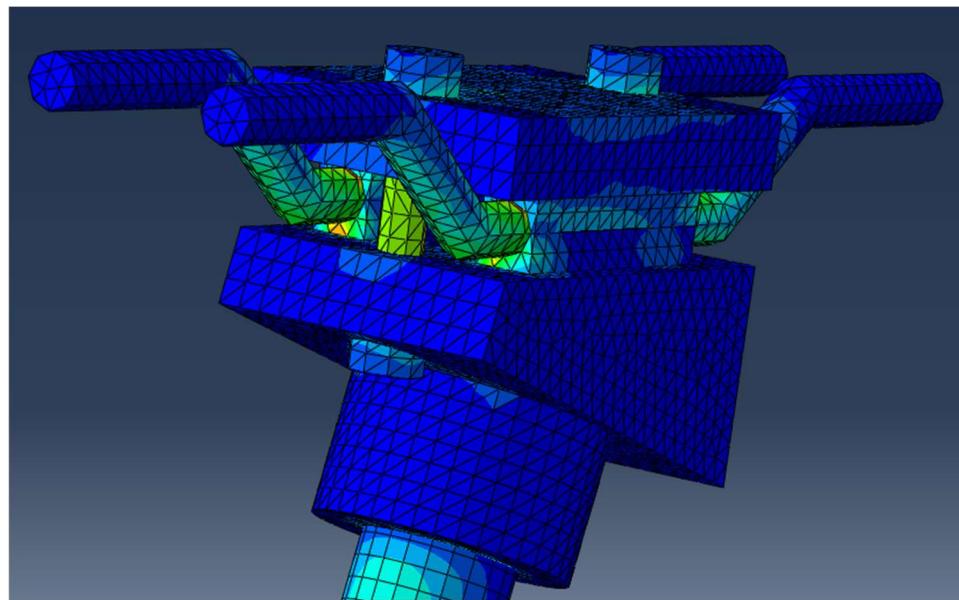


Figura 8.3.3.4: Zona Crítica Tensiones - Ensayo de Carga Vertical

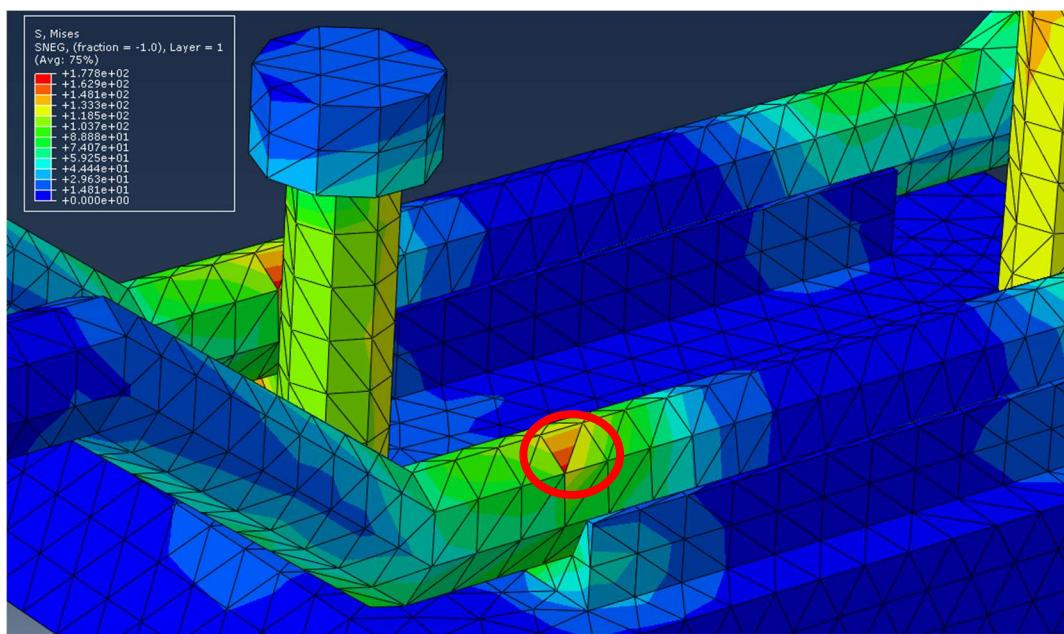


Figura 8.3.3.5: Zona de Máxima Tensión - Ensayo de Carga Vertical

Como se puede observar en la imagen 8.3.3.5, la máxima tensión acumulada se encuentra en la varilla izquierda de acero, acumulando una tensión máxima de 177,8 MPa, por lo que se llega a la conclusión de que la varilla no rompe ya que el límite elástico del acero es de 450 MPa.

Aunque en la tija de fibra de carbono aparezcan tensiones de Von Mises, los resultados son más fiables aplicando el Criterio de Tsai – Wu que se encarga de predecir el fallo en materiales compuestos.

Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Carga Vertical

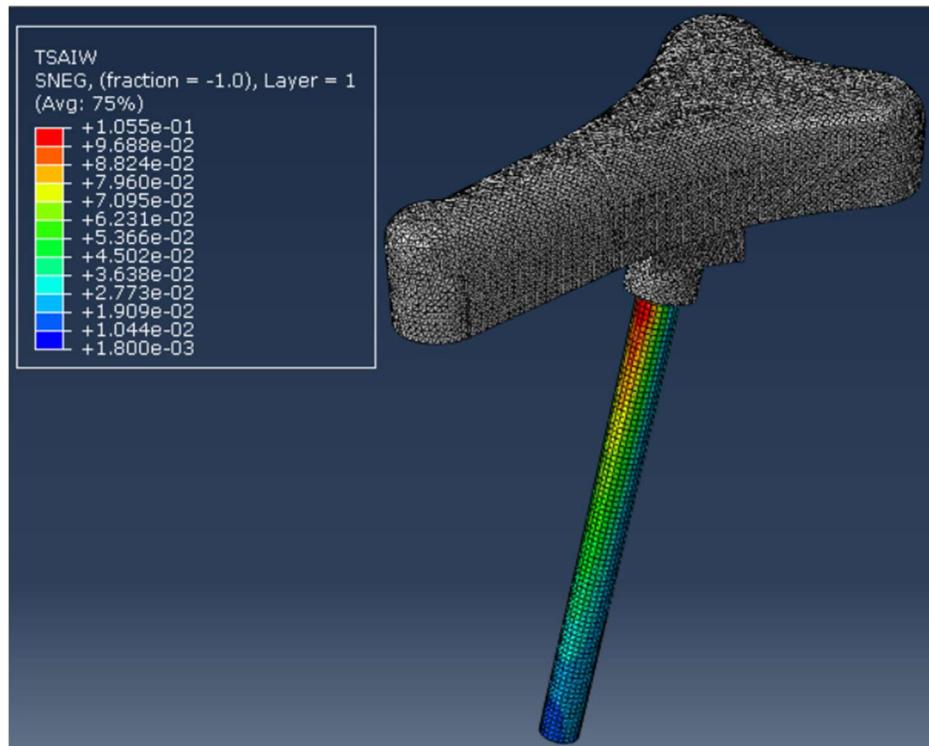


Figura 8.3.3.6: Vista General, Criterio Tsai – Wu – Ensayo Carga Vertical

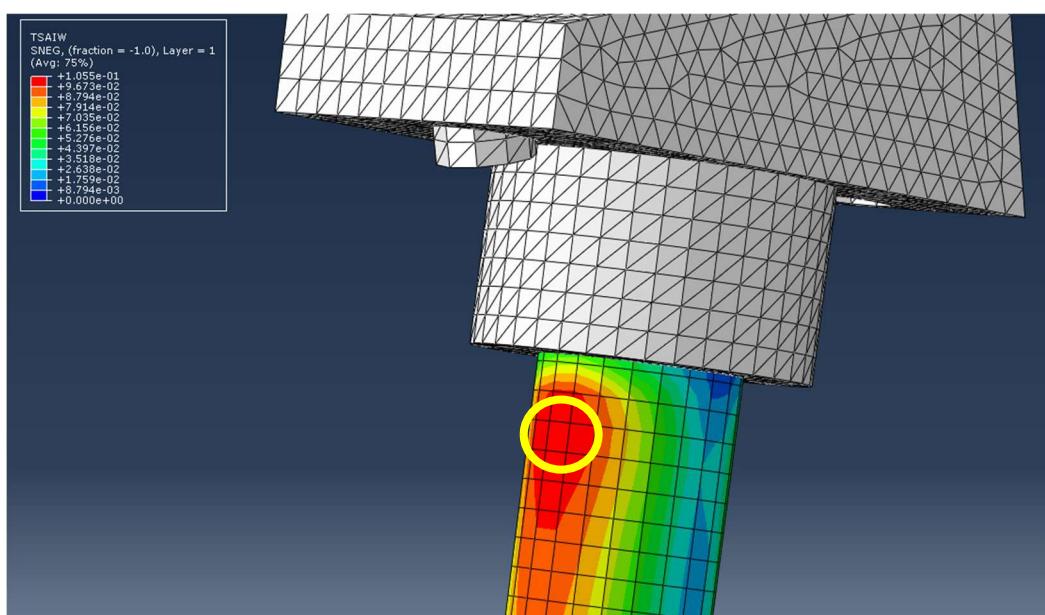


Figura 8.3.3.7: Zona Crítica, Criterio Tsai – Wu – Ensayo de Carga Vertical

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

A la vista de los resultados, el valor máximo de Criterio de Tsai – Wu, es de 0,1055, por tanto su coeficiente de seguridad será:

$$CS_{CV} = \frac{1}{Tsai - Wu} = \frac{1}{0.1055} = 9,4786 \geq 2$$

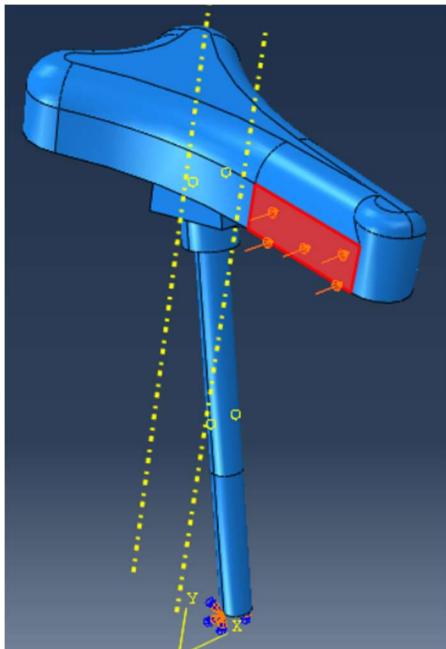
Esto quiere decir que es un ensayo válido ya que el valor del CS es mayor de 2 en su punto más desfavorable.

**8.3.3.1. TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO
[ENSAYO DE CARGA VERTICAL]**

Componente	Tija Fibra de Carbono [MPa]	Tija Aluminio [MPa]	Material	Límite Elástico [MPa]	Resultado [FdC] [Al]
Tija	55,61	44,14	Aluminio	270	✓ ✓
Abrazadera	145,4	117,2	Acero	450	✓ ✓
Enganche	153,1	100,9	Acero	450	✓ ✓
Varilla Derecha	172,2	173,7	Acero	450	✓ ✓
Varilla Izquierda	177,8	176,4	Acero	450	✓ ✓
Tornillo Delantero	138,4	66,68	Acero	450	✓ ✓
Tornillo Trasero	151,8	72,72	Acero	450	✓ ✓
Asiento	2,985	3,014	Polipropileno	30	✓ ✓

Tabla 5: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Carga Vertical

8.3.4. ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL



Para el ensayo de fuerza lateral se aplica una carga puntual de 250 N, que bajo la superficie indicada en la imagen de 1900 mm² equivale a una presión de:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{250}{1900} = 0.1315 \text{ MPa}$$

