



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño, análisis estructural y prototipado de la plataforma de un patinete eléctrico mediante materiales compuestos sostenibles.

Design, structural analysis and prototyping of an electric scooter platform using sustainable composite materials.

Autor

Iván Castillo Jiménez

Directores

David Ranz Angulo
Clara Luna Martín Compaired

Grado en ingeniería de tecnologías industriales

EINA UNIZAR

2024

Índice

1.	Introducción.....	4
1.1.	Objeto del trabajo	4
1.2.	Alcance del trabajo	5
2.	Normativa.....	5
3.	Estudio de mercado	7
4.	Análisis del modelo actual.....	8
4.1.	Análisis real	8
4.2.	Análisis adaptado.....	10
5.	Estructuras tipo sándwich.....	11
6.	Diseño y cálculo de los modelos	13
6.1.	Modelo de PVC y fibra de carbono con resina Epoxi	14
6.2.	Prototipo de corcho y fibra de lino con bioepoxi	16
6.3.	Conclusiones del análisis.....	17
7.	Proceso de fabricación del molde y del prototipo	17
7.1.	Fabricación del molde	18
7.2.	Fabricación del prototipo de fibra de lino con corcho.....	19
7.3.	Conclusiones sobre la fabricación del prototipo.....	22
8.	Ensayo real	22
9.	Conclusiones.....	24
10.	Bibliografía.....	24

1.Introducción

1.1. Objeto del trabajo

La utilización de medios de transporte individuales en áreas urbanas ha crecido de forma exponencial en los últimos años debido a la alta congestión en el tráfico de las grandes ciudades; entre ellos, el uso de motos, bicicletas y monopatines. Pero en especial, hay uno que destaca entre el resto: los patinetes eléctricos. Estos vehículos sostenibles de micromovilidad se han convertido en una alternativa muy popular en nuestros días debido a su fácil manejo, baja exigencia física, cero emisiones y buen rendimiento para desplazarse por la ciudad. Sin embargo, para que los patinetes eléctricos alcancen su máximo potencial en términos de autonomía, utilidad y maniobrabilidad, es necesario incidir en el aligeramiento de su estructura. La reducción del peso de la estructura no solo mejora la eficiencia energética, sino que también contribuye a un menor esfuerzo en el transporte cuando el patinete se encuentre plegado. Además del factor peso, el uso de materiales compuestos sostenibles se estudiará como una posible solución muy prometedora, combinando ventajas mecánicas con beneficios ambientales.

Este trabajo se centra en investigar y analizar el uso de materiales compuestos tipo sándwich con composites para reducir el peso del chasis de un patinete eléctrico, asegurando siempre la funcionabilidad y seguridad del vehículo, sustituyendo los materiales tradicionales como aluminio o aceros por otros mas ligeros y sostenibles. Además de ello, se fabricará el prototipo de la plataforma, analizando todo el proceso que conlleva con el fin de que pueda servir para futuras elaboraciones.

Como solución innovadora se utilizarán estructuras tipo sándwich para la realización de la base del patinete. Este tipo especial de materiales compuestos formados por dos pieles rígidas y finas, paralelas, unidas y separadas entre sí por un núcleo grueso pero ligero, con las cuales es posible lograr una estructura muy ligera garantizando la resistencia necesaria. Es por ello, que este tipo de materiales pueden ser excelentes para la estructura de un patinete eléctrico.

Las pieles que recubren el núcleo estarán hechas de composite, un sistema que consiste en la combinación de dos o más constituyentes distintos con el objetivo de obtener características y propiedades que superen las de los componentes por separado.

Por último, se espera que este trabajo contribuya al desarrollo del diseño y la fabricación de patinetes eléctricos más eficientes, ligeros y sostenibles, promoviendo así un medio de transporte más limpio, eficaz y accesible para todos, junto al aprendizaje sobre la elaboración de prototipos mediante materiales compuestos en la EINA.

1.2. Alcance del trabajo

Para llevar a cabo la investigación se seguirán distintas fases con el fin de poder abordarlo:

1. Estudiar la normativa que rige la utilización, fabricación y seguridad de los patinetes eléctricos para definir con exactitud un patinete eléctrico y a las pruebas que deberá ser sometido.
2. Pequeño estudio de mercado para obtener información sobre los productos actuales y elegir uno de ellos para utilizarlo como ideas inicial en el diseño del prototipo.
3. Prueba estructural que dicta la normativa del modelo real escogido, mediante el software Solid Works®, para realizar el futuro prototipo en base a este estudio.
4. Introducción y descripción de las estructuras tipo sándwich en composite que se utilizarán en los prototipos posteriores.
5. Diseño del modelo de la plataforma y análisis estructural en Solid Works®, utilizando el estudio del modelo real.
6. Proceso de fabricación con todas las etapas y obtención del prototipo real.
7. Ensayo real que exige la normativa con el modelo realizado y comparación con el estudio virtual.
8. Conclusiones sobre la utilización de estructuras tipo sándwich en composite en la base del patinete y el proceso de fabricación.

2. Normativa

Los patinetes eléctricos son un medio de transporte relativamente reciente en entornos urbanos pero que ha ido ganando popularidad de forma exponencial en los últimos años. Es por ello por lo que las autoridades nacionales e internacionales se han visto obligadas a establecer normativas para regular su uso y seguridad. Pero la primera pregunta que debemos hacernos es: ¿Qué es un patinete eléctrico?

La UNE (Asociación Española de Normalización, acrónimo de Una Norma Española), antes conocida como AENOR, se puso manos a la obra en 2020 para elaborar la norma UNE-EN 17128:2020, *Vehículos ligeros motorizados para el transporte de personas y mercancías e instalaciones relacionadas y no sujetos a homologación para uso en carretera. Vehículos eléctricos ligeros personales (PLEV). Requisitos de seguridad y métodos de ensayo (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en enero de 2021.)*, que junto al BOE (Boletín Oficial del Estado) mediante la *Resolución de 12 de enero de 2022, de la Dirección General de Tráfico, por la que se aprueba el Manual de características de los vehículos de movilidad personal*, han conseguido definir con exactitud lo que es un patinete eléctrico y regular su uso en el área urbana.

