



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Anexos

Autor

Iván Castillo Jiménez

Directores

David Ranz
Clara Luna Martín

Grado en ingeniería de tecnologías industriales

EINA UNIZAR

2024

Índice de los anexos

Anexo I: Propiedades de los materiales utilizados	4
Anexo II: Cálculo de los resultados.....	6
Anexo III: Imágenes de los resultados del análisis real del modelo actual	8
Anexo IV: Imágenes de los resultados del análisis adaptado del modelo real	9
Anexo V: Imágenes de los resultados del análisis del prototipo de fibra de carbono con epoxi y PVC	11
Anexo VI: Imágenes de los resultados del análisis del prototipo de fibra de lino con bioepoxi y corcho.....	13
Anexo VII: Prueba para la realización del molde definitivo	14

Anexo I: Propiedades de los materiales utilizados

- Aluminio 6061:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	69000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	26000	N/mm ²
Densidad de masa	2700	kg/m ³
Límite de tracción	124.084	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	55.1485	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	2.4e-05	/K
Conductividad térmica	170	W/(m·K)
Calor específico	1300	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Tabla 1. Propiedades de la aleación de aluminio 6061

- PVC 60:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	60	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.4	N/D
Módulo cortante	16	N/mm ²
Densidad de masa	60	kg/m ³
Límite de tracción	1.5	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	1.2	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)
Calor específico	1386	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Tabla 2. Propiedades del PVC 60

- Fibra de carbono con resina epoxi:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico en X	122600	N/mm ²
Módulo de elasticidad en Y	8900	N/mm ²
Módulo de elasticidad en Z	8900	N/mm ²
Coefficiente de Poisson en XY	0.36	N/D
Coefficiente de Poisson en YZ	0.18	N/D
Coefficiente de Poisson en XZ	0.18	N/D
Módulo cortante en XY	4400	N/mm ²
Módulo cortante en YZ	4400	N/mm ²
Módulo cortante en XZ	3200	N/mm ²
Densidad de masa	1850	kg/m ³
Límite de tracción en X	1457	N/mm ²
Límite de tracción en Y	28.5	N/mm ²
Límite de compresión en X	775.3	N/mm ²
Límite de compresión en Y	113.6	N/mm ²
Límite cortante en XY	51.8	N/mm ²
Límite elástico	1200	N/mm ²

Tabla 3. Propiedades de la fibra de carbono con resina epoxi

- Corcho:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	37	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.01	N/D
Módulo cortante	1.92	N/mm ²
Densidad de masa	250	kg/m ³
Límite de tracción	9	N/mm ²
Límite de compresión	18	N/mm ²
Límite elástico	5	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)
Calor específico	1386	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Tabla 4. Propiedades del corcho

- Lino con bioepoxi:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico en X	26000	N/mm ²
Módulo de elasticidad en Y	4000	N/mm ²
Módulo de elasticidad en Z	4000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson en XY	0.302	N/D
Coefficiente de Poisson en YZ	0.11	N/D
Coefficiente de Poisson en XZ	0.36	N/D
Módulo cortante en XY	2340	N/mm ²
Módulo cortante en YZ	2340	N/mm ²
Módulo cortante en XZ	2000	N/mm ²
Densidad de masa	1400	kg/m ³
Límite de tracción en X	190	N/mm ²
Límite de tracción en Y	17	N/mm ²
Límite de compresión en X	137	N/mm ²
Límite de compresión en Y	17	N/mm ²
Límite cortante en XY	43	N/mm ²
Límite elástico	1000	N/mm ²