*Figura 8.3.4.1: Aplicación de Cargas –
Ensayo de Carga Horizontal*

Distribución de Tensiones de Von Mises – Ensayo de Carga Horizontal

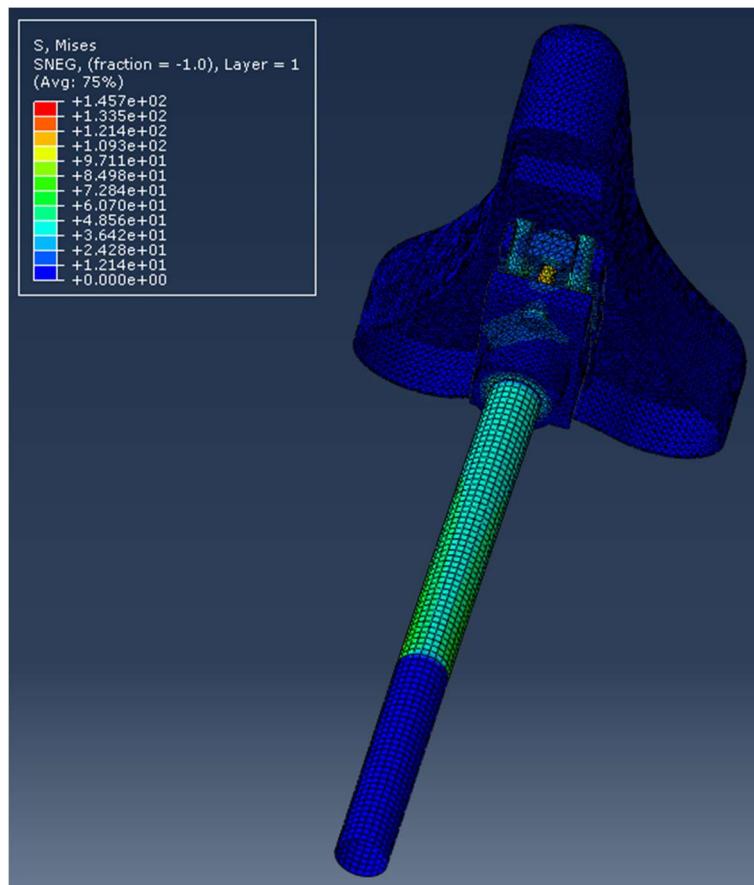


Figura 8.3.4.2: Pretensión + Carga Horizontal

MARCOS GERMÁN CASTILLO

DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

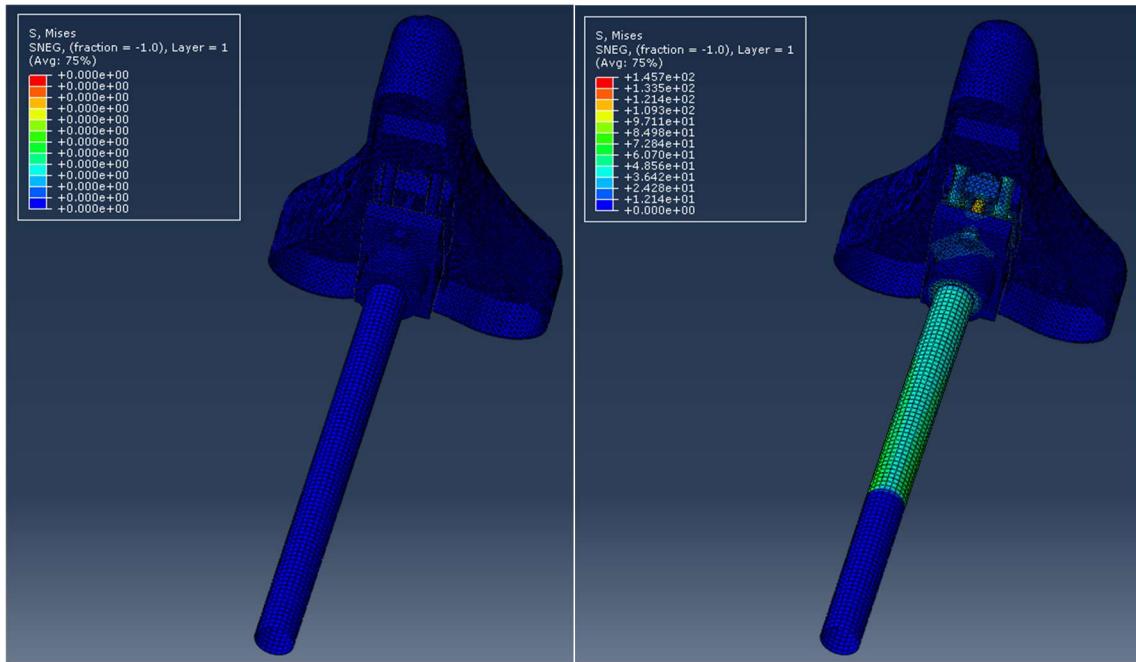


Figura 8.3.4.3: Sin Cargas VS Pretensión + Carga Horizontal

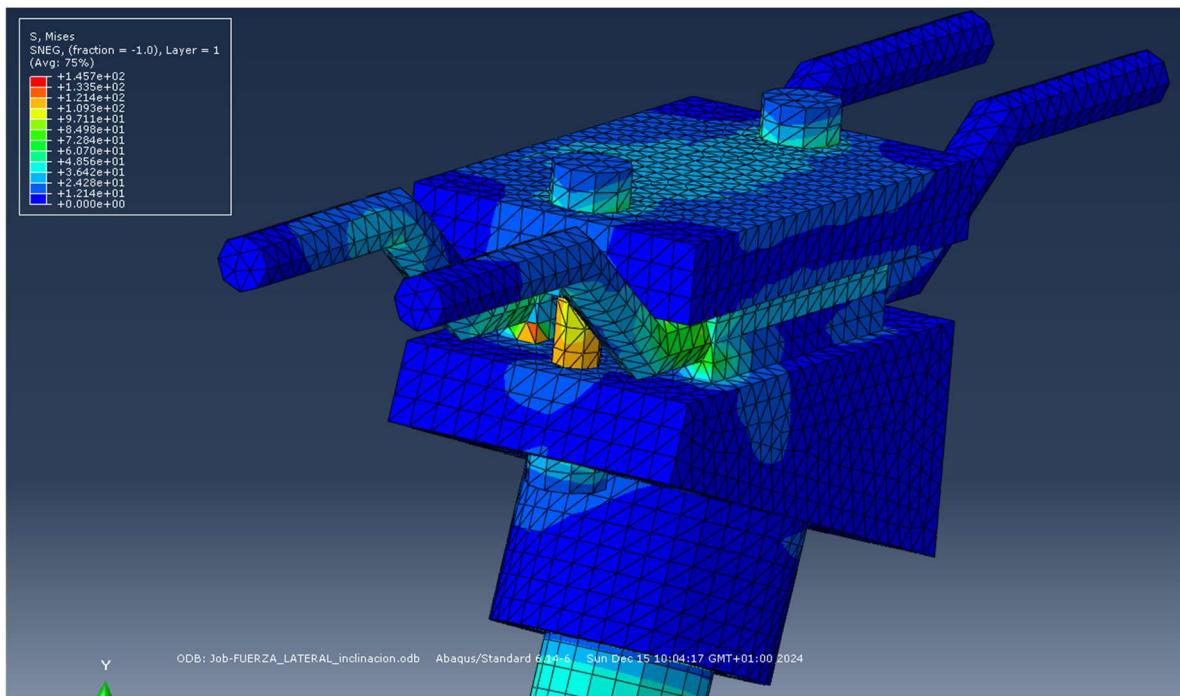


Figura 8.3.4.4: Zona Crítica Tensiones - Ensayo de Carga Horizontal

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

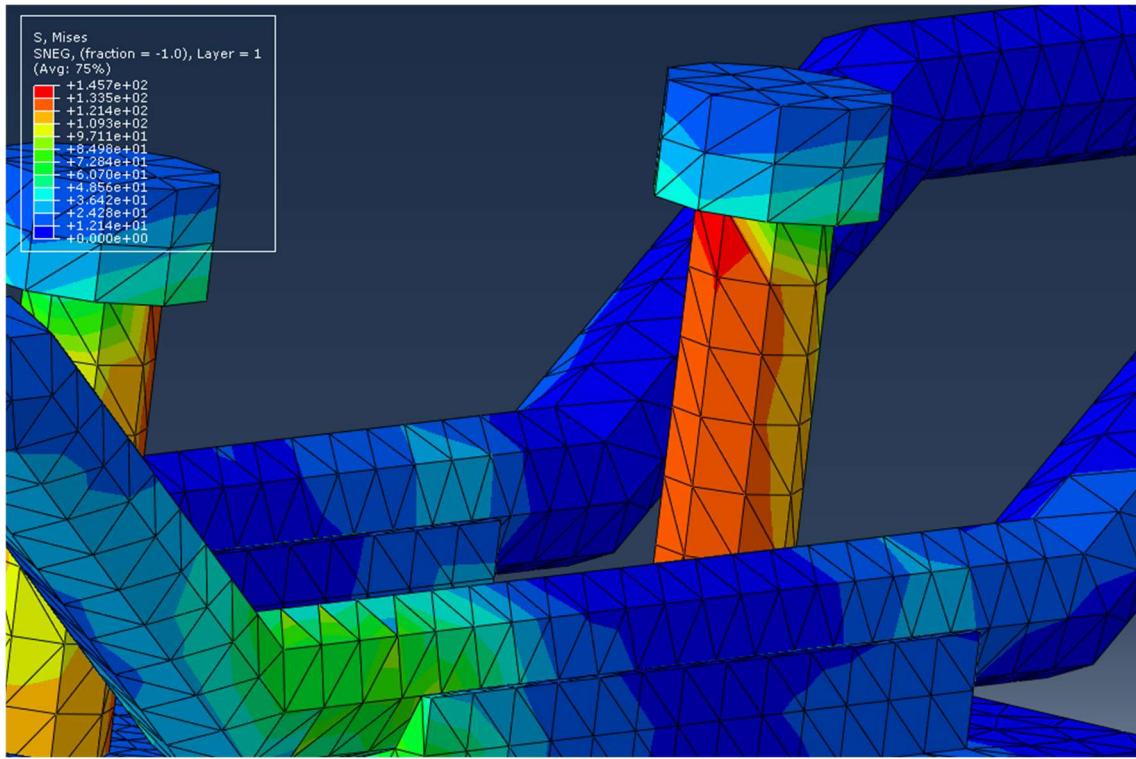


Figura 8.3.4.5: Zona de Máxima Tensión – Ensayo de Carga Horizontal

Como se puede observar en la imagen 8.3.4.5, la máxima tensión acumulada se encuentra en el tornillo trasero de acero, acumulando una tensión máxima de 145,7 MPa, por lo que se llega a la conclusión de que el tornillo no rompe ya que el límite elástico del acero es de 450 MPa.

Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Carga Horizontal

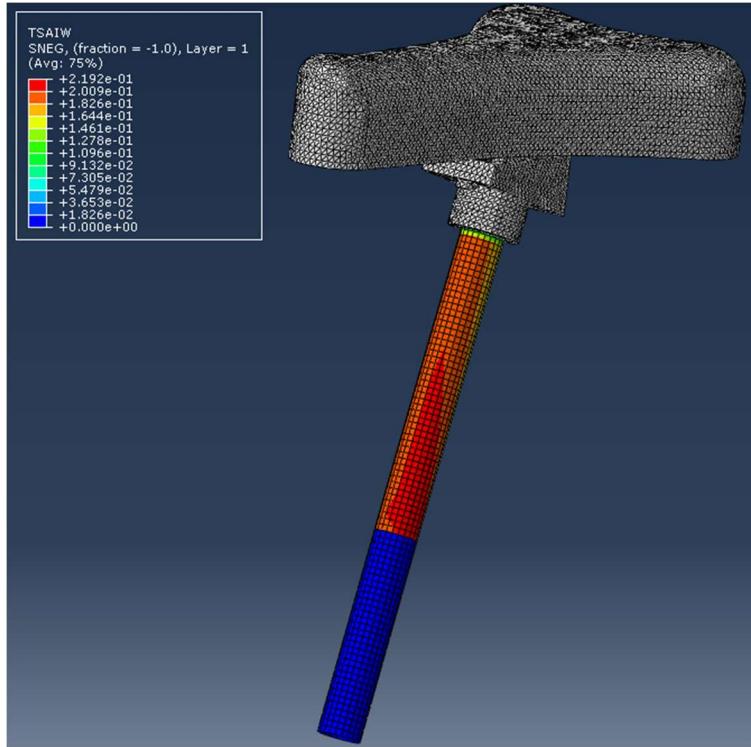


Figura 8.3.4.6: Vista General, Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Carga Horizontal

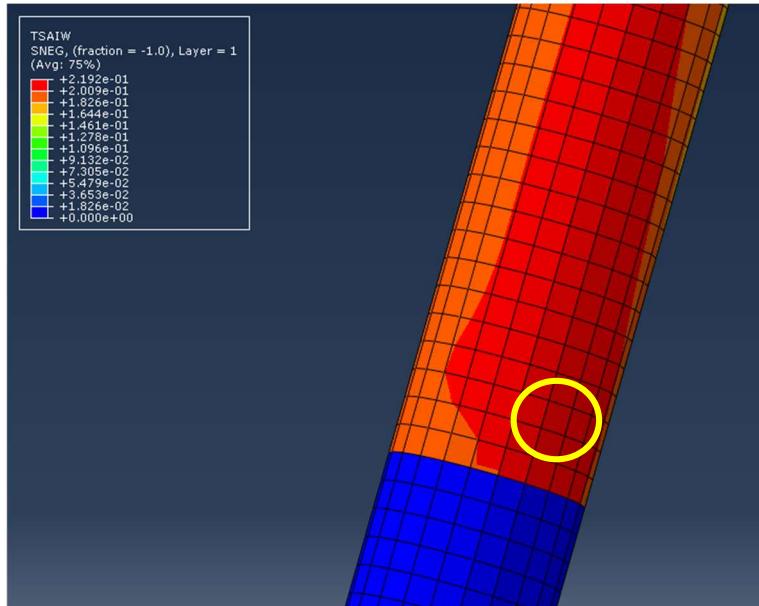


Figura 8.3.4.7: Zona Crítica, Criterio Tsai - Wu - Ensayo de Carga Horizontal

A la vista de los resultados, el valor máximo de Criterio de Tsai – Wu, es de 0,2192, por tanto su coeficiente de seguridad será:

$$CS_{CV} = \frac{1}{Tsai - Wu} = \frac{1}{0.2192} = 4,5620 \geq 2$$

Esto quiere decir que es un ensayo válido ya que el valor del CS es mayor de 2 en su punto más desfavorable.