En la primera sección de la *Resolución de 12 de enero de 2022* se define lo que es un Vehículo de movilidad personal (VMP), que dice así: *Vehículo de una o más ruedas dotado de una única plaza y propulsado exclusivamente por motores eléctricos que*

pueden proporcionar al vehículo una velocidad máxima por diseño comprendida entre 6 y 25 km/h. Solo pueden estar equipados con un asiento o sillín si están dotados de sistema de autoequilibrado. Estos vehículos pueden estar equipados con baterías de hasta 100 VCC y con un cargador integrado de hasta 240 VCA de entrada.

Los VMP de transporte personal, se caracterizan con los datos de la siguiente tabla:

	VMP de transporte personal	
Velocidad máxima	Entre 6 y 25 km/h	
Potencia nominal por vehículo	Sin auto-equilibrado: $\leq 1000 \text{ W}$	Con auto-equilibrado: $\leq 2500 \text{ W}$
Masa en orden de marcha	< 50 kg	
Longitud máxima	2000 mm	
Altura máxima	1400 mm	
Anchura máxima	750 mm	

Tabla 1. Características de VMP de transporte personal

Atendiendo a la definición y las características de los VMP de transporte personal, los patinetes eléctricos entran dentro de este tipo de vehículos, regulados por esta resolución.

Para realizar el diseño y prototipado de la plataforma del patinete eléctrico será necesario garantizar la integridad estructural del vehículo. En la sección 15 de la *Resolución de 12 de enero de 2022* se indica que la integridad estructural quedará demostrada con el cumplimiento de los ensayos especificados en el Apéndice 1 apartado 3: Ensayos de integridad estructural.

Para el ensayo, se aplicará el procedimiento descrito en el apartado 12.2.1.2 de la norma UNE-EN 17128:2020:

“Aplicar progresivamente una masa de 100 kg o, cuando sea mayor, una masa igual a la carga útil máxima admisible marcada en el vehículo y multiplicada por un factor de seguridad de 2,5 durante 1 min con un dispositivo plano de una superficie de 100 mm x 100 mm en el centro de uno o dos pisos (véase la figura 1).”

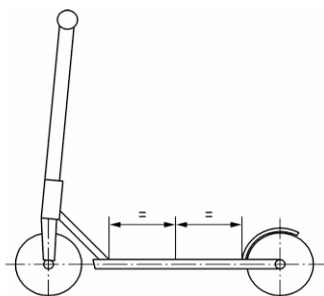


Figura 1. Centro de la cubierta

Para que el patinete sea capaz de superar el ensayo no deberá haber grietas, ni fracturas, ni hundimiento, ni desdoblamiento de la estructura. Además, este ensayo servirá como referencia para analizar la base del patinete original y posteriormente utilizarla para diseñar el prototipo.

El patinete deberá superar otros ensayos de la norma; la prueba de resistencia de impacto frontal y el ensayo dinámico de fatiga, pero para efectuar ambos es necesario el patinete completo y es por ello por lo que no se realizarán.

3. Estudio de mercado

El mercado de los patinetes eléctricos ha crecido de forma exponencial en los últimos años debido a la popularidad que han alcanzado por su precio, facilidad de uso y eficiencia para el transporte en las ciudades. Para fabricar la base del patinete eléctrico mediante materiales compuestos será necesario partir de un patinete real, pero la diversidad de marcas, modelos y precios dificulta la elección. Es por ello por lo que se va a investigar sobre los actuales patinetes en venta y realizar un pequeño análisis de mercado.

Se analizan de forma general los cuatro modelos de patinetes más vendidos en 2023:

- Xiaomi Mi Electric Scooter 3: Este modelo de la marca Xiaomi ha sido el más vendido de 2023 donde destacan la calidad en los materiales usados junto a un diseño moderno, la resistencia que posee frente a golpes, el buen manejo y estabilidad en la conducción, una autonomía de 30 km, un peso no muy elevado de 13,2 Kg, y todo ello a un precio no muy excesivo de 459,99 €.
- Cecotec Bongo Serie A: Este patinete se caracteriza por ser el más versátil del mercado por un buen precio y por ello es el segundo más vendido de todos después del Xiaomi Mi Electric Scooter 3. Posee tres modos de conducción para adaptar la conducción a la comodidad del conductor y a la batería restante. Además, tiene una buena potencia (700W) por un precio de 399,90 €, 50 € más barato que el anterior. Por el contrario, tiene una autonomía de solo 20 km.
- Xiaomi Mi Electric Scooter 4 Pro: Posee la mejor autonomía del mercado (55 km), sin tener en cuenta los patinetes que superan los 900€. Además de ello, es capaz de frenar en 4,5 segundos y sus ruedas antipinchazos permiten ir por terrenos irregulares. Por el contrario, pesa 17 Kg y tiene un precio de 799,99 €.
- Smartgyro Ziro 2: Otro de los mejores patinetes eléctricos del mercado es este de la marca Smartgyro. Por características es muy parecido a los dos primeros, pero con amortiguadores delanteros, un peso superior (15 Kg) y con la base más estrecha. Además, tiene un precio algo mayor, concretamente de 499,99 €.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los patinetes previamente detallados:

	Xiaomi Mi Electric Scooter 3	Cecotec Bongo Serie A	Xiaomi Mi Electric Scooter 4 Pro	Smartgyro Ziro 2
Precio (€)	459,99	399,90	799,99	499,99
Peso (kg)	13	13,5	17	15
Autonomía (km)	30	20	55	30
Potencia máxima (W)	600	700	700	500
Destacado	Diseño moderno y resistente	3 modos de conducción	Autonomía	Amortiguadores delanteros

Tabla 2. Comparativa de patinetes

Por su diseño, bajo peso, buena autonomía y un precio no muy elevado se escogerá el Xiaomi Mi Electric Scooter 3 como diseño de referencia. Además, la base de este patinete se lleva utilizando desde la primera versión hasta la tercera, incluso en las distintas variantes y modelos de cada una, con muy pequeñas modificaciones entre cada una de ellas.