Tabla 5. Propiedades del lino con bioepoxi

Anexo II: Cálculo de los resultados

- Tensión de von Mises

El criterio de máxima tensión de von Mises se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] / 2\}^{1/2}$$

con las tensiones principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

La teoría explica que un material dúctil comienza a variar en una ubicación dada cuando la tensión de von Mises es igual al límite de tensión:

$$\sigma_{\text{vonMises}} \geq \sigma_{\text{límite}}$$

- Factor de seguridad según von Mises

El asistente para el factor de seguridad permite evaluar la seguridad del diseño sobre la base de un criterio de fallos. En nuestro caso, el software divide la máxima tensión de von Mises en cada nodo del sólido entre el límite elástico del material. Cuando este resultado sea mayor que 1, significará que el sólido es seguro según el criterio de von Mises:

$$\sigma_{\text{vonMises}} / \sigma_{\text{límite}} > 1$$

- Desplazamientos

Indican el módulo de los desplazamientos en cada uno de los ejes en los que se mueve cualquier punto del sólido.

- Deformaciones unitarias

La deformación unitaria resultante de un punto es la proporción de cambio de longitud respecto con la longitud original, lo que sería la derivada de los desplazamientos.

- Factor de seguridad según Tsai-Wu

Este criterio tiene en cuenta la energía de deformación total (la energía distorsión y la energía de dilatación) para predecir errores. Es más general que el criterio de error Tsai-Hill porque distingue entre las fuerzas de error de compresión y tracción.

Para un estado 2D de tensión del plano ($\sigma_3 = 0, \tau_{13} = 0, \tau_{23} = 0$), el criterio de error Tsai-Wu se expresa como:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_6\tau_{12} + F_{66}\tau_{12}^2 = 1$$

Los coeficientes F_{ij} del criterio de error Tsai-Wu ortotrópico se relacionan con los parámetros de resistencia del material de la lámina y son determinados por experimentos. Se calculan a partir de estas fórmulas:

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C} \right), F_2 = \left(\frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C} \right), F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_1^T * X_1^C} * \frac{1}{X_2^T * X_2^C}},$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_1^T * X_1^C}, F_{22} = \frac{1}{X_2^T * X_2^C}, F_6 = \left(\frac{1}{X_{12}^T} - \frac{1}{X_{12}^C} \right), F_{66} = \frac{1}{X_{12}^T * X_{12}^C}$$

XT 1 límite de tensión material del laminado a lo largo de la dirección de la fibra

XC 1 límite de compresión material del laminado a lo largo de la dirección de la fibra

XT 2 límite de tensión material del laminado transversal a la dirección de la fibra

XC 2 límite de compresión material del laminado transversal a la dirección de la fibra

XT 12 límite cortante positivo del laminado

XC 12 límite cortante negativo de laminado (el solver lo considera igual al límite de cortante positivo)

El estado de las tensiones de la lámina calculado por el programa se describe por los componentes: σ_1, σ_2 y τ_{12}

σ_1 tensión del laminado a lo largo de la dirección de la fibra

σ_2 tensión de laminado transversal a la dirección de la fibra

τ_{12} tensión de cortadura del laminado

El programa comunica el factor de seguridad (FOS), que es el coeficiente por el cual todos los componentes de la tensión del laminado deberían ser multiplicados para alcanzar el error de laminado de acuerdo con el criterio Tsai-Wu arriba establecido. El FOS para el error de laminado se calcula a partir de:

$$FOS = \frac{-C_1 + R}{2C_2}$$

en donde los coeficientes vienen dados por:

$$C_1 = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12}, \quad C_2 = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2, \quad R = \sqrt{|C_1^2 + 4C_2|}$$

Un factor de seguridad mayor que 1,0 indica que el laminado está a salvo de errores.