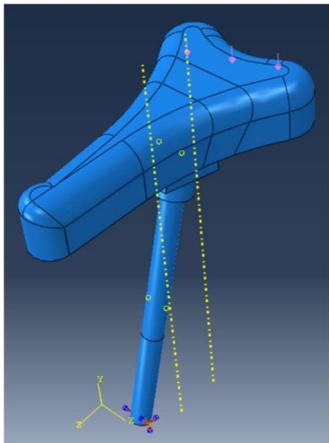
MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

8.3.4.1. TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO
[ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL]

Componente	Tija Fibra de Carbono [MPa]	Tija Aluminio [MPa]	Material	Límite Elástico [MPa]	Resultado [FdC] [Al]
Tija	77,76	44,07	Aluminio	270	✓ ✓
Abrazadera	122,8	145,3	Acero	450	✓ ✓
Enganche	122,6	153,1	Acero	450	✓ ✓
Varilla Derecha	122,2	172,2	Acero	450	✓ ✓
Varilla Izquierda	102,5	177,7	Acero	450	✓ ✓
Tornillo Delantero	139,7	138,4	Acero	450	✓ ✓
Tornillo Trasero	145,7	151,9	Acero	450	✓ ✓
Asiento	9,628	2,985	Polipropileno	30	✓ ✓

Tabla 6: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Carga Horizontal

8.3.5. ENSAYO DE FATIGA



En este ensayo se simula una carga dinámica de 1200 N a 200.000 ciclos de 4 Hz de frecuencia, pero lo vamos a simplificar a una carga estática de 1000 N aplicada durante 1 minuto. Esta carga aplicada sobre la superficie de la imagen de aproximadamente 4000 mm^2 nos da una presión de:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1000}{4000} = 0.25 \text{ MPa}$$

Figura 8.3.5.1: Aplicación de Cargas – Fatiga

Distribución de Tensiones de Von Mises – Ensayo de Fatiga

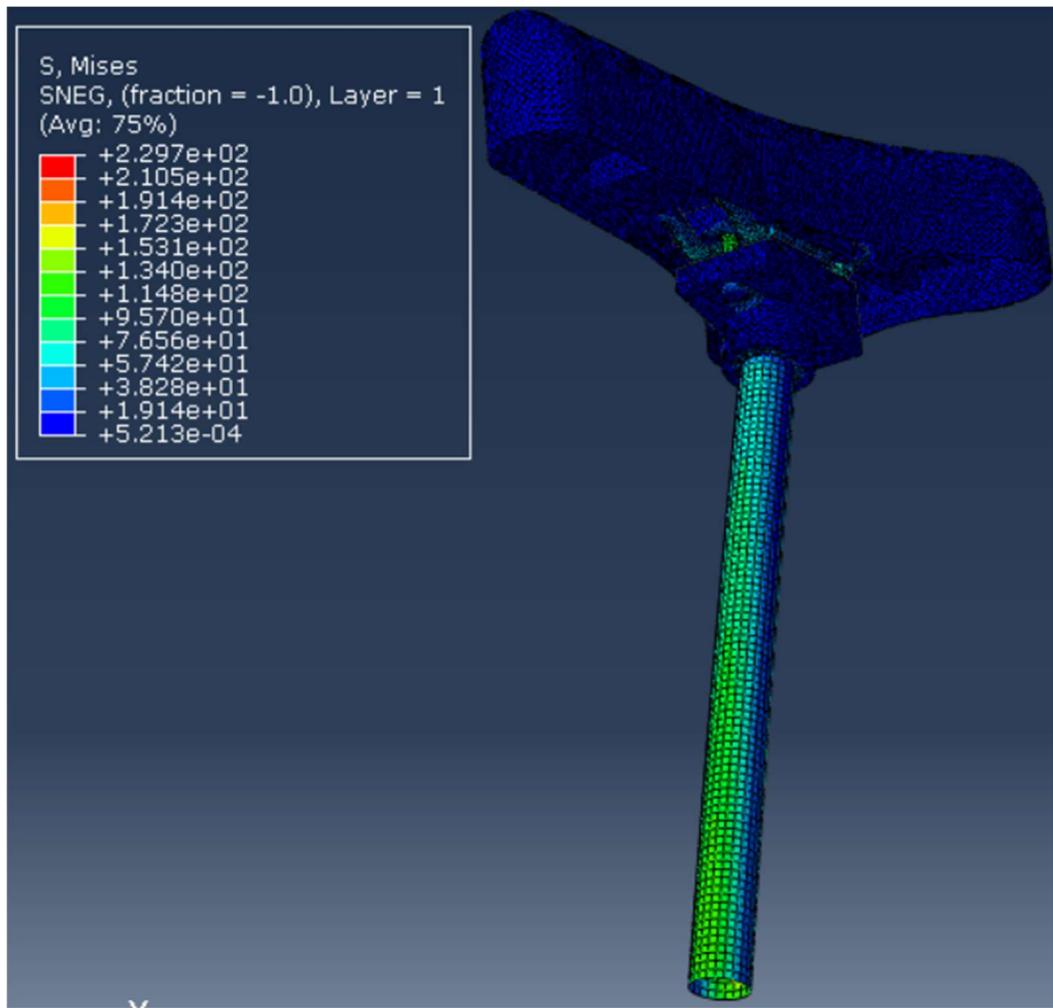


Figura 8.3.5.2: Pretensión + Fatiga

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

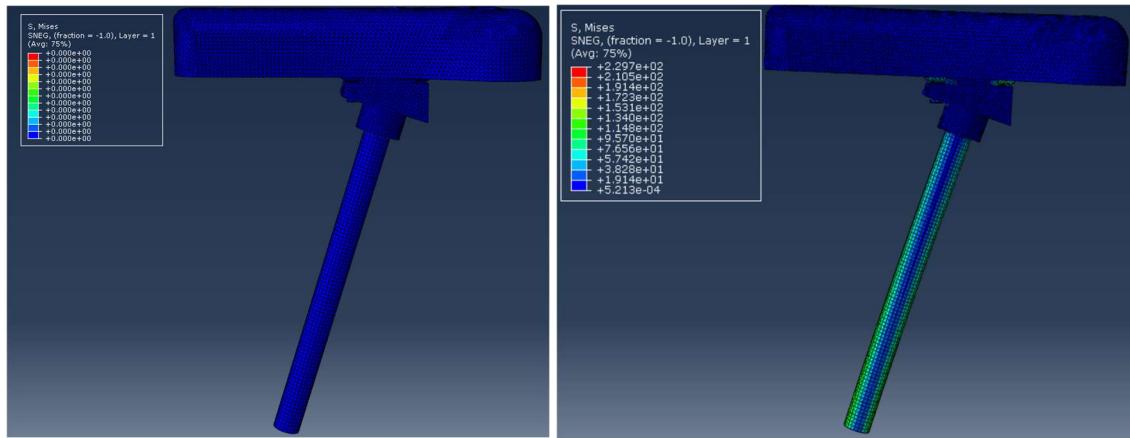


Figura 8.3.5.3: Sin Cargas VS Pretensión + Fatiga

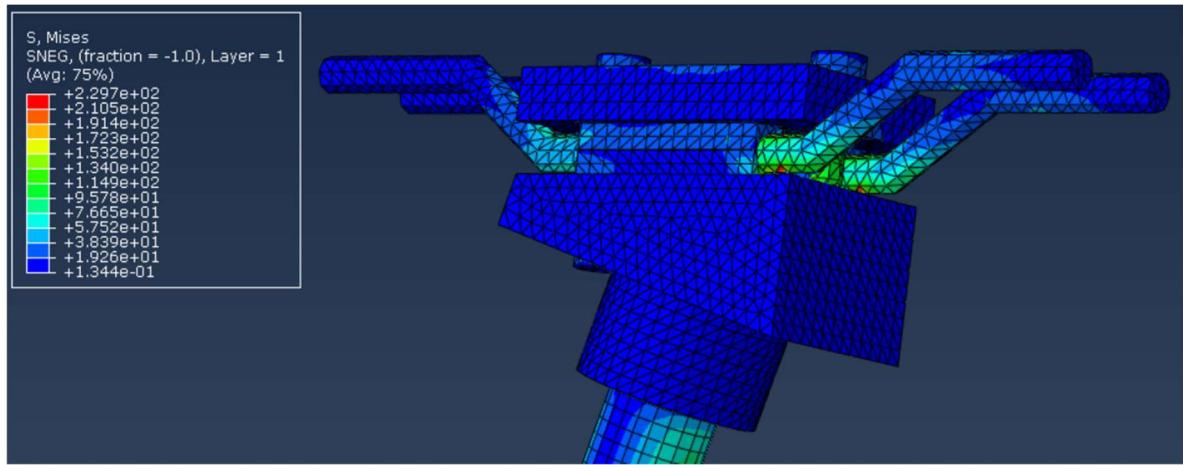


Figura 8.3.5.4: Zona Crítica Tensiones - Ensayo de Fatiga

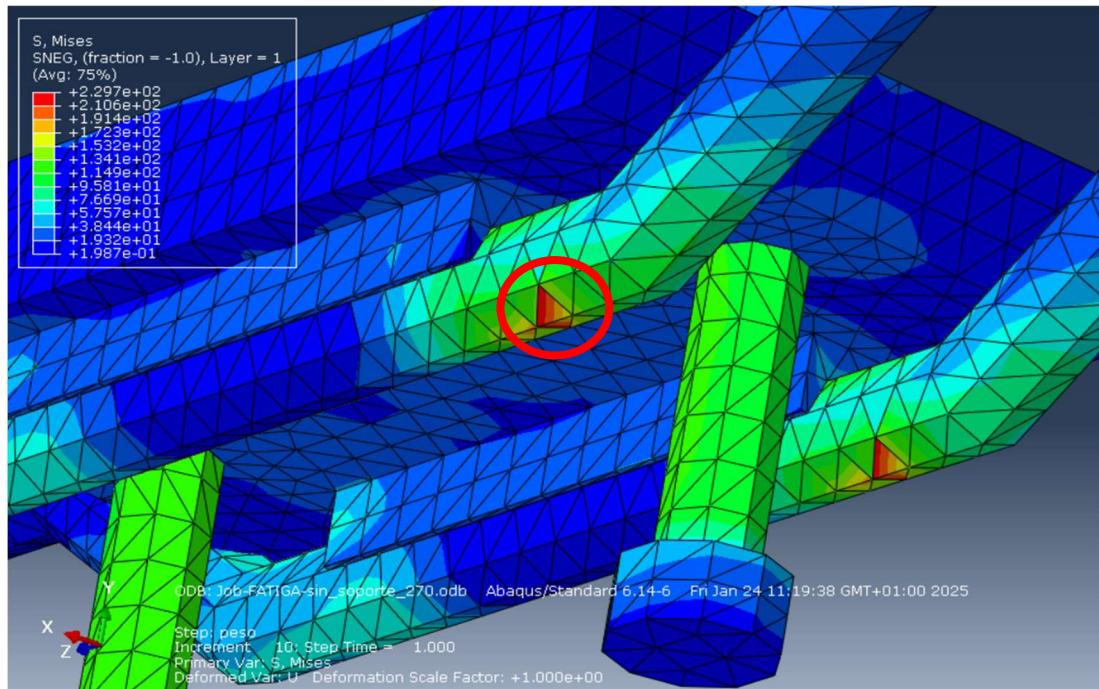


Figura 8.3.5.5: Zona de Máxima Tensión – Ensayo de Fatiga

Como se puede observar en la imagen 8.3.5.5, la máxima tensión acumulada se encuentra en la varilla izquierda de acero, acumulando una tensión máxima de 229,6 MPa, por lo que se llega a la conclusión de que la varilla no rompe ya que el límite elástico del acero es de 450 MPa.

Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga

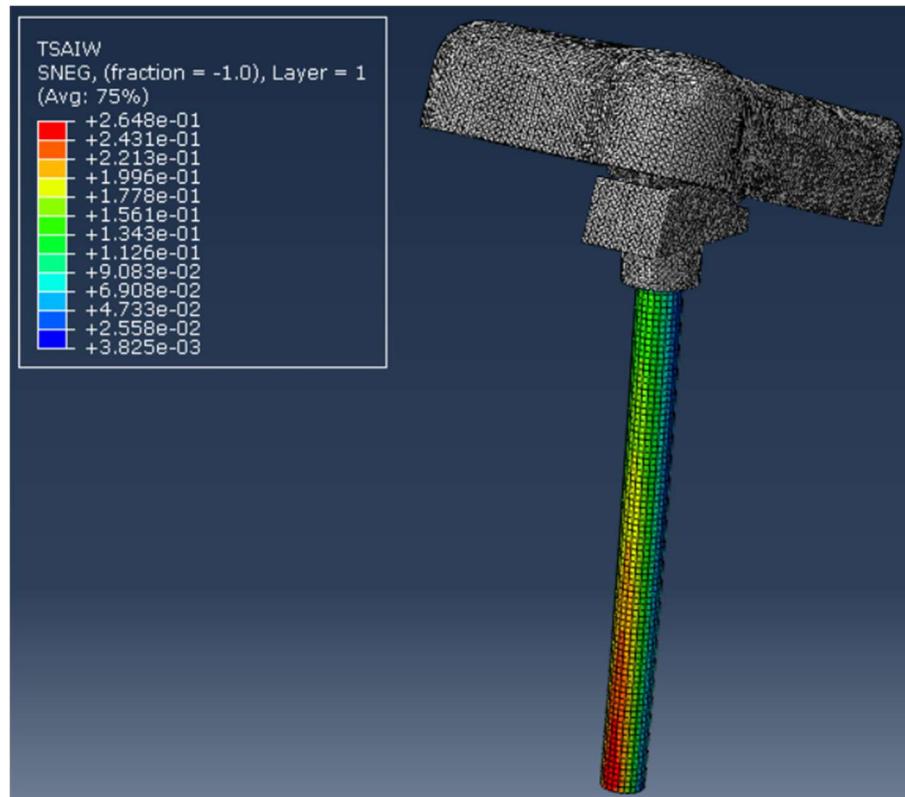


Figura 8.3.5.6: Vista General, Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga

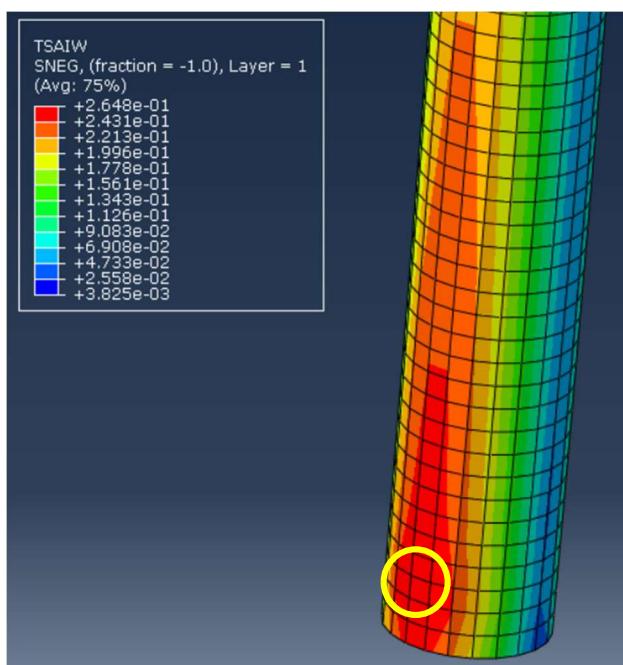


Figura 8.3.5.7: Zona Crítica, Criterio Tsai - Wu - Ensayo de Fatiga

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

A la vista de los resultados, el valor máximo de Criterio de Tsai – Wu, es de 0,2648, por tanto su coeficiente de seguridad será:

$$CS_{CV} = \frac{1}{Tsai - Wu} = \frac{1}{0,2648} = 3,7764 \geq 2$$

Esto quiere decir que es un ensayo válido ya que el valor del CS es mayor de 2 en su punto más desfavorable.