4. Análisis del modelo actual

Tras estudiar el mercado en el sector de los patinetes eléctricos, se va a realizar el análisis de la plataforma del modelo Xiaomi Mi Electric Scooter 3®. De esta forma, se podrán comparar los resultados obtenidos con los del prototipo realizado posteriormente mediante materiales compuestos. Todos los análisis se van a realizar mediante el software Solid Works®.

4.1. Análisis real

El primer paso es realizar en Solid Works® la plataforma del modelo de Xiaomi®:

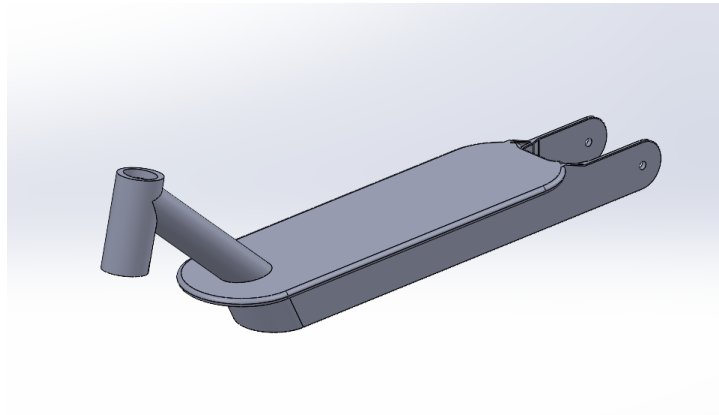


Figura 2. Diseño de la plataforma del Xiaomi Mi Electric Scooter 3®

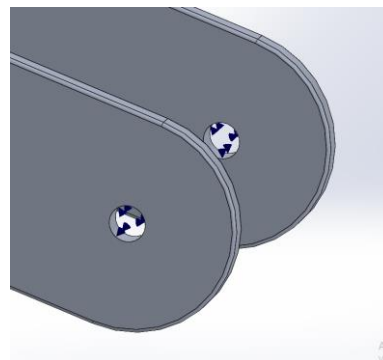
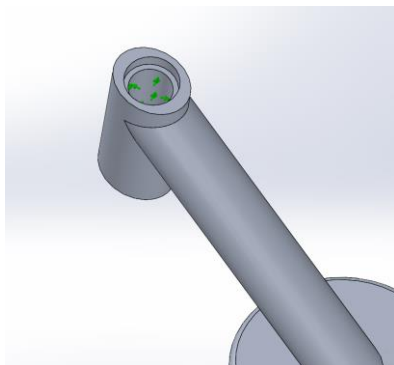
Este diseño tiene unas dimensiones máximas de 700 mm de largo, 150 mm de ancho y 70 mm de alto sin tener en cuenta la barra que conecta la base con el manillar

Con el diseño ya realizado, se llevará a cabo el análisis estático real del patinete eléctrico mediante elementos finitos:

1. El primer paso es asignarle material a la plataforma. El material utilizado es una aleación de aluminio ligera, pero a la vez resistente, concretamente la aleación 6061. El material ya está incluido en la base de datos de Solid Works®. El tipo de modelo será isotrópico elástico lineal, ya que sus propiedades son independientes de la dirección. En el Anexo I se detallan sus propiedades.

Tras incluir el material en el diseño realizado, el peso de la base del patinete de Xiaomi® es de **8342.616 gramos**, a la que habrá que sumarle el resto de los componentes. Esto supone un elevado peso para cargar posteriormente cuando el patinete este plegado.

2. Posteriormente, se aplicarán las condiciones de contorno: una sujeción fija en el agujero para el manillar y un rodamiento en cada agujero para simular el anclaje a una rueda.



Figuras 3 y 4. Sujeciones del análisis estático real

3. Como carga externa se aplicarán 980 N en dirección perpendicular y sentido hacia abajo (-Z) sobre una superficie de 100 x 100 mm situada en la zona central de la plataforma como se indica en la norma.

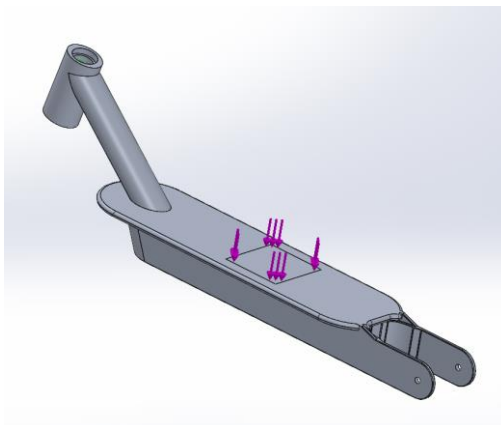


Figura 5. Aplicación de la fuerza para el ensayo

4. La malla se creará de forma automática, pero a la que se le disminuirá el tamaño del elemento a 10 mm para conseguir mejores resultados.
5. Por último, se ejecutarán estudios para obtener las tensiones de von Mises, los desplazamientos resultantes, las deformaciones unitarias y el factor de seguridad. En el Anexo II se detalla como se calculan los resultados y que significa cada uno. Además, en el Anexo III se muestran las imágenes de los resultados del ensayo para poder apreciar las distintas zonas.
 - Desplazamientos resultantes: El desplazamiento resultante máximo se da en la zona central de la plataforma, con un valor de $4,789e-02$. Estos desplazamientos máximos se encuentran en la parte central debido a que se comporta como una viga biapoyada y por ello en la base realizada con composite se tenderá a reforzar esta zona. Este desplazamiento máximo es muy pequeño por lo que apenas se apreciará a simple vista y cumplirá con los estándares de seguridad de forma muy holgada.
 - Factor de seguridad (FDS): El FDS mínimo es mayor que 1 (en torno a 3,5) en todo el sólido, por lo que el patinete cumplirá con el criterio.
 - Von Mises: La tensión de Von Mises máxima ($1,564e07$ N/m²) no supera en ningún caso el límite elástico del material ($5,515e07$ N/m²), por lo que cumpliría con solvencia el ensayo mediante dicho criterio y no variará la ubicación de sus nodos.
 - Deformaciones unitarias resultantes: Las zonas con mayor deformación se encuentran en la parte inferior del patinete, y aunque son de un orden muy bajo ($1,052e-04$), se tendrán en cuenta a la hora de reforzar el prototipo en composite.