Anexo III: Imágenes de los resultados del análisis real del modelo actual

- Desplazamientos máximos: 4,789e-02 mm

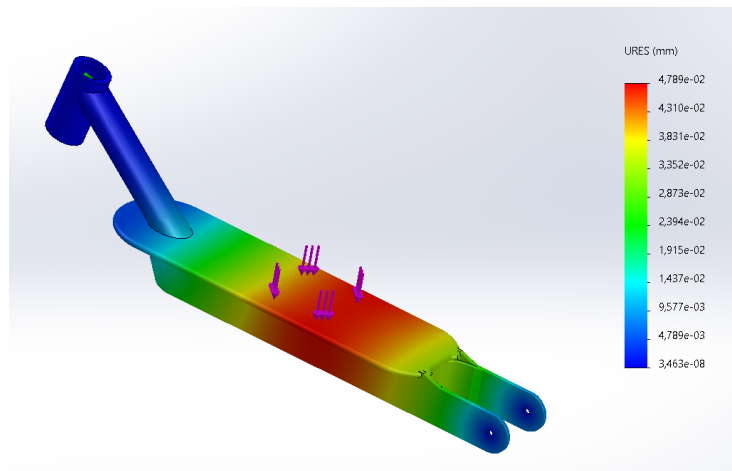


Figura 1. Desplazamientos resultantes

- FDS mínimo: 3,526

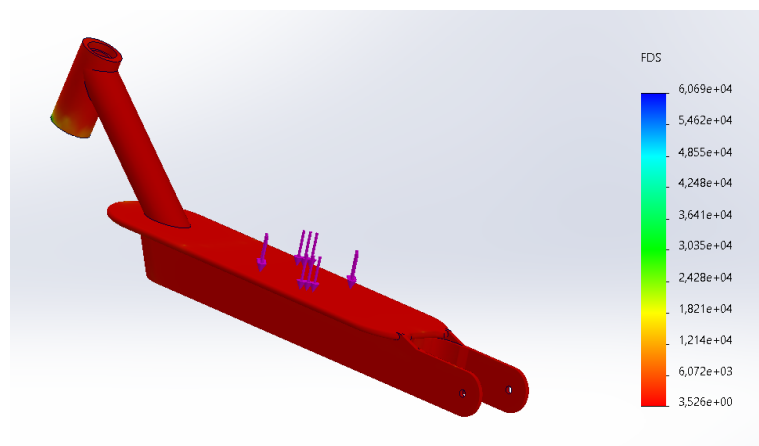


Figura 2. Factor de seguridad según von Mises

- Tensión de von Mises máxima: $1,564e07$ N/m²

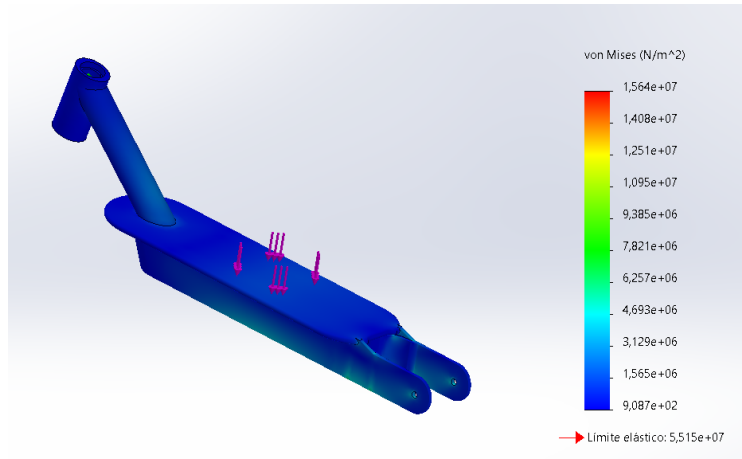


Figura 3. Tensión de von Mises

- Deformación unitaria resultante máxima: $1,052e-04$

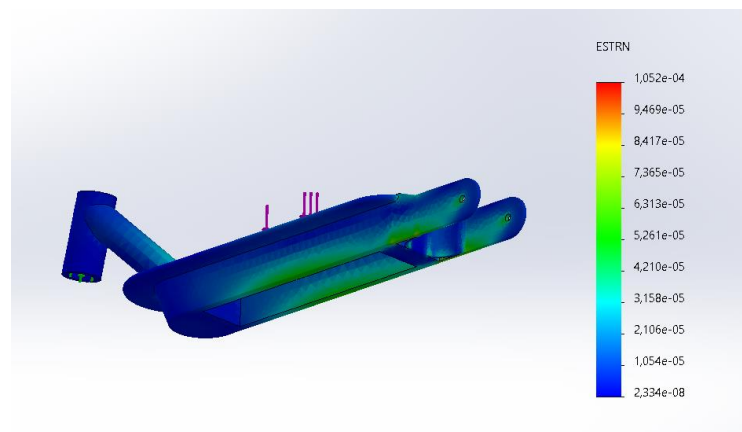


Figura 4. Deformaciones resultantes

Anexo IV: Imágenes de los resultados del análisis adaptado del modelo real