**8.3.5.1. TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO
[ENSAYO DE FATIGA]**

Componente	Tija Fibra de Carbono [MPa]	Tija Aluminio [MPa]	Material	Límite Elástico [MPa]	Resultado [FdC] [Al]
Tija	115,4	93,91	Aluminio	270	✓ ✓
Abrazadera	161,8	161,7	Acero	450	✓ ✓
Enganche	146,8	146,8	Acero	450	✓ ✓
Varilla Derecha	223,8	223,8	Acero	450	✓ ✓
Varilla Izquierda	229,6	229,6	Acero	450	✓ ✓
Tornillo Delantero	145,5	145,6	Acero	450	✓ ✓
Tornillo Trasero	141,9	141,8	Acero	450	✓ ✓
Asiento	5,754	5,754	Polipropileno	30	✓ ✓

Tabla 7: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Fatiga

8.3.6. ENSAYO DE FATIGA – ETAPA 1



Figura 8.3.6.1: Aplicación de Cargas –
Ensayo de Fatiga, Etapa 1

Siendo el mismo caso que en el ensayo, vamos a simplificar la carga dinámica de 100.000 ciclos a 4 Hz, a una carga estática donde vamos a repartir la fuerza puntual de 1200 N sobre la superficie indicada en la imagen de aproximadamente 158 mm², por lo tanto esto nos dará una presión de:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1200}{158} = 7.60 \text{ MPa}$$

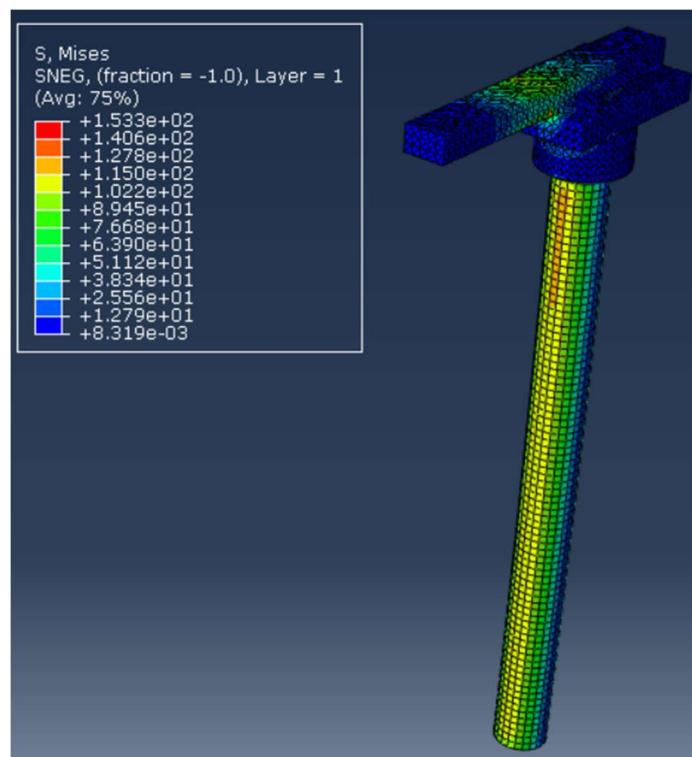


Figura 8.3.6.2: Pretensión + Ensayo de Fatiga, Etapa 1

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

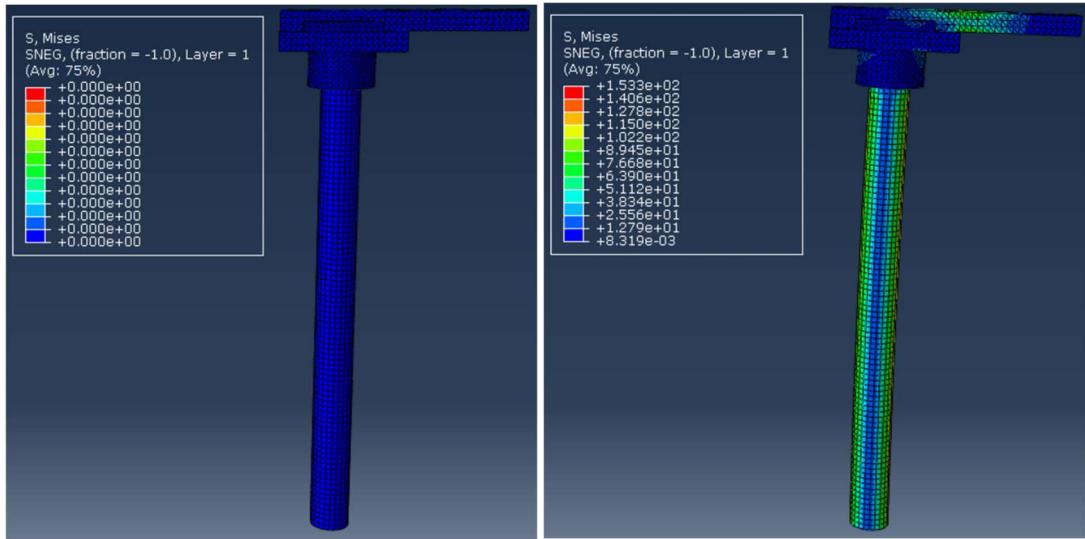


Figura 8.3.5.3: Sin Cargas VS Ensayo de Fatiga, Etapa 1

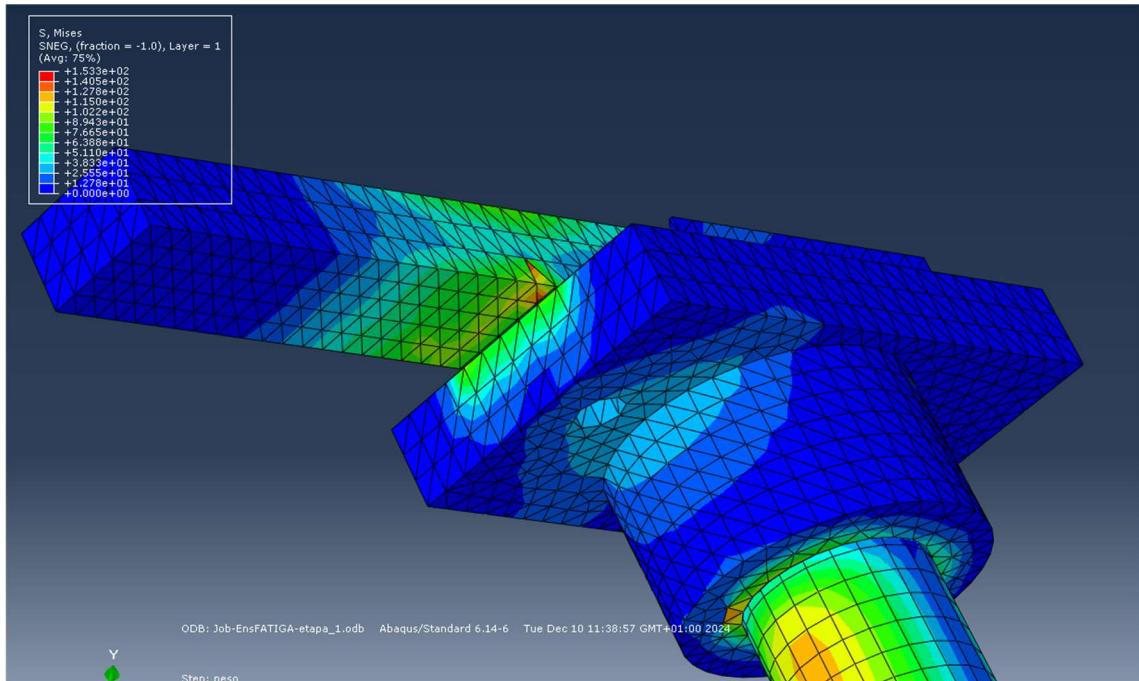


Figura 8.3.6.4: Zona Crítica Tensiones - Ensayo de Fatiga. Etapa 1

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

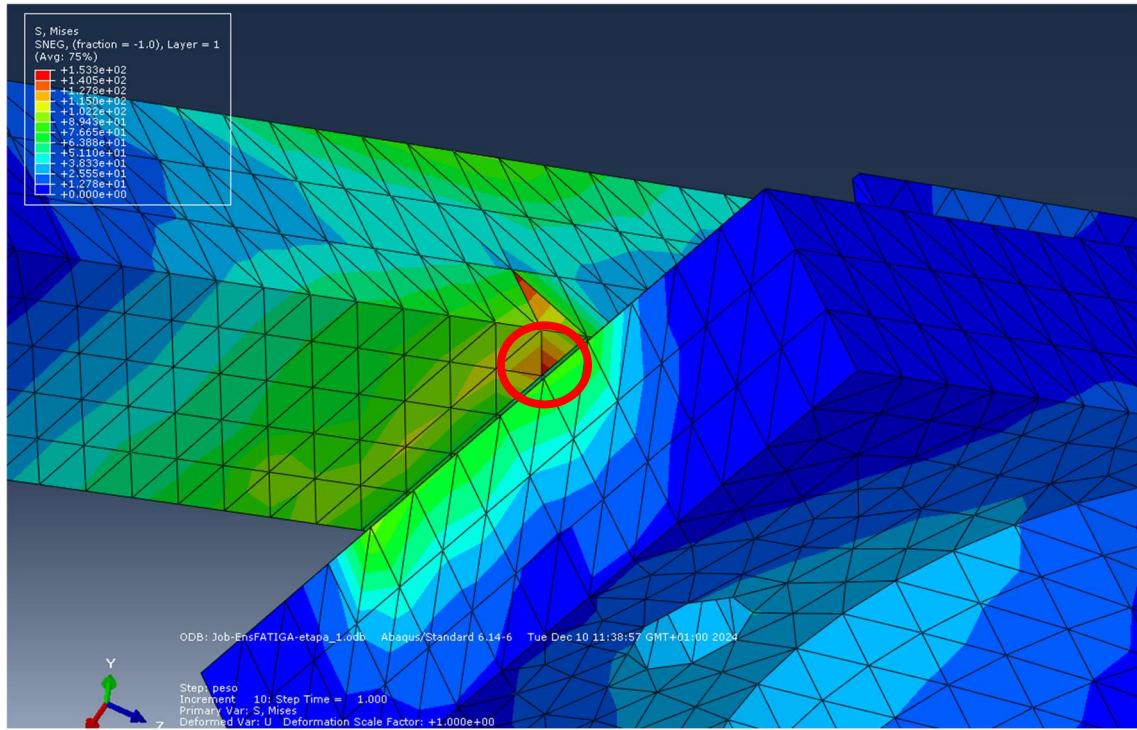


Figura 8.3.6.5: Zona de Máxima Tensión – Ensayo de Fatiga, Etapa 1

Como se puede observar en la imagen 8.3.6.5, la máxima tensión acumulada se encuentra en la barra de acero, acumulando una tensión máxima de 153,3 MPa, por lo que se llega a la conclusión de que la barra no rompe ya que el límite elástico del acero es de 450 MPa.

Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga, Etapa 1

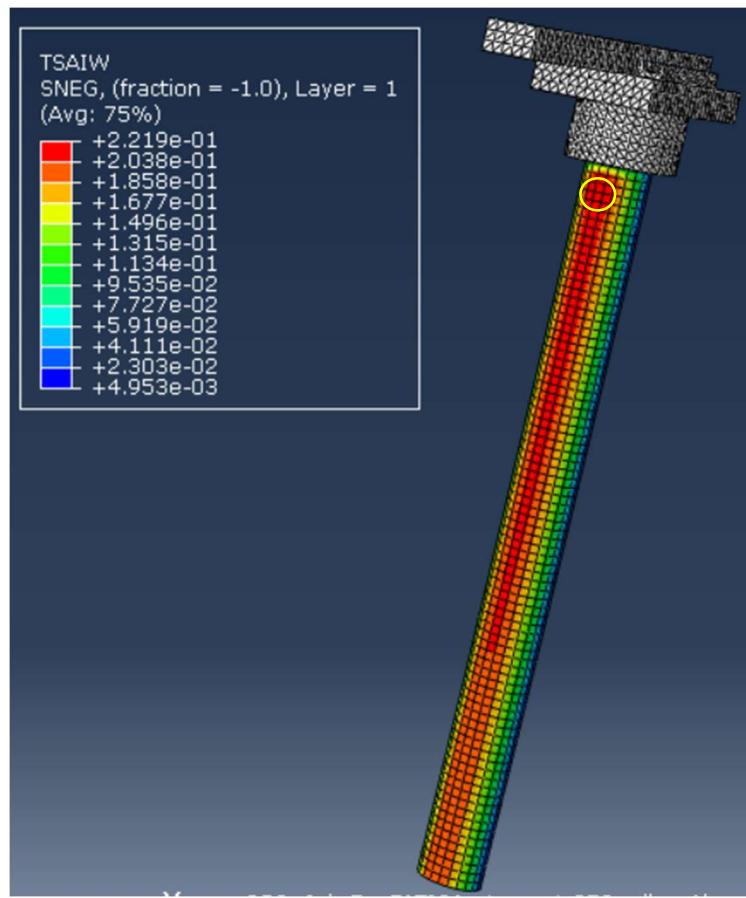


Figura 8.3.6.6: Vista General, Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Fatiga, Etapa 1

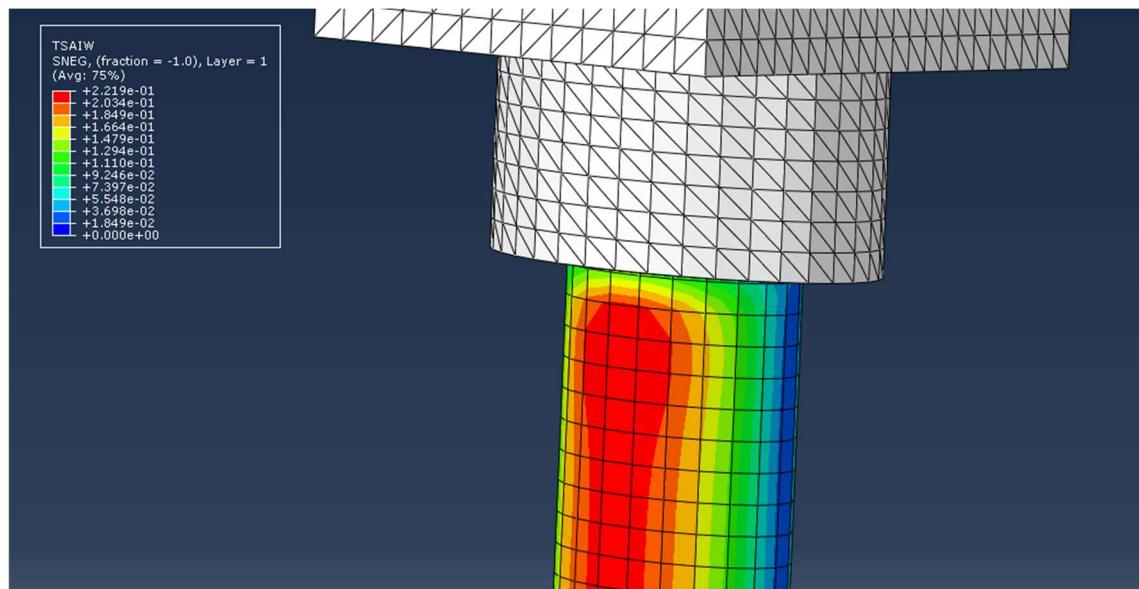


Figura 8.3.6.7: Zona Crítica, Criterio Tsai - Wu - Ensayo de Fatiga, Etapa 1

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

A la vista de los resultados, el valor máximo de Criterio de Tsai – Wu, es de 0,2219, por tanto, su coeficiente de seguridad será:

$$CS_{CV} = \frac{1}{Tsai - Wu} = \frac{1}{0.2219} = 4,5065 \geq 2$$

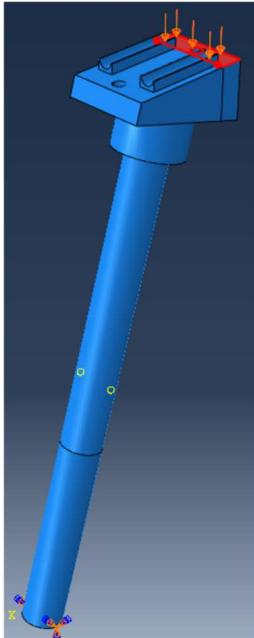
Esto quiere decir que es un ensayo válido ya que el valor del CS es mayor de 2 en su punto más desfavorable.

**8.3.6.1. TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO
[ENSAYO DE FATIGA, ETAPA 1]**

Componente	Tija Fibra de Carbono [MPa]	Tija Aluminio [MPa]	Material	Límite Elástico [MPa]	Resultado [FdC] [Al]
Tija	118,6	95,91	Aluminio	270	✓ ✓
Abrazadera	128,2	107,7	Acero	450	✓ ✓
Barra	153,3	153,3	Acero	450	✓ ✓

Tabla 8: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Fatiga - Etapa 1

8.3.7. ENSAYO DE RESISTENCIA – ETAPA 2



En este ensayo, igual que en los dos primeros, es una carga estática de 2000 N aplicada sobre la superficie de la abrazadera adaptada para la tija posicionada a 73° respecto al eje horizontal, a esta superficie le tenemos que quitar el agujero donde se aloja el tornillo y aplicar la carga a unos 3 cm del centro de la tija, por lo que tenemos una superficie útil de $40 * 11 - \Pi * 3^2 = 411,725 \text{ mm}^2$. Por tanto, la carga puntual repartida por la superficie nos da una presión de:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{2000}{40 * 11 - \Pi * 3^2} = 4.857 \text{ MPa}$$

*Figura 8.3.7.1: Aplicación de Cargas -
Ensayo de Resistencia, Etapa 2*

Distribución de Tensiones de Von Mises – Ensayo de Resistencia, Etapa 2

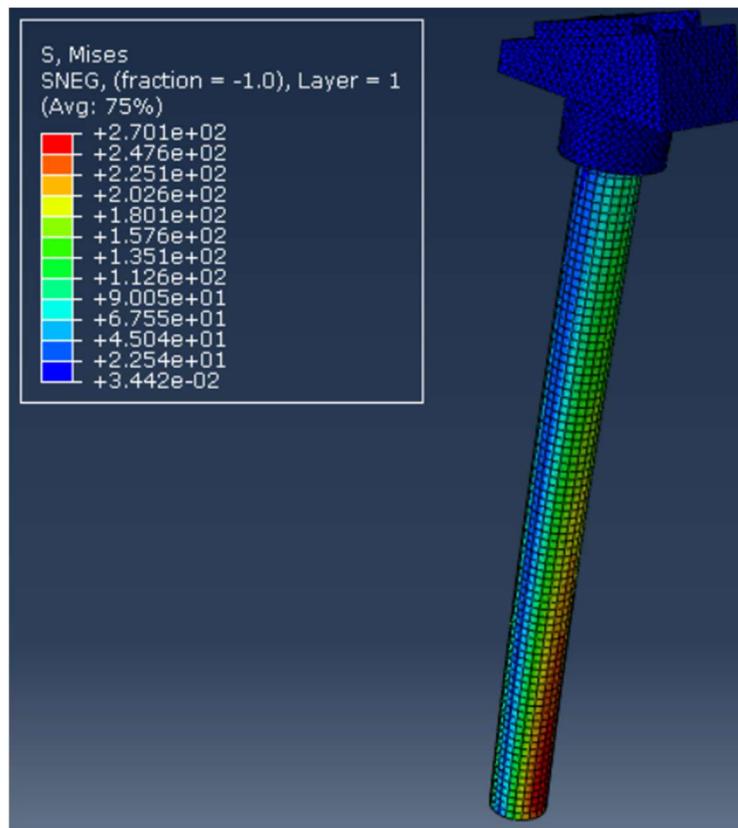


Figura 8.3.7.2: Ensayo de Resistencia, Etapa 2

MARCOS GERMÁN CASTILLO

DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

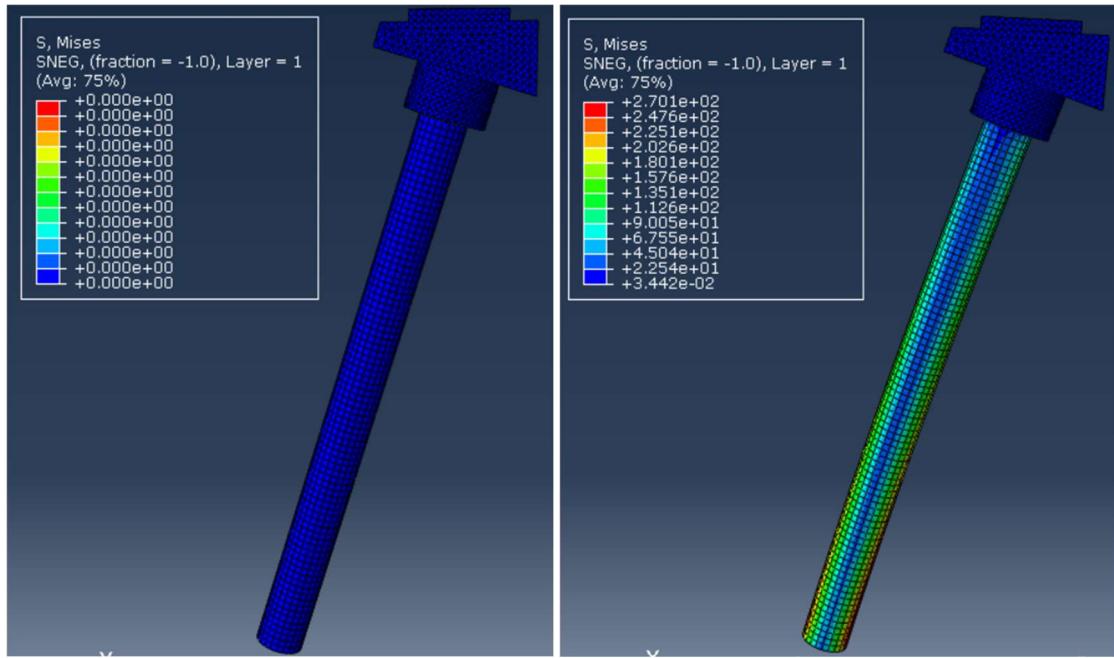


Figura 8.3.7.3: Sin Cargas VS Ensayo de Resistencia, Etapa 2

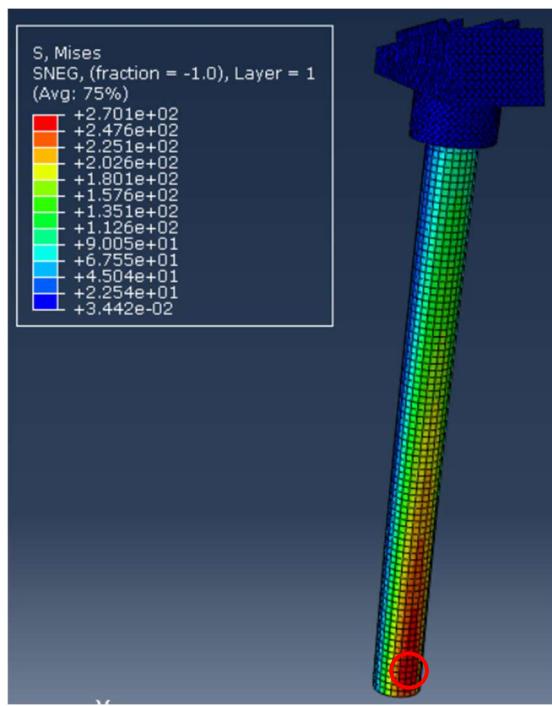


Figura 8.3.7.4: Zona de Crítica Tensión - Ensayo de Resistencia, Etapa 2

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

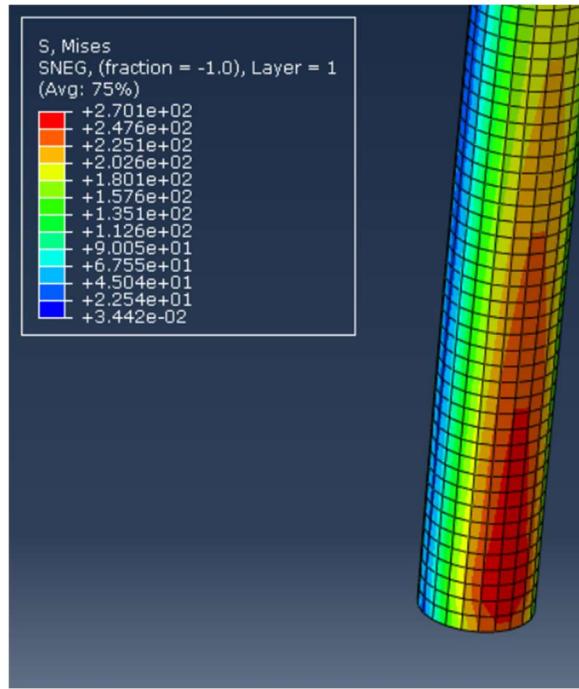


Figura 8.3.7.5: Zona Máxima Tensión –
Ensayo de Resistencia, Etapa 2

Como se puede observar en la imagen 8.3.7.5, la máxima tensión acumulada se encuentra en la tija, acumulando una tensión máxima de 270,1 MPa. Este resultado no es muy convincente ya que para la tija de fibra de carbono hay que fijarse en el criterio de Tsai – Wu.

Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Resistencia, Etapa 2

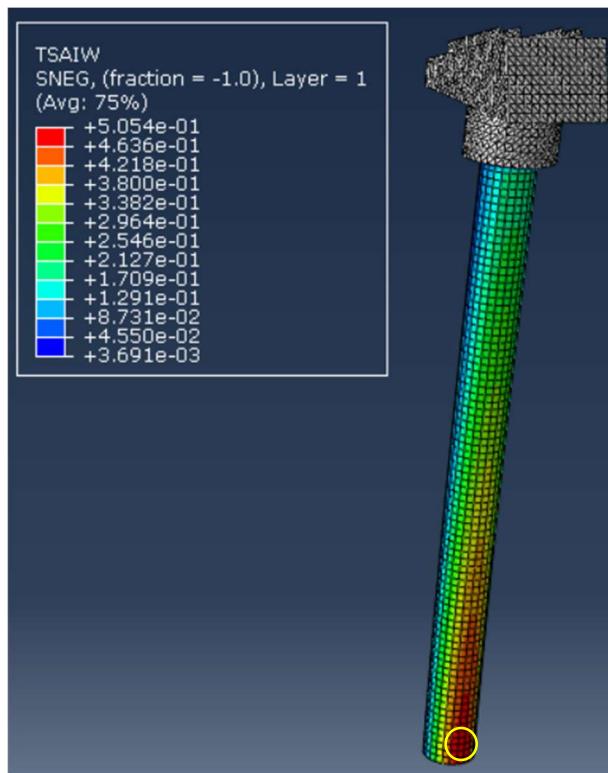


Figura 8.3.7.6: Vista General, Criterio de Tsai – Wu – Ensayo de Resistencia, Etapa 2

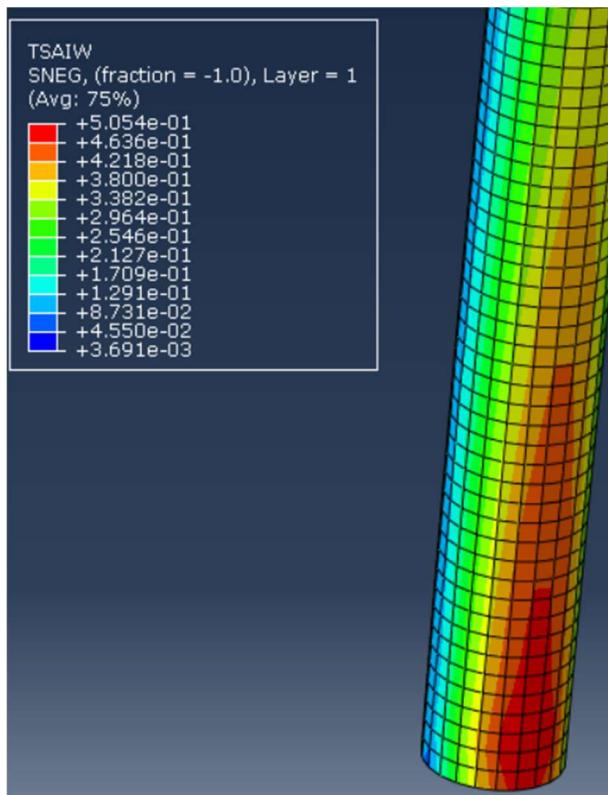


Figura 8.3.7.7: Zona Crítica, Criterio Tsai - Wu - Ensayo de Resistencia, Etapa 2

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

A la vista de los resultados, el valor máximo de Criterio de Tsai – Wu, es de 0,5054, por tanto, su coeficiente de seguridad será:

$$CS_{CV} = \frac{1}{Tsai - Wu} = \frac{1}{0.5054} = 1.98 \leq 2$$

Esto quiere decir que es un ensayo dudoso, ya que estamos en un valor muy próximo a 2, entonces habría que recurrir a los ensayos de taller para comprobar que la tija puede soportar la carga.

**8.3.7.1. TABLA COMPARATIVA DE TENSIONES CON TIJA DE ALUMINIO
[ENSAYO DE RESISTENCIA, ETAPA 2]**

Componente	Tija Fibra de Carbono [MPa]	Tija Aluminio [MPa]	Material	Límite Elástico [MPa]	Resultado [FdC] [Al]
Tija	270,1	221,6	Aluminio	270	✓ ✓
Abrazadera	124,1	102,3	Acero	450	✓ ✓

Tabla 9: Comparativa de tensiones con tija de aluminio, Resistencia - Etapa 2

9. MOLDE

9.1. DISEÑO DEL MOLDE

Tanto el molde inferior como el molde superior presentan unas dimensiones de 510 x 160 x 45 mm cada uno, pero se han tenido que dividir en 3 partes inferiores y 3 partes superiores de 170 x 160 x 45 mm cada una ya que la impresora 3D solo permite imprimir hasta 200 mm.

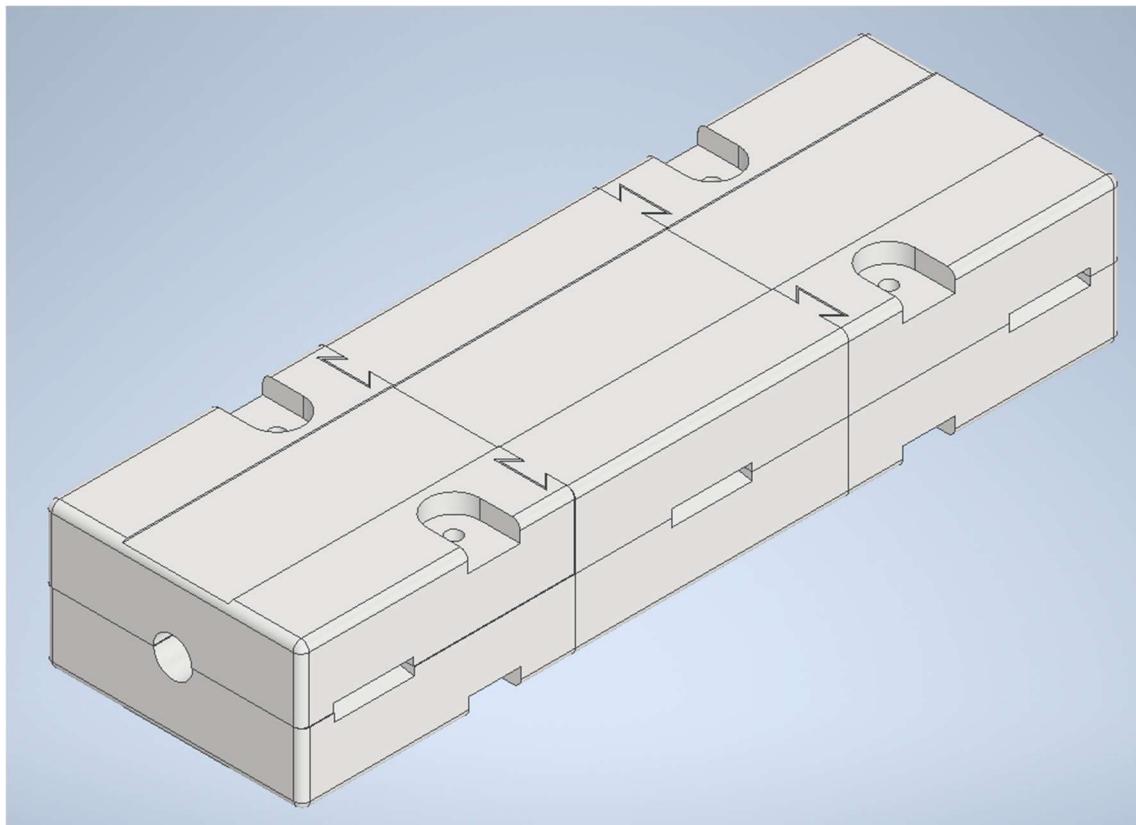


Figura 9.1.1: Ensamblaje del Molde

Como se puede observar se han hecho unos machihembrados de aproximadamente 1 mm de separación para conectar cada una de las diferentes partes. Por otro lado, se han hecho unas ranuras en cada parte para poder abrir el molde fácilmente para sacar la tija. Finalmente, para mantener más sujetas las partes del molde se han hecho cuatro agujeros de 9,5 mm por donde se van a introducir unos tornillos de M8.

9.2. FABRICACIÓN DEL MOLDE

Para la fabricación de la tija se ha tenido que hacer un molde de PLA ya que el ácido poliláctico es un material que tiene que soportar las temperaturas a las que se va a someter en el horno, es decir, 40°C, y la presión que se aplicará a la cámara para dar forma a las láminas de fibra de carbono, alrededor de 1,5 bares. 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 deformé al exponerse a temperaturas más altas. Para evitar que ocurra esto, se ha decidido impregnar la zona del molde donde se va a colocar las láminas de fibra de carbono con una capa protectora de resina epoxi. Luego en la parte superior e inferior del molde se han puesto láminas de fibra para evitar que, a la hora de desmoldear, el molde se rompa o griete, de esta forma, aumentará su rigidez.



Figura 9.2.1: Molde abierto

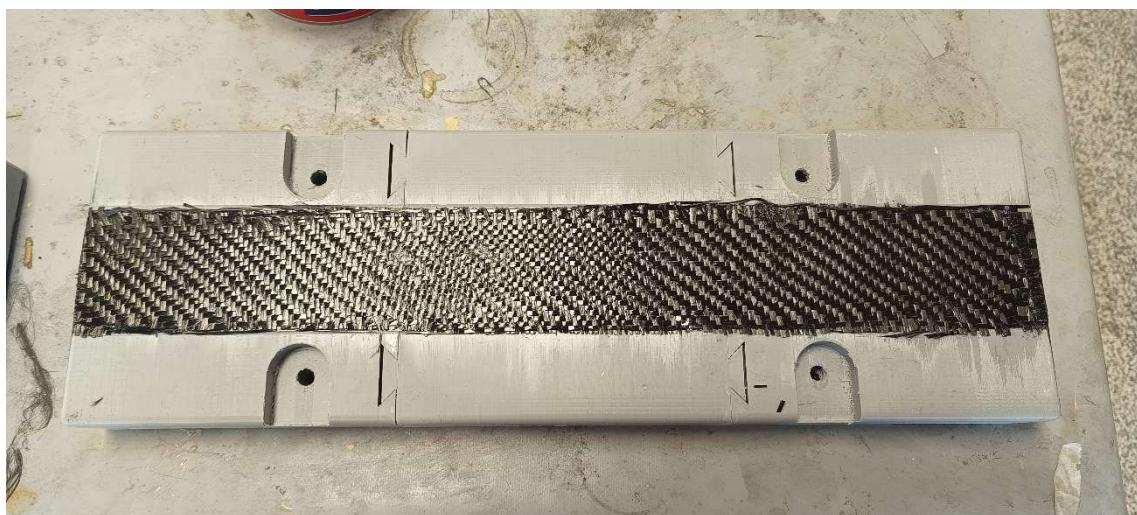


Figura 9.2.2: Molde con láminas de fibra de carbono para aumentar la rigidez

9.3. FABRICACIÓN DE LA TIJA

Para fabricar la tija, primero tenemos que cortar cuatro láminas de fibra de carbono acorde a las dimensiones de la tija establecidas al diseñar el molde. Las fibras para fabricación de este tipo de piezas vienen comercializadas en rollos de malla circular, esta malla presenta poca resistencia para ensanchar las fibras, por lo que hay que tener mucho cuidado para abrir las y no sobrepasar el diámetro establecido para que no aparezca ningún pliegue en la fabricación de la tija.



Figura 9.3.1: Disposición Briding de la fibra de carbono



Figura 9.3.2: Peso de las 4 láminas de fibra de carbono

Una vez cortadas las cuatro tiras proseguimos a impregnarlas con una mezcla de resina epoxi (Base Hexion Europe Epikote RIMR035C) y un endurecedor (Hardener Hexion Europe Epikure RIMH037) en proporción 100:30.



Figura 9.3.3: Proceso de impregnación

A continuación, y con una bolsa de presión con las medidas del molde, se cierra de un extremo con bridas y con cinta de doble cara o masilla de cierre y por el otro lado se va a meter un tubo por donde vamos a meter aire a presión de 1,5 bares aproximadamente y cerramos de la misma forma que el otro extremo para evitar fugas de aire. Una vez cerrada la cámara por los dos lados con la presión establecida proseguimos a cubrirla muy cuidadosamente con cada una de las capas de fibra en la cámara y volvemos a cerrarlas con bridas de los extremos.

Una vez introducidas las fibras, cerramos el molde con los tornillos anteriormente mencionados y para asegurar, también se han puesto unos gatos de fijación para que el molde quede completamente cerrado.



Figura 9.3.4: Refuerzo de cierre con gatos de fijación

Finalmente, se somete la tija al proceso de curación, en el que se introduce el molde al horno a 40°C grados durante 8 horas aproximadamente. Durante ese tiempo, las fibras y resina conforman el material compuesto.

Una vez transcurrido ese tiempo se da paso al proceso de desmoldeo en el que con las cuñas diseñadas abrimos muy cuidadosamente el molde observando que no haya ninguna gota de resina en el macho del molde que puede hacer que se pegue a la capa superficial de la tija y se rompa.

En el caso de que la tija no tenga ninguna imperfección y esté correctamente impregnada y no haya zonas sin resina, se somete a un proceso de lijado y barnizado para tener así una tija no solo funcional, sino también estéticamente fabricada.

10. ENSAYOS

En este trabajo se ha abordado el ensayo de la tija de forma teórica con el software Abaqus. Ahora, se van a realizar una serie de ensayos físicos para corroborar los resultados obtenidos.

Es importante destacar que este análisis representa un avance significativo en la consecución de nuestros objetivos. Todas las piezas auxiliares utilizadas en los ensayos (como el sillín, las varillas, el soporte y en enganche) son componentes reales de bicicleta que han superado validaciones rigurosas antes de su comercialización. Esto asegura que la tija se someterá a un entorno de prueba más fiel y realista que las simulaciones hechas puramente virtuales.



Figura 10.0.1: Prensa de tracción / compresión Instron Model 8032

Los ensayos se llevarán a cabo en el taller de la nave 5 de la EINA, utilizando una prensa de tracción/compresión Instron Model 8032, donde un cilindro será el encargado de aplicar la carga sobre el sillín. Los resultados de los ensayos serán extraídos y analizados mediante el software asociado a la prensa, que generará gráficas de Carga – Desplazamiento. La metodología del ensayo consistirá en aplicar la carga estipulada en la norma durante el tiempo necesario que esta dice, es decir, un minuto.



Figura 10.0.2: Cilindro

Este enfoque nos permitirá no solo validar las simulaciones calculadas previamente, sino también obtener datos concretos sobre el comportamiento estructural y la resistencia de la tija en un contexto práctico y controlado, contribuyendo así al desarrollo continuo de tecnologías en el ámbito del diseño mecánico aplicado a bicicletas.