Tras el análisis estático se ha comprobado que este modelo cumple con las condiciones de seguridad y por tanto puede ser usado como referencia real para la creación del prototipo.

4.2. Análisis adaptado

Debido a que solo se realizará la base sin la zona que conecta la plataforma con el manillar, y hay limitación para realizar el ensayo en la EINA, se realizará un análisis adaptado al original. Este análisis se comparará con el primero para ver cuanto difieren los resultados y poder ponerlo en práctica con el prototipo realizado en composite.

El único cambio respecto al análisis original serán las sujeciones, las cuales serán dos cilindros dispuestos de forma horizontal en la parte inferior de la plataforma:

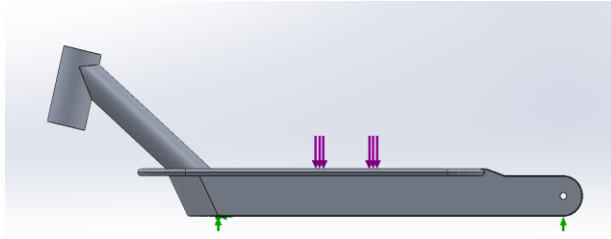


Figura 6. Sujeciones del análisis adaptado

En el Anexo IV se muestran las imágenes de los resultados del ensayo para poder apreciar las distintas zonas. Se analizarán los mismos resultados que en estudio anterior.

- Desplazamientos resultantes: Los desplazamientos resultantes siguen teniendo un valor muy pequeño y parecido al primer ensayo. El desplazamiento máximo es $7,744e-02$ mm
- Factor de seguridad (FDS): Como las tensiones de von Mises no superan el límite elástico del material, el FDS seguirá siendo mayor que 1. El valor crítico en este caso se acerca más a la unidad (1,189) porque la tensión máxima ha aumentado.
- Von mises: Las tensiones de von Mises máximas han aumentado un poco respecto al ensayo original, pero siguen siendo menores que el límite elástico del aluminio 6061.
- Deformaciones unitarias resultantes: Las deformaciones unitarias son un poco mas grandes respecto al primer ensayo, pero muy parecidas a este y con valores del orden de $e-04$.

Los cálculos no difieren de forma drástica entre uno y otro por lo que el ensayo adaptado se puede usar para diseñar y analizar base del patinete mediante estructuras sándwich en composite, teniendo en cuenta que este ensayo es un poco mas exigente que el anterior.

5. Estructuras tipo sándwich

Antes de comenzar con el prototipo es necesario introducir las estructuras tipo sándwich, materiales con los que se diseñará y fabricará el prototipo. Las estructuras sándwich son un tipo de diseño estructural en el que dos capas de material rígido están adheridas y separadas entre sí por un núcleo más ligero y resistente. Estas estructuras

combinan las propiedades de ambos materiales para conseguir un conjunto muy resistente a la flexión y la torsión con una excelente relación resistencia-peso. Las estructuras tipo sándwich tienen gran variedad de aplicaciones, incluyendo la industria aeroespacial, la construcción de barcos, la fabricación de automóviles, la industria ferroviaria y la construcción de edificios, entre otras áreas, y por ello pueden ser muy adecuadas en la fabricación de la base de los patinetes eléctricos.

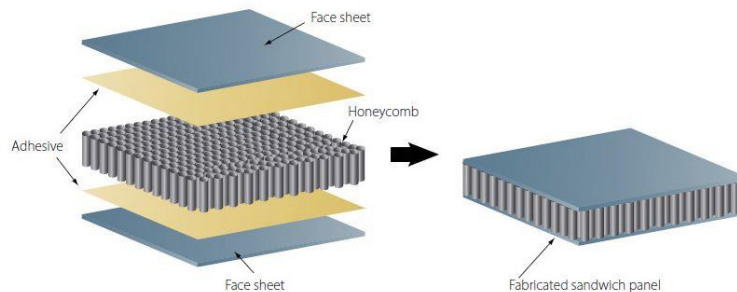


Figura 7. Estructura tipo sándwich

El núcleo suele estar compuesto por materiales de baja densidad y alta resistencia, lo que contribuye a la ligereza general de la estructura sin sacrificar su resistencia. Principalmente, hay dos tipos de estructuras para el núcleo: las espumas y los panales de abeja o “honeycombs”.

Las espumas son materiales ligeros que pueden ser fabricados con multitud de propiedades dependiendo de la aplicación, incluyendo distintas densidades y capacidades de compresión. Especialmente se utilizan polímeros, donde destacan el PVC (Policloruro de Vinilo), el PET (polietileno tereftalato) o el PUR (poliuretano), y distintos tipos de corchos.

Los panales de abeja consisten en una estructura de celdas hexagonales que proporcionan una excelente relación resistencia peso. El panel se suele fabricar con materiales como aluminio, papel y plásticos.

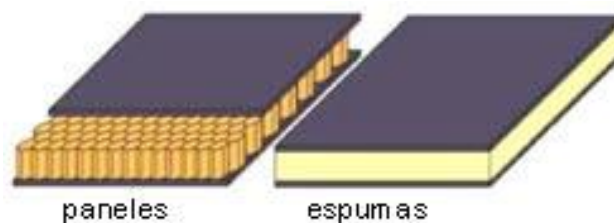


Figura 8. Núcleo de panal de abeja y espuma

Las capas externas, proporcionan la resistencia estructural y protegen de daños externos al núcleo. Los materiales más usados para esta piel exterior son los materiales compuestos, más conocidos como composites.

Un composite se define como un sistema material compuesto por dos o más fases a una escala macroscópica. Está diseñado para superar las propiedades individuales de las que tendrían sus constituyentes por separado. En aplicaciones estructurales, típicamente se compone de una fase de refuerzo, como fibras de carbono, fibras de vidrio, aramida o

materiales particulados, que proporciona rigidez y resistencia, y una fase de matriz, como resina epoxi, que actúa como “pegamento”, sosteniendo los refuerzos, los protege de daños y distribuye las cargas para un equilibrio adecuado. Debido a su naturaleza heterogénea, los materiales compuestos tienden a mostrar un comportamiento altamente anisótropo, lo que significa que su comportamiento varía según la dirección, aspecto que se deberá considerar.