- Desplazamiento máximo: $7,744e-02$ mm

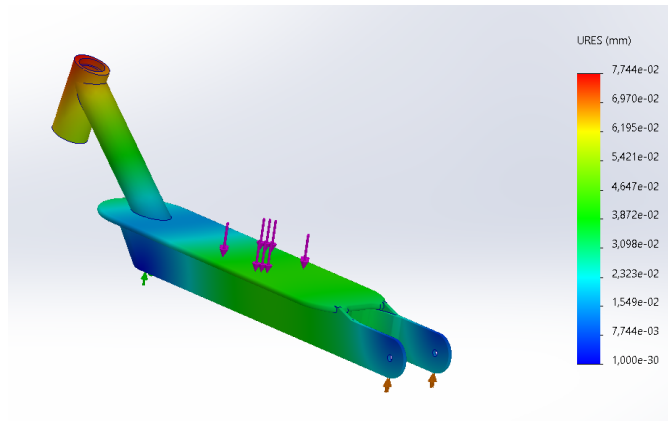


Figura 5. Desplazamientos resultantes

- FDS mínimo: 1,189

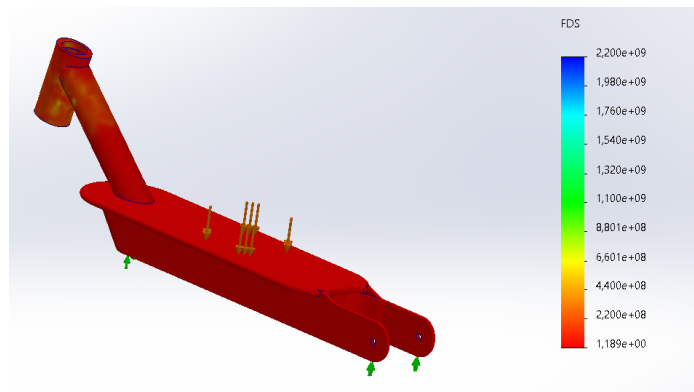


Figura 6. Factor de seguridad según von Mises

- Tensión de von Mises máxima: 4,639e07 N/m²

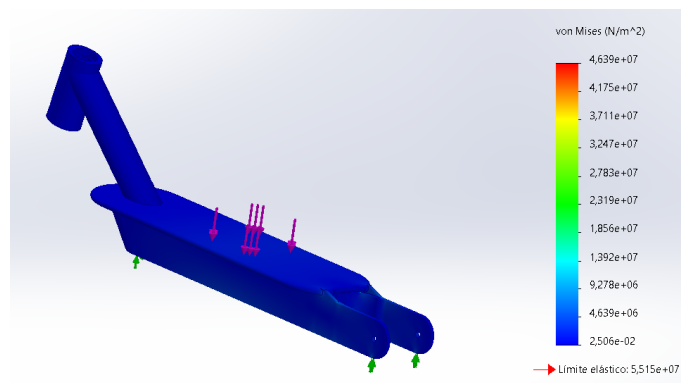


Figura 7. Tensión de von Mises

- Deformación unitaria resultante máxima: 4,104e-04

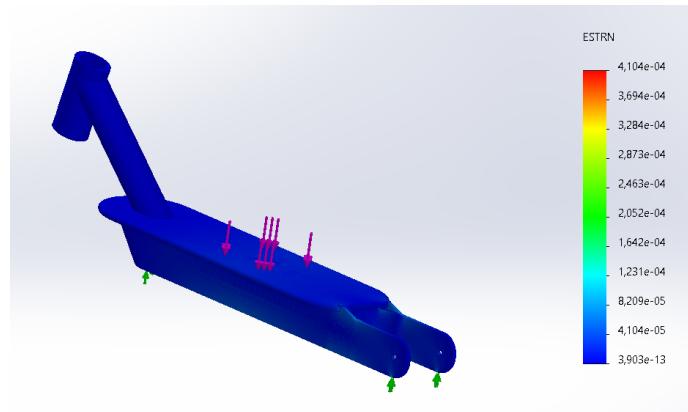


Figura 8. Deformaciones resultantes

Anexo V: Imágenes de los resultados del análisis del prototipo de fibra de carbono con epoxi y PVC