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

Antes de realizar los ensayos, se ha comprobado con un nivel que la superficie del sillín este completamente alineada con la máquina para que no haya fallos en las mediciones y por otro lado se ha comprobado con un transportador de ángulos mecánico que el sillín esté a 73° de inclinación según dicta la norma.



Figura 10.0.3: Nivel



Figura 10.0.4: Inclinación 73°



Figura 10.0.5: Inclinación 73° - 2

MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

A continuación, se van a mostrar los ensayos realizados en el taller: Ensayo de Carga Vertical, Ensayo de Fatiga (de forma estática) y Ensayo de Resistencia Etapa 2.

El ensayo de Carga 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.

Con respecto al ensayo de fatiga de la etapa 1 no se ha podido realizar debido a que no se dispone de un útil que se adecúe a las características que nos cita la norma.

10.1. ENSAYO DE CARGA VERTICAL

El primer ensayo que se va a realizar es el de la aplicación de una carga vertical de 650N sobre la parte anterior del sillín durante un tiempo de un minuto. En este caso el empotramiento de 100 mm ha sido simulado por un soporte donde se va a introducir la tija simulando el cuadro de la bicicleta.

Primero se ha comprobado que el cilindro esté a unos 25 mm del extremo delantero.



Figura 10.1.1: Colocación del cilindro a 25 mm del extremo

Y una vez comprobados todos los parámetros se prosigue con el ensayo.



Figura 10.1.2: Ensayo C.Vertical – Inicio Figura 10.1.3: Ensayo C.Vertical - Fin

Tras haber estado aplicando durante un minuto una carga de 650 N observamos una leve deformación del sillín, pero a la tija no le sucede nada, una vez que se deja de aplicar la carga todos elementos vuelven a su forma inicial sin ningún tipo de plastificación.

10.1.1. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ABAQUS Y LA PRENSA, ENSAYO DE CARGA VERTICAL

A continuación, se muestra la comparativa de desplazamiento del ensayo de carga vertical según los resultados de Abaqus y la prensa. Hay que tener en cuenta que el resultado de Abaqus (línea naranja) sobre la gráfica de la prensa (línea azul) va a ser una línea recta ya que Abaqus muestra el desplazamiento cuando se aplica la carga estipulada por la norma, en este caso 650 N. A diferencia de la prensa, que muestra la carga que aplica en cada instante, de ahí que salga un resultado más exponencial.

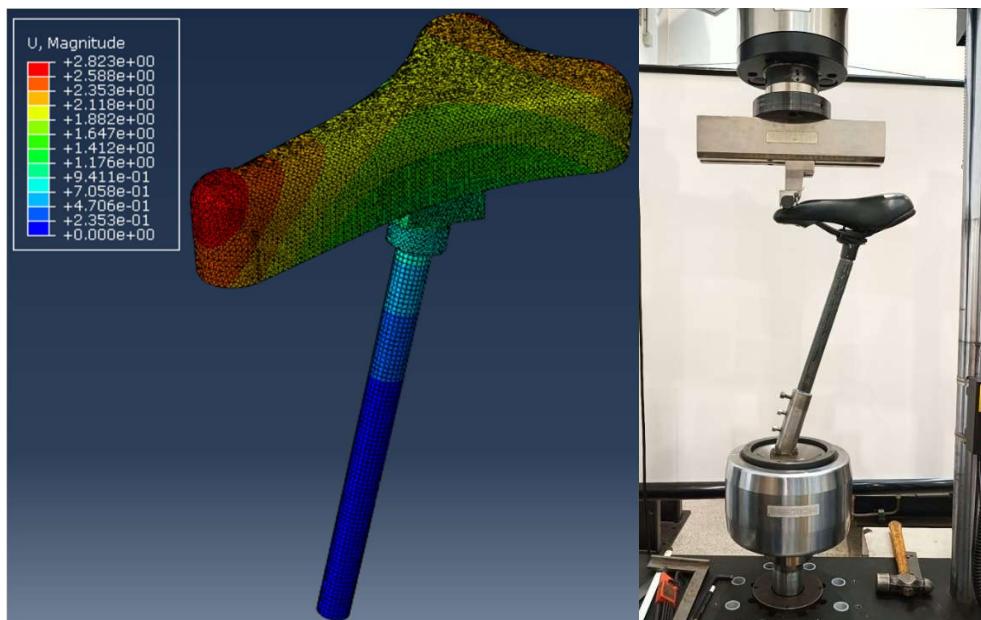
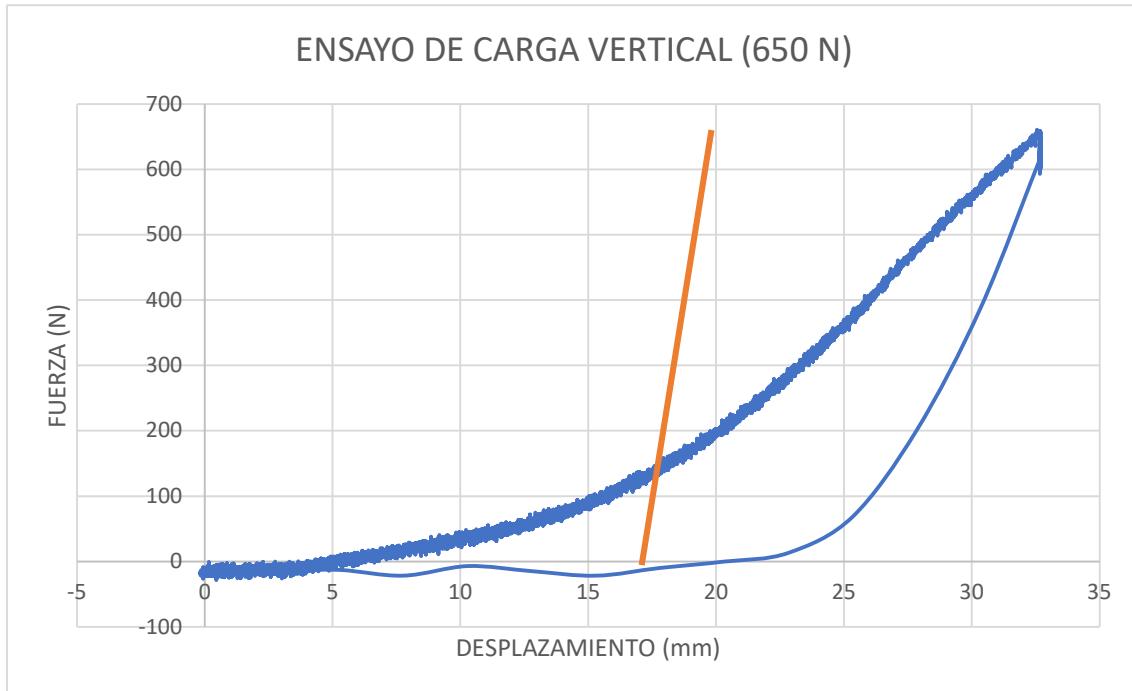


Figura 10.1.4: Comparativa entre Abaqus y la prensa, Carga Vertical



Gráfica 1: Ensayo de Carga Vertical (650 N)

Esta gráfica nos muestra el desplazamiento que ha sufrido el sillín durante todo el proceso, podemos observar que de los 5 a los 17 mm de desplazamiento no cambia mucho la gráfica, debido a que es la toma de contacto con la propia almohadilla del sillín, entonces la fuerza que aplica es poca y no se considera importante, por tanto es a partir de los 17 mm cuando ya se empieza a aplicar la carga sobre la estructura del sillín y ya se observa que cuando llegamos a los 650N de carga se ha desplazado unos 33 mm, pero eso no es lo que realmente se ha desplazado ya que como se ha comentado de los 5 a los 17 mm es de la almohadilla y de 0 a 5 mm todavía no estaba en contacto el cilindro con el sillín, por tanto, el desplazamiento real será de $33 - 17 = 16$ mm. La línea recta de Abaqus (Naranja) se va a colocar en la posición donde en el software de la prensa, se considera que va a ser el desplazamiento efectivo, es decir, sin contar la distancia que todavía no hay contacto y el hundimiento del sillín, es decir, se colocará a los 17 mm como punto de partida y se desplazará hasta 2,82 mm según Abaqus.

10.2. ENSAYO DE FATIGA

Teóricamente, el ensayo de fatiga dice que se deben realizar 200000 ciclos a una frecuencia de 4 Hz, eso equivale a unas 13,88 horas de ensayo, entonces al ver que este ensayo era inviable debido al tiempo y costo que este supone, se ha decidido hacer un ensayo de forma estática, es decir, aplicar la carga de 1000N que dicta la norma, pero en vez de durante 200000 ciclos, durante un minuto.

Para ello, se ha tenido que colocar el cilindro en la parte posterior del sillín, entre la tija y el extremo, de la siguiente manera:



Figura 10.2.1: Colocación del cilindro entre el extremo posterior y la tija

Una vez, comprobados todos los parámetros, se continua con el ensayo.

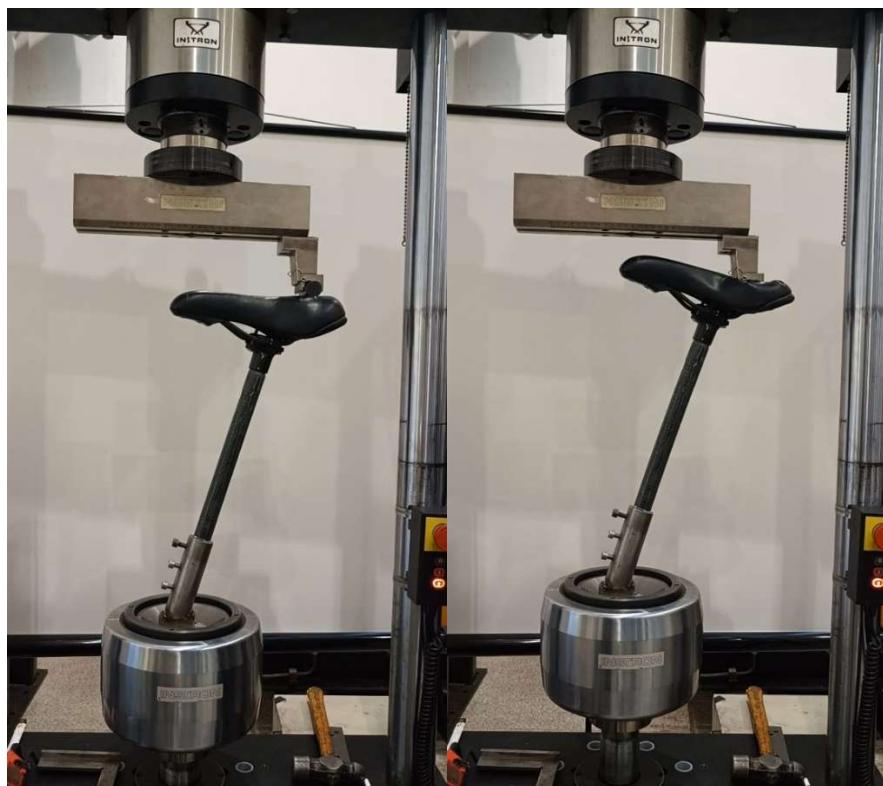


Figura 10.2.2: Ensayo de Fatiga – Inicio

Figura 10.2.3: Ensayo de Fatiga - Fin

Esta vez, la carga de 1000 N sobre el sillín es más notoria, se observa una gran deformación sobre este, pero una vez que ha terminado la prueba la tija no ha sufrido ningún tipo de rotura, por lo que ha sido un éxito.

10.2.1. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ABAQUS Y LA PRENSA, ENsayo DE FATIGA

A continuación, se muestra la comparativa de desplazamiento del ensayo de fatiga según los resultados de Abaqus y la prensa. La situación es la misma que con el ensayo de carga vertical, Abaqus nos da un valor de desplazamiento máximo cuando se aplica la carga que dice la norma, por tanto, sobre la gráfica se dibuja un línea recta hasta los 1000 N en este ensayo.