Figura 9. Composite de fibra de carbono y resina epoxi.

6. Diseño y cálculo de los modelos

Para comenzar a realizar el modelo partiremos del modelo de Xiaomi® previamente analizado, pero debido a que este modelo estará hecho mediante estructuras tipo sándwich en composite, se simplificará para evitar zonas con poco espesor y difíciles de realizar con este tipo de materiales.

Este es el modelo de Solid Works® que se ha propuesto para hacer la base del patinete:

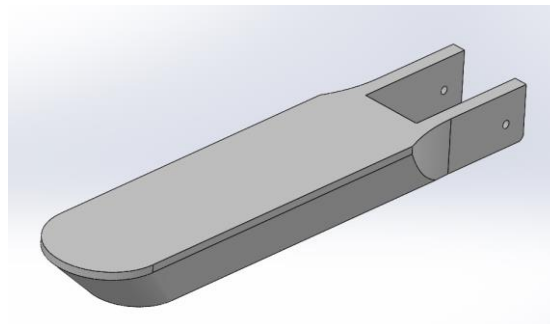


Figura 10. Modelo

Para conseguir que el modelo sea válido, se intentarán acercar al máximo los resultados de los desplazamientos del modelo a los desplazamientos del segundo ensayo del patinete Xiaomi®, teniendo en cuenta también el resto de los parámetros. Por ello, puede que los desplazamientos no sean exactamente iguales entre sí. Estos desplazamientos serán muy importantes ya que marcarán la estabilidad del conductor cuando se esté usando el patinete, pudiendo provocar caídas, movimiento de los pies y bajo confort si toman valores muy altos.

6.1. Modelo de PVC y fibra de carbono con resina Epoxi

La plataforma estará compuesta por un núcleo de espuma PVC, el polímero más utilizado para realizar núcleos de estructuras sándwich debido a su ligereza, versatilidad, durabilidad y capacidad para absorber impactos. Concretamente se va a utilizar espuma PVC 60.

El núcleo estará cubierto por capas de composite de fibra de carbono impregnadas con resina epoxi. La fibra de carbono es un compuesto muy utilizado, especialmente para la fabricación de aviones, coches de carreras y bicicletas, ya que es tres veces más resistente y firme que el aluminio, pero un 40 % más ligera. Combinado con resina Epoxi, que ayudará a distribuir las cargas, se conseguirá que el compuesto presente mayor rigidez. Este material compuesto es de tipo ortotrópico, por lo que habrá que tener en cuenta la orientación de sus fibras para el diseño de la plataforma.

En el Anexo I se detallan las propiedades de ambos materiales.

Para recubrir el núcleo se creará una superficie equidistante al modelo a una distancia de 0 mm y a la cual se le aplicarán las capas del composite de fibra de carbono. Para una primera iteración se utilizarán 6 capas de 0,2 mm, 4 de ellas en la dirección de avance del patinete y las otras 2 de forma perpendicular. Como se puede observar en la siguiente figura los resultados difieren mucho de los resultados deseados.

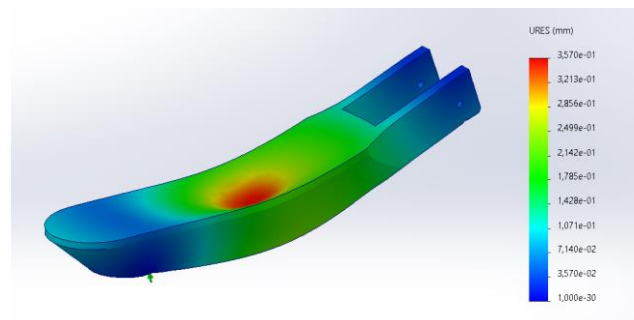
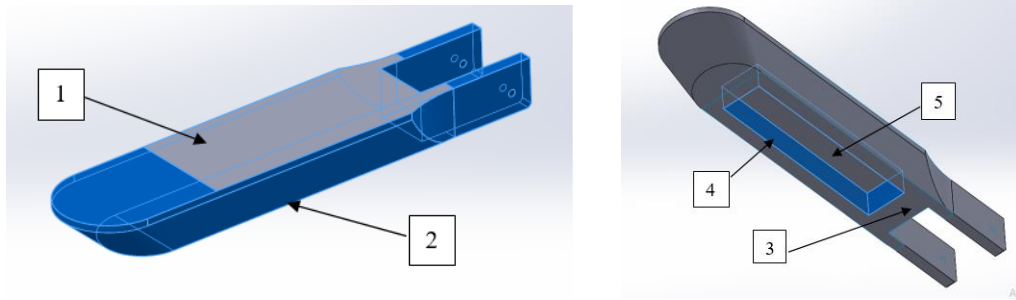


Figura 11. Primera iteración

Las zonas cercanas a la aplicación de la carga van a sufrir un mayor desplazamiento, en especial, la zona de aplicación, debido a la deformación de la superficie de la plataforma y a la flexión de la base, ya que es la zona con mayor desplazamiento. Es por ello por lo que será interesante dividir en varias zonas la superficie equidistante, reforzando las zonas más afectadas por la carga y aligerando las zonas menos influenciadas.

La plataforma se separará en cinco superficies como se muestra a continuación:



Figuras 12 y 13. Superficies equidistantes

Tras muchas iteraciones se consigue llegar al siguiente resultado, muy similar a los desplazamientos del patinete real:

- Las superficies 2 y 4 se componen de 10 capas de 0,2 mm de espesor, con 8 capas dispuestas en la dirección de avance y otras 2 de forma perpendicular.
- Las superficies 1, 3 y 5, zonas que más van a sufrir, estarán compuestas de 20 capas de 0.2 mm de espesor, con 14 capas en dirección del avance y 6 perpendiculares a estas.

Es decir, el espesor total máximo es de 4 mm y el mínimo de 2 mm. Además, el peso de esta configuración es solo **1,70 kg**, lo que supone el 20% del peso de la base de aluminio.

En el Anexo V se muestran las imágenes de los resultados del ensayo. Los resultados principales de la configuración son los siguientes:

- Desplazamientos resultantes: El máximo desplazamiento es $8,044e-02$ mm que no difiere mucho de los $7,744e-02$ mm del ensayo con el patinete Xiaomi®.
- Factor de seguridad (FOS): Al ser una estructura hecha con materiales compuestos, las tensiones de von Mises no son importantes si no sabemos si el conjunto aguantará, ya que este criterio se utiliza para materiales isótropos. Es por ello por lo que se utilizará el criterio de error de Tsai-Wu, que se aplica para determinar el factor de seguridad de los vaciados ortróticos compuestos.

Se puede apreciar que el FOS mínimo es 9,987 (casi 10), valor muy superior a 1. Esto significa que cumple de forma muy holgada el ensayo y se deberá tener en cuenta en el diseño real del prototipo quitando capas de composite.

- Von-Mises: La tensión máxima de von Mises es $1,352e07$ N/m², un poco más pequeña que la del ensayo de referencia ($4,632e07$ N/m²)
- Deformaciones unitarias: Las deformaciones máximas en este caso ($1,306e-03$) son un poco mayores que en el ensayo de referencia que eran $4,1e-04$, pero al cumplir el FOS de forma muy holgada y viendo que son muy pequeñas no será un factor importante para tener en cuenta.

6.2. Prototipo de corcho y fibra de lino con bioepoxi

Como solución sostenible se va a analizar un prototipo compuesto por un núcleo de corcho y piel de fibra de lino con bioepoxi.

El corcho es uno de los mejores materiales 100% naturales debido a sus características: resistente y ligero, aislante térmico y acústico, impermeable a líquidos, compresible y elástico, ignífugo e hipoalergénico. Además, cabe destacar que España es el segundo productor de corcho del mundo, solo por detrás de Portugal, con lo que la huella de carbono para fabricar el prototipo será mínima eligiendo corcho de origen nacional.

Las fibras de lino se extraen directamente de la planta de lino que, tejidas posteriormente entre sí, forman una tela para mejorar las cualidades de absorción de vibraciones, propiedades mecánicas, reducción de peso y la apariencia estética de las piezas composite. Junto a la resina bioepoxi o epoxi ecológico, hechas con un alto contenido biológico y recursos renovables, que repartirá las cargas uniformemente sobre la fibra de lino, se formará un composite que recubrirá el núcleo de corcho.

En el Anexo I se detallan las propiedades de ambos materiales.

Volviendo a realizar el mismo ensayo ejecutado con el prototipo de PVC y fibra de carbono, se aprecia que en este caso se producen tipos de desplazamiento parecidos, y por ello se volverá a dividir el modelo en distintas zonas según se vean afectadas por la carga.

Tras muchas iteraciones, cabe destacar que, al aumentar el espesor de las capas, los desplazamientos locales en la zona de la carga apenas disminuyen y es por ello por lo que se decide parar en el siguiente resultado:

- 12 mm de espesor en las superficies perpendiculares a la dirección de la carga (parte superior, inferior y zona superior del hueco para la batería).
- 10 mm de espesor en el resto de las zonas.

El peso de esta configuración es de **4,5 kg**, que comparado con los mas de 8 kg del modelo Xiaomi, supone una reducción del 43,75%.

En el Anexo VI se muestran las imágenes de los resultados del ensayo. Los resultados principales de la configuración son los siguientes:

- Desplazamientos resultantes: El máximo desplazamiento es $1,476e-01$ mm que difiere un poco de los $7,744e-02$ mm del ensayo con el patinete Xiaomi®. Este desplazamiento se produce únicamente en la zona de aplicación de la carga y sigue siendo un valor pequeño que no condicionará al confort del usuario.
- Factor de seguridad (FOS): En este caso también se utilizará el criterio de error de Tsai-Wu para determinar el factor de seguridad de la estructura sándwich. El FOS alcanza un valor mínimo de 15, valor demasiado elevado con respecto a 1 y que se tendrá en cuenta para la fabricación del prototipo.

- Tensión de Von Mises: La tensión máxima de von Mises es $2,625e06 \text{ N/m}^2$, un valor más pequeño que la del ensayo de referencia ($4,632e07 \text{ N/m}^2$)
- Deformaciones unitarias: Las deformaciones máximas en este caso ($1,109e-03$) son un poco mayores que en el ensayo de referencia que eran $4,1e-04$, pero al cumplir el FOS de forma muy holgada y viendo que son muy pequeñas no será un factor importante para tener en cuenta.

6.3. Conclusiones del análisis

Tras realizar el análisis de ambos modelos se llega a las siguientes conclusiones:

- Los prototipos muestran desplazamiento local en la zona donde se aplica la carga, sobre todo el segundo modelo.
- Los análisis realizados muestran que los dos prototipos tienen factores de seguridad según el criterio de Tsai-Wu muy altos (en torno a 10 en el primer análisis y un poco mayor de 15 en el segundo) por lo que superan de forma muy holgada los ensayos.

Es por ello, que para la fabricación real del patinete se deberá buscar un equilibrio coherente entre los desplazamientos y el factor de seguridad. Para conseguirlo se reducirán las capas de fibra de carbono.

7. Proceso de fabricación del molde y del prototipo

Tras las conclusiones obtenidas en los análisis virtuales, se va a reducir el número de capas de fibra de lino que recubrirán el núcleo de corcho. Además, como la construcción se va a realizar de forma artesanal, no se podrán incluir todas las capas que se quería inicialmente debido al escaso espesor de la parte posterior y por la difícil distribución de estas de forma manual. Finalmente se colocarán fibras de lino obteniendo 7 mm de espesor en la superficie superior e inferior y 3 mm de espesor en el resto de las zonas. Los desplazamientos estimados del prototipo son los siguientes:

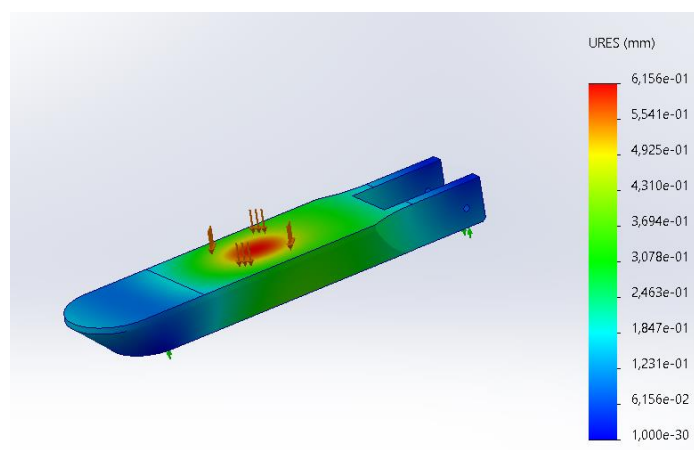


Figura 14. Desplazamientos estimados del prototipo a realizar

El prototipo se comenzará a fabricar con un molde hecho mediante impresión 3D. Este molde estará abierto por la parte superior, para adherir las capas del composite de fibra de lino a la superficie, llenarlo con el material del núcleo, y por último tapanlo con más capas de material. Mediante vacío se conseguirá unificar el conjunto y curar las capas de composite, para seguidamente desmoldarlo y obtener la pieza.

7.1. Fabricación del molde

Antes de fabricar el molde definitivo primero se elaborará otro molde de prueba para concretar y modificar, en caso de error, el material utilizado, las dimensiones, las distintas zonas del molde, los ángulos de desmoldeo y los radios de redondeo.

El molde estará dividido en varias zonas ya que no se puede realizar en una sola pieza por el tamaño de las máquinas de impresión 3D de la EINA, y por ello, será importante añadir dos colas de milano en las uniones de las distintas partes del molde para evitar que se muevan entre sí. Además, será necesario un postizo para evitar daños e incluso roturas al desmoldear en la parte posterior del patinete, la cual es la más estrecha y débil. Este postizo se extraerá con la pieza y posteriormente se retirará hacia atrás.

Tras la realización del molde de prueba (detallado en el Anexo VII) se debe prestar mucha atención en las siguientes zonas:

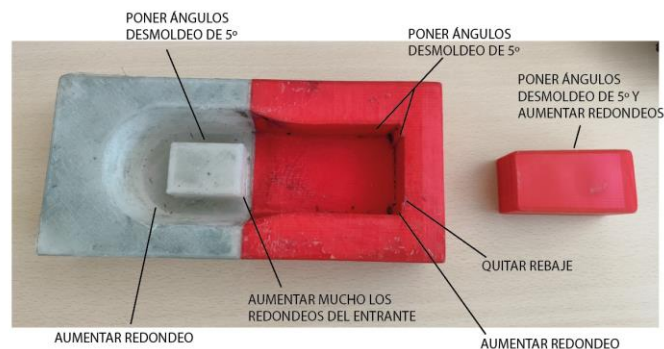


Figura 15. Modificaciones del molde

Aplicando las modificaciones previamente detalladas se obtiene el siguiente diseño:

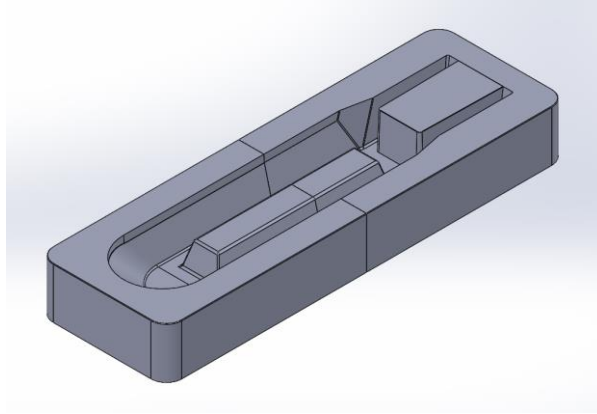


Figura 16. Diseño del molde definitivo

7.2. Fabricación del prototipo de fibra de lino con corcho

El molde del prototipo se realizará mediante fabricación aditiva con PLA, que finalmente se realizará en tres partes debido a las dimensiones de las impresoras 3D de la EINA. Estas fracciones del molde se unirán entre sí con colas de milano. El resultado obtenido es el siguiente:



Figuras 17 y 18: Molde para la fabricación del prototipo

Posteriormente, se pegarán las piezas de forma que quede un conjunto bien unido para evitar que se despegue durante el proceso de fabricación mediante vacío y se lijará el exceso de resina sobrante para poder adherir sin problemas las capas de lino con bioepoxi al molde.

A continuación, se cortarán el núcleo de corcho con las medidas previamente obtenidas tras eliminar el espesor de las capas de lino sobre el modelo y partiéndolo de forma coherente para poder introducirlo en el molde.



Figuras 19 y 20: Molde pegado y núcleo de corcho



Figuras 21: Núcleo de corcho cortado

Con el molde unido y los núcleos preparados, se cortarán las capas de fibra de lino necesarias que recubrirán la parte interior del molde y la parte superior del corcho. Estas capas se impregnarán con resina bioepoxi y se comenzarán a extender sobre la superficie del molde. Se incluirán 4 capas de unos 0,75 milímetros de espesor que cubran toda la superficie del molde y a las que se añadirán otras 6 capas que cubran solo la parte inferior. Cuando se recubre el molde con las capas necesarias de composite de lino, se montan los núcleos de corcho en el interior y, por último, en la parte superior se extienden otras 10 capas, obteniendo de esta manera la estructura tipo sándwich. Esto supone un espesor de unos 7 mm en las superficies superior e inferior, y de unos 3 mm en el resto de las zonas.



Figuras 22 y 23: Capa de lino bajo el núcleo y estructura sándwich montada

La compactación y unión de las capas del sándwich se realizará mediante vacío. Sobre la parte superior del conjunto se colocan varias capas. La primera, una capa de plástico rojo con puntos para compactar y airear las capas de fibra de lino, y evitar que se pegue la manta que se coloca encima. Después, una manta que 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. El vacío se conseguirá mediante un tubo unido a un descompresor que absorberá todo el aire del interior.



Figuras 24: Compresión de las capas por vacío

Realizando el montaje del vacío nos damos cuenta de que la pieza y el molde van adquiriendo temperatura ya que las fibras de lino han absorbido una gran cantidad de

resina, y es por ello por lo que se prevén deformaciones debidas a las altas temperaturas por el curado de la resina.

Tras tres días de espera se aprecia como se ha deformado el molde y ha hervido la resina, por lo que su desmoldeo será muy complicado. Será necesario romper el molde para ver el resultado del prototipo. Después de extraer la pieza se realizará un lijado de la superficie para uniformar las zonas y que el patinete se asemeje lo máximo posible al diseñado, con un peso final del producto de **3,2 kg**.



Figuras 25 y 26: Fotos del prototipo final

7.3. Conclusiones sobre la fabricación del prototipo

Para futuras piezas realizadas con fibra de lino con epoxi:

- Se deberá tener mucho cuidado con el tipo de resina utilizada, la cual debe tener un pico térmico bajo, y con la cantidad de resina absorbida por la fibra de lino, ya que, en este caso, se han producido deformaciones tanto en el molde como en la pieza por el aumento de la temperatura. Además, el exceso de resina ha provocado que las fibras de lino se adhieran demasiado a la superficie del molde.
- El diseño no debe tener espesores muy pequeños, como la parte posterior de la base fabricada, para poder incluir las fibras de lino necesarias y distribuirlas de forma correcta. Asimismo, con piezas más grandes se podrá distribuir mejor las capas de fibra de lino
- Los redondeos y ángulos de desmoldeo deberán ser aún más grandes para facilitar la extracción de la pieza.

8. Ensayo real

El ensayo real se realizará con una prensa hidráulica que ejercerá la fuerza de 100 kg, (aproximadamente 1 kN) en el área de 10 x 10 cm sobre la parte central de la base del patinete. El patinete se colocará como en los ensayos realizados en Solid Works,

concretamente, sobre dos apoyos cilíndricos (sobre la cara lateral) para simular el apoyo lineal. En la siguiente figura se muestra la disposición del ensayo:



Figuras 27: Disposición inicial del ensayo realizado

En el ensayo, la prensa hidráulica baja hasta casi entrar en contacto con la placa donde se ejerce la fuerza y ahí comienza a aplicar progresivamente la carga hasta los 100 kg. La prensa avanza con una velocidad de 2mm/min.

En el siguiente gráfico se muestran los desplazamientos de la prensa desde el inicio de carga hasta que llega a 1kN:

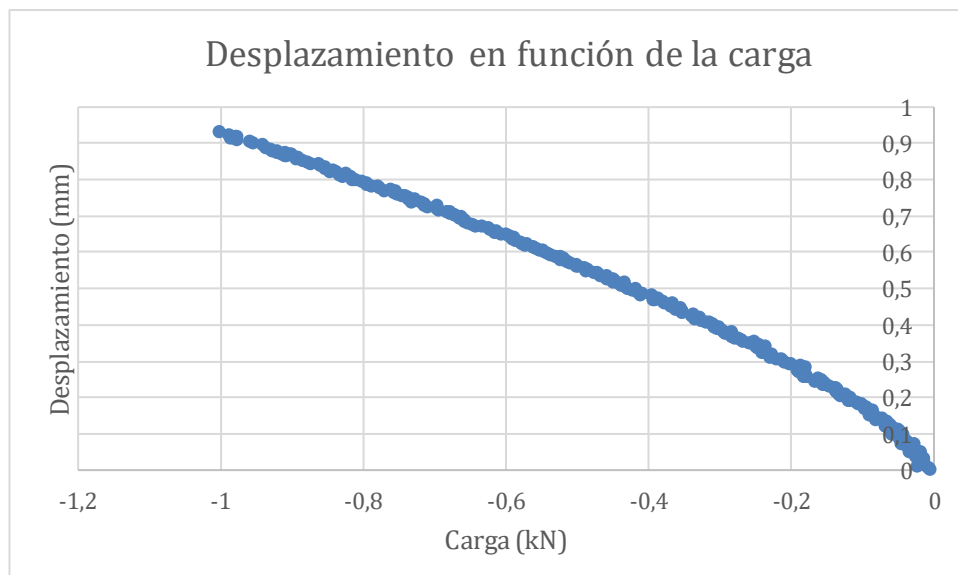


Gráfico 1. Evolución de los desplazamientos en función de la carga

Observando la gráfica, se puede apreciar que el desplazamiento final de la prensa es de alrededor de 0,9 mm. El resultado esperado era de unos 0,62 mm, pero, tanto por la pequeña variabilidad de unos tipos de materiales y otros, como por la fabricación artesanal de la pieza, el resultado ha aumentado.

9. Conclusiones

Tras el proceso de investigación realizado se sacan las siguientes conclusiones:

- La utilización de estructuras sándwich en composite resulta muy interesante para la fabricación de este tipo de piezas, debido a sus buenas propiedades conjuntas, capaces de soportar cargas exigentes sin problema, y por su baja densidad global, pudiendo reducir considerablemente el peso en comparación con piezas construidas en acero o aluminio. Esto conlleva una mayor autonomía del vehículo y un esfuerzo menor para llevarlo cuando esta plegado.
- Para el prototipado de la base y la futura fabricación industrial de la misma se deberá tener muy en cuenta el desplazamiento local provocado por la carga y el factor de seguridad de la plataforma para conseguir un equilibrio entre la seguridad del usuario y la cantidad de material utilizado.
- El diseño es muy importante para realizar de forma lo más exacta posible el prototipo real con estructuras tipo sándwich y, sobre todo, de forma “artesanal” como en este caso. Las zonas estrechas impiden la correcta colocación de las fibras manualmente, por lo que, la utilización de estructuras sándwich sería muy interesante en piezas con formas simples.
- La realización de piezas sostenibles es posible utilizando materiales compuestos, como es el caso de la plataforma del patinete realizada con fibras de lino impregnadas en bioepoxi y con núcleo de corcho.

10. Bibliografía

- Norma UNE-EN 17128:2020: *Vehículos ligeros motorizados para el transporte de personas y mercancías e instalaciones relacionadas y no sujetos a homologación para uso en carretera. Vehículos eléctricos ligeros personales (PLEV). Requisitos de seguridad y métodos de ensayo (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en enero