- Desplazamiento máximo: $8,044e-02$ mm

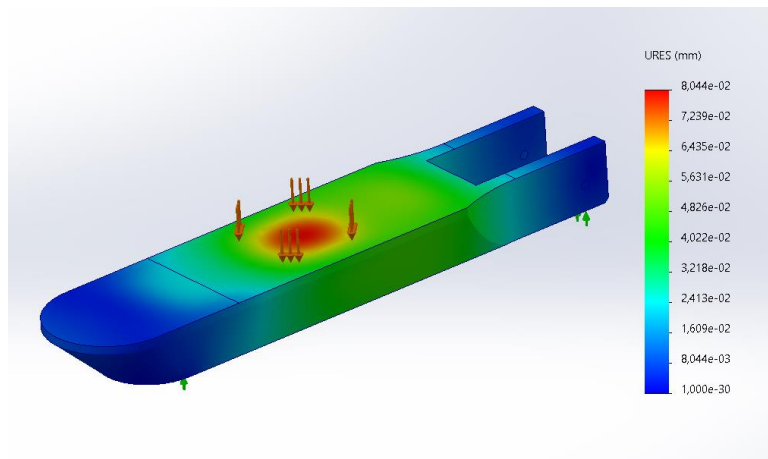


Figura 9. Desplazamientos resultantes

- FOS mínimo: 9,987

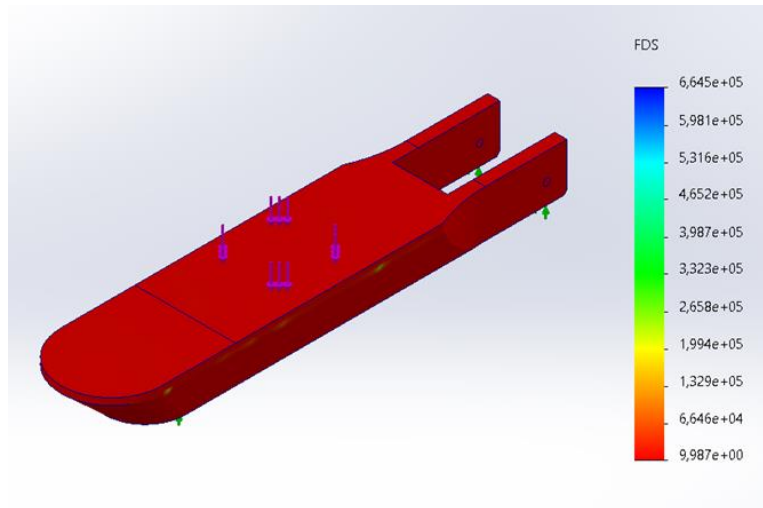


Figura 10. Factor de seguridad según Tsai-Wu

- Tensión de von Mises máxima: $1,352e07 \text{ N/m}^2$

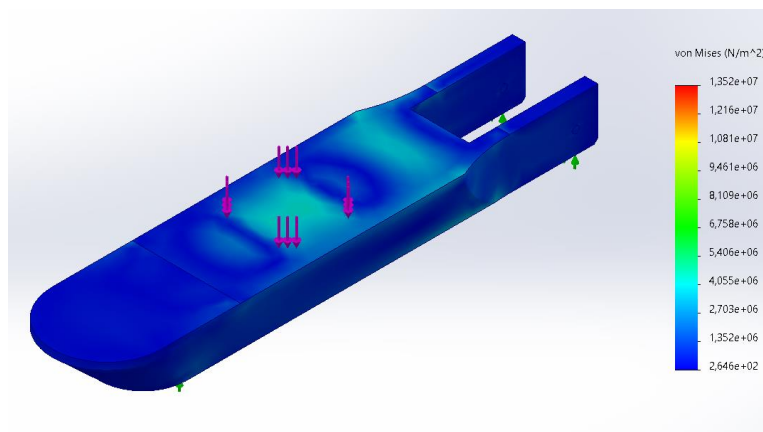


Figura 11. Tensión de von Mises

- Deformación unitaria resultante máxima: $1,306e-04$

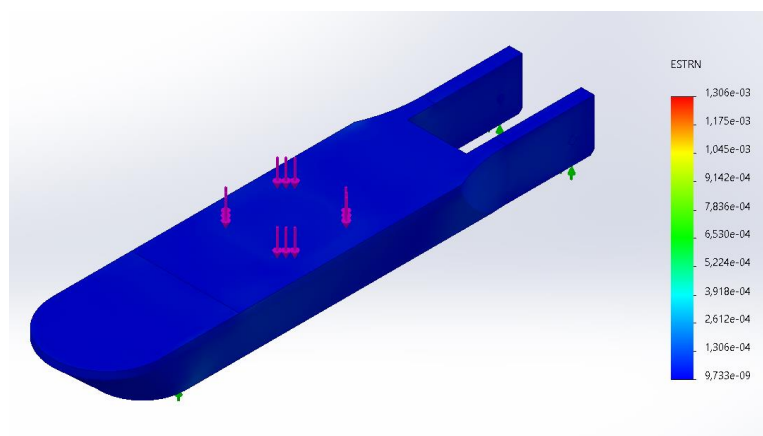


Figura 12. Deformaciones resultantes

Anexo VI: Imágenes de los resultados del análisis del prototipo de fibra de lino con bioepoxi y corcho

- Desplazamiento máximo: $8,044e-02$ mm

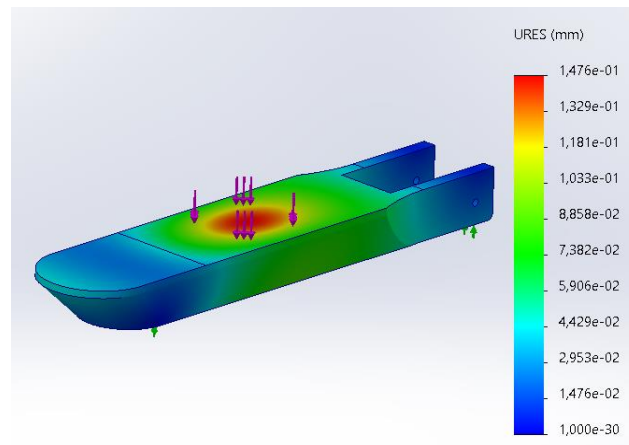


Figura 13. Desplazamientos resultantes

- FOS mínimo: 1,189

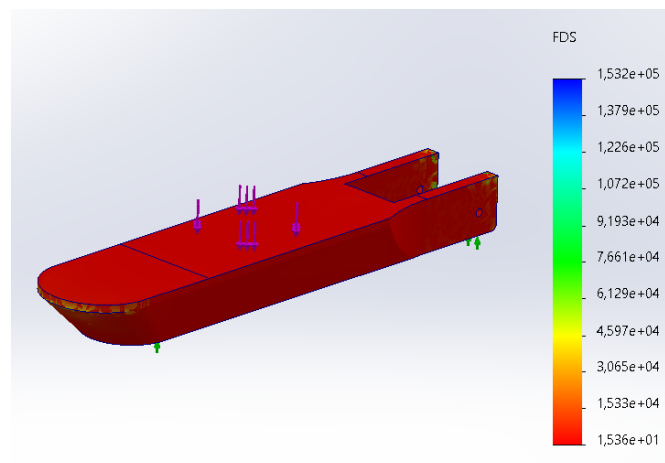


Figura 14. Factor de seguridad según Tsai-Wu

- Tensión de von Mises máxima: $4,639e07$ N/m²

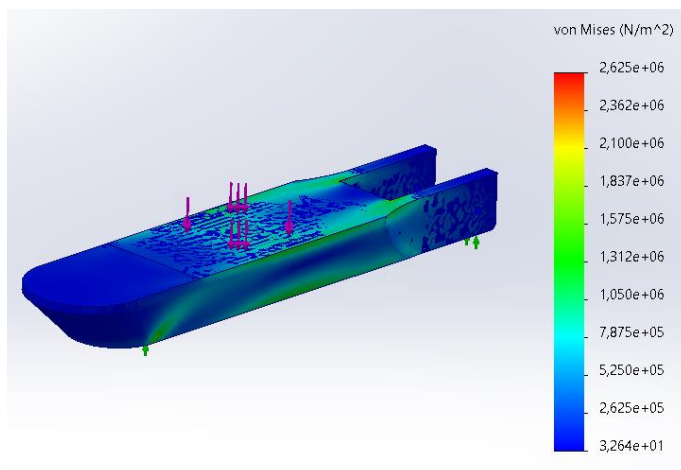


Figura 15. Tensión de von Mises

- Deformación unitaria resultante máxima: $4,104e-04$

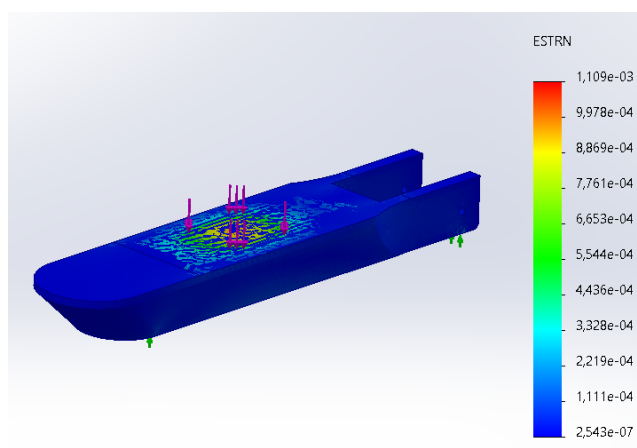


Figura 16. Deformaciones resultantes

Anexo VII: Prueba para la realización del molde definitivo

Para comenzar con el diseño del molde de prueba se partirá de un prisma rectangular de 120 mm de ancho, 260 mm de largo y 50 mm de alto. A este prisma se le sustraerá la base del patinete, pero habiendo aplicado una escala para reducir sus dimensiones y realizando un acortamiento de la parte central para desperdiciar menos material. El molde de prueba será el siguiente:

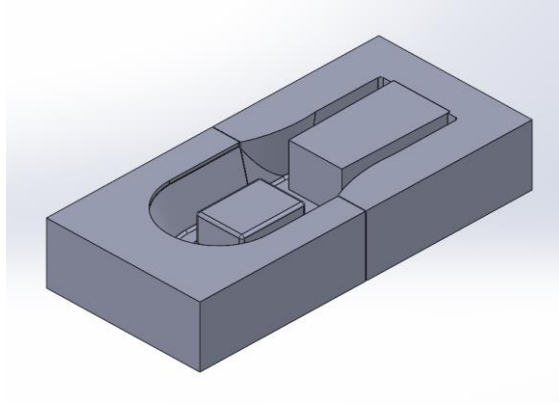
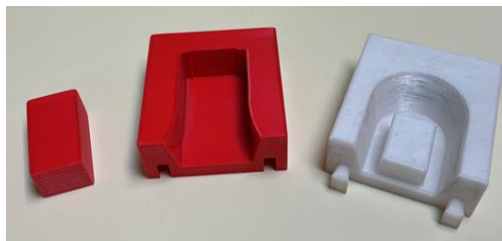


Figura 17. Molde para la base del patinete

La parte delantera estará impresa con Pet G y la parte trasera junto al postizo con PLA. Ambos son plásticos muy comunes en la fabricación aditiva, pero se pretende observar con cuál de ellos se consigue un mejor resultado. Los resultados de la impresión son los siguientes:



Figuras 18 y 19: Molde impreso para la prueba

Tras realizar la impresión del molde se observa a simple vista que el PLA (rojo) posee un mejor acabado que el Pet G (blanco), y por ello, el lijado necesario en el primero ha sido menor que con el segundo material. Este lijado es necesario para evitar aristas o esquinas vivas en el molde y conseguir que las capas de fibra de carbono se adhieran y no tengan irregularidades en su superficie tras realizar el prototipo.

El primer paso para realizar la prueba del prototipo ha sido cubrir la parte interior y superior del molde con dos capas de cera, eliminando posteriormente los restos tras cinco

minutos de secado para evitar excesos. Después, se le aplica una capa de desmoldeante para facilitar la extracción.

Con el molde ya preparado se prepara la resina, mezclando 100 ml de resina con 22 ml de endurecedor (indicaciones del fabricante). Posteriormente, se coge un trozo de fibra de carbono que recubra todo el interior y se impregna con la resina preparada. La proporción de resina que utilizaremos será más o menos 5/4 en peso respecto al de la fibra de carbono. Este composite preparado se extenderá sobre la superficie del molde para que al comprimirlo quede perfectamente adaptado a ella.

El compactado de las capas de fibra de carbono se realiza mediante vacío. Sobre el composite de fibra de carbono se colocan varias capas. La primera, una capa de plástico rojo con puntos para compactar y airear las capas de fibra de carbono, y evitar que se pegue la manta que se coloca encima. La manta repartirá el vacío y absorberá el resto de la resina sobrante. Por último, se colocará el plástico para realizar el vacío con mucho cuidado de que no queden espacios por los que entre el aire y se pierda el vacío. El vacío se conseguirá mediante un tubo unido a un descompresor que absorberá todo el aire del interior. Además, el molde se colocará en un horno a 50 grados para acelerar el proceso de moldeo.



Figura 20: Vacío para la prueba del molde

Tras un día en el horno el resultado obtenido es el siguiente:



Figura 21. Resultado de la prueba

Posteriormente, se desmolda la pieza con cuidado, pero se observa que hay que realizar las siguientes modificaciones para facilitar la extracción de la pieza final:



Figura 23. Resultado de la prueba desmoldeada

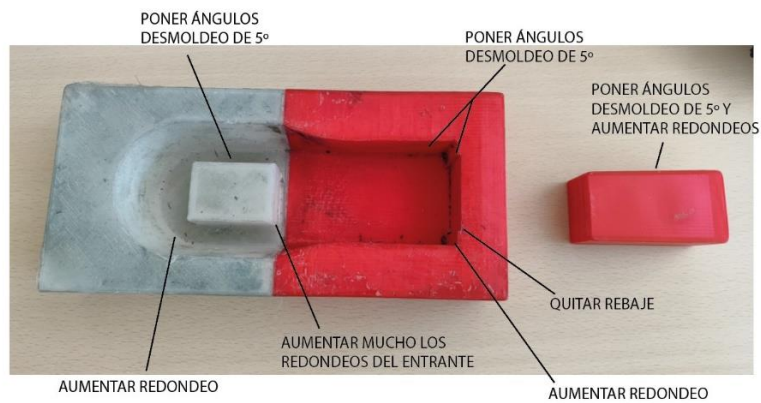


Figura 24. Modificaciones del molde