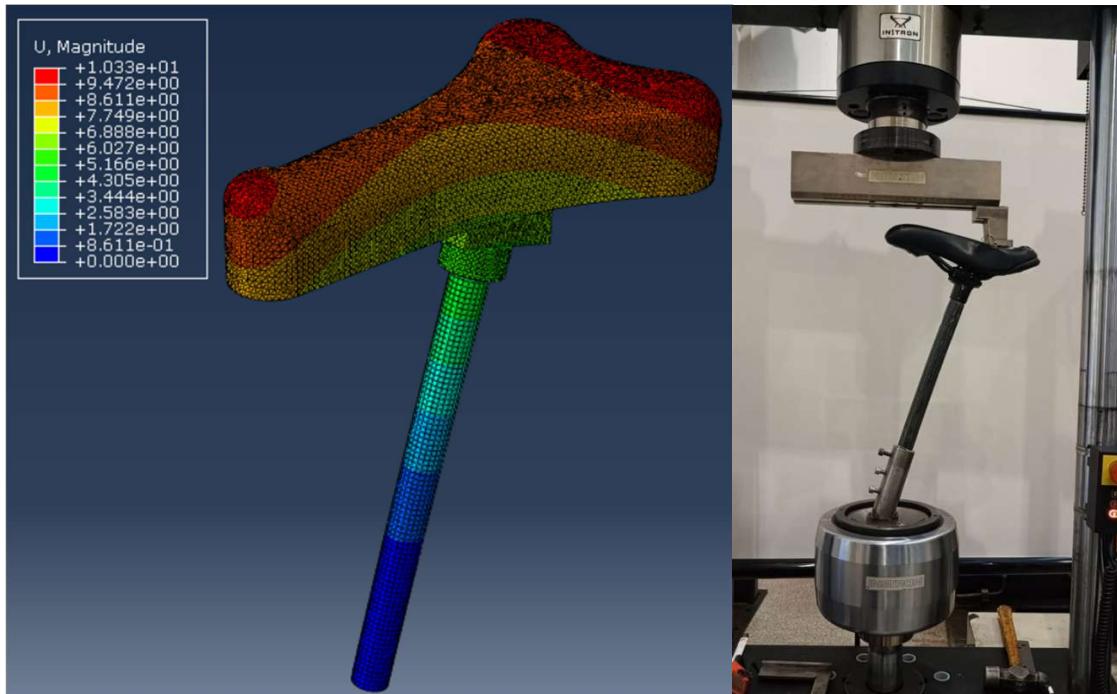
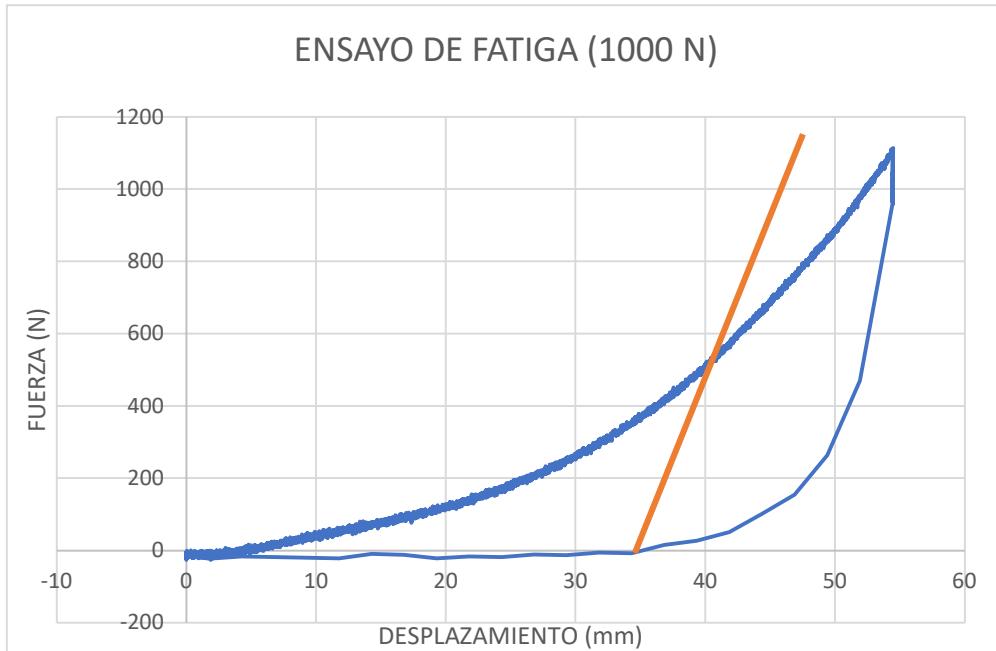


Figura 10.2.4: Comparativa de resultados entre Abaqus y la prensa, Ensayo de Fatiga



Gráfica 2: Ensayo de Fatiga (1000 N)

Esta gráfica nos muestra el desplazamiento que ha sufrido el sillín durante todo el proceso, podemos observar que de los 5 a los 35 mm de desplazamiento no cambia mucho la gráfica, debido a que es la toma de contacto con la propia almohadilla del sillín, entonces la fuerza que aplica es poca y no se considera importante, por tanto es a partir de los 35 mm cuando ya se empieza a aplicar la carga sobre la estructura del sillín y ya se observa que cuando llegamos a los 1000N de carga se ha desplazado unos 55 mm, pero eso no es lo que realmente se ha desplazado ya que como se ha comentado de los 5 a los 35 mm es de la almohadilla y de 0 a 5 mm todavía no estaba en contacto el cilindro con el sillín, por tanto, el desplazamiento real será de $55 - 35 = 20$ mm. La posición de la línea recta naranja sigue el mismo proceso que en el apartado anterior de carga vertical, pero esta vez el punto de partida va a ser 35 mm, en este caso desde los 35 mm se va a desplazar 10,33 mm más.

10.3. ENSAYO DE RESISTENCIA ETAPA 2

En este ensayo, se quitan todas las partes y dejamos únicamente la tija y un tipo de abrazadera que es donde se va a aplicar la carga de 2000 N durante un minuto, a unos 3 cm aproximadamente del centro de la tija.



Figura 10.3.1: Colocación del cilindro sobre la abrazadera especial

Ahora se prosigue con el ensayo de resistencia:



Figura 10.3.2: Ensayo de Resistencia etapa 2 - Inicio

Figura 10.3.3: Ensayo de Resistencia etapa 2 - Fin



MARCOS GERMÁN CASTILLO
DISEÑO, CÁLCULO Y FABRICACIÓN DE UNA TIJA EN FIBRA DE CARBONO

La ventaja de este ensayo es que, al no tener el asiento, los resultados han sido mucho más rápidos que en los ensayos anteriores, ya que el contacto que hace el cilindro pega directamente con una superficie sólida, que es en este caso la abrazadera.

Si se observa detenidamente la imagen inicial con la final, se ve que el cilindro a deslizado respecto a su posición inicial, lo que se traducirá en una variación en la gráfica.

10.3.1. COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ABAQUS Y LA PRENSA, ENSAYO DE RESISTENCIA, ETAPA 2

A continuación, se muestra el desplazamiento que calcula Abaqus comparándolo con la gráfica que genera el software de la prensa. La situación es la misma que en los ensayos anteriores de carga vertical y fatiga, donde Abaqus nos da un valor de desplazamiento máximo cuando se aplica la carga que dicta la norma, por tanto, sobre la gráfica se dibuja un línea recta hasta los 2000 N en este caso.

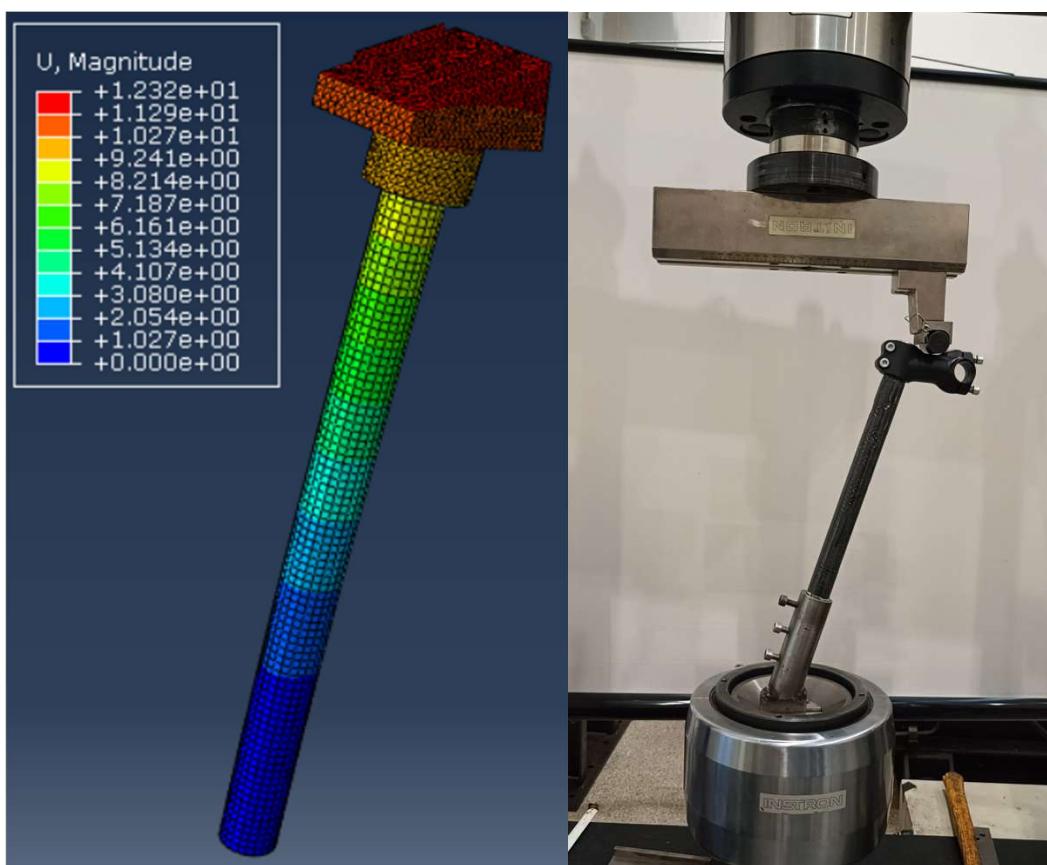
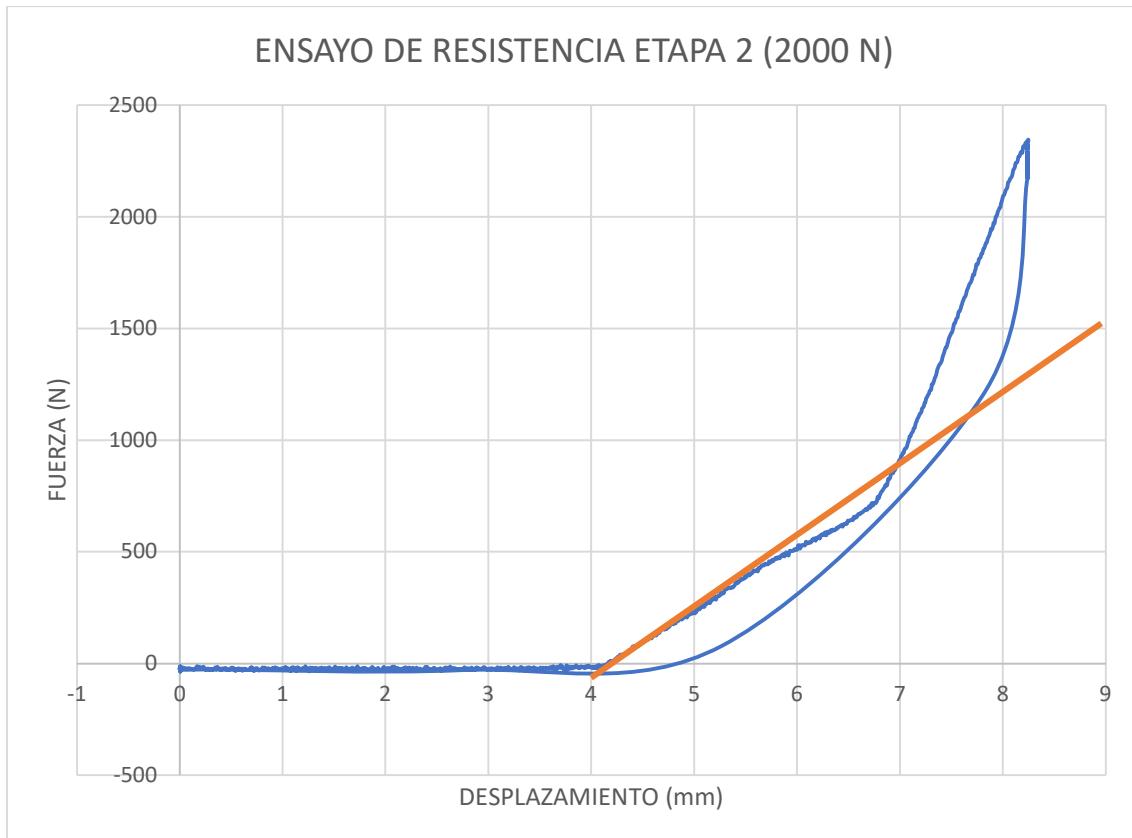


Figura 10.3.4: Comparativa entre Abaqus y la prensa, Ensayo de Resistencia



Gráfica 3: Ensayo de Resistencia - Etapa 2 (2000 N)

Vemos que en los 4 primeros milímetros el cilindro todavía no ha tenido contacto con la abrazadera, y ya de 4 a 7 mm, empieza a comprimir, pero ocurre lo que se ha comentado antes de que el cilindro ha resbalado sobre la abrazadera hasta que ya se ha estabilizado. Una vez que se han alcanzado alrededor de los 2000 N, se espera el minuto que dicta la norma y el ensayo finaliza dando un total de $8,3 - 4 = 4,3$ mm de desplazamiento.

La posición de la línea recta naranja sigue el mismo proceso que en los apartados anteriores de carga vertical y fatiga, pero esta vez el punto de partida va a ser 4 mm y se va a desplazar 12,32 mm, en este caso, la línea recta se sale de la gráfica que muestra el software de la prensa.

11. CONCLUSIÓN

- Se ha diseñado, calculado, fabricado y ensayado una pieza de bicicleta que funciona perfectamente.
- La pieza, según los cálculos, cumple perfectamente.
- Los resultados de los ensayos han sido muy satisfactorios.
- Habría que rehacer los cálculos con las piezas reales con las que se han realizado los ensayos.
- Hay dos ensayos más rígidos que los cálculos y otro más flexible, lo que está en consonancia con los utilajes utilizados para realizar los ensayos. Dichos utilajes hacían el sistema más flexible y más rígido respectivamente, lo que valida que las discrepancias sean debidas a los utilajes.
- El próximo año se procederá a realizar un ensayo en campo de la tija durante un año en bicicleta de montaña, durante unos 1.500 km y con un peso aproximado de 100 kg.

12. BIBLIOGRAFÍA

1. Whitcomb, J. D., Ochoa, O. O., Reddy, J. N. & Haisler, W. E. *ANALYSIS OF 2x2 BRAIDED COMPOSITES*. (2003).
2. *5 Annex 1. Tsai-Wu Theory*.
3. Real Decreto 2406/1985, de 20 de noviembre, por el que se declaran de obligado cumplimiento las especificaciones técnicas de las bicicletas y sus partes y piezas y su homologación por el Ministerio de Industria y Energía.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/1985/11/20/2406>
4. 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.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2014/05/09/339/con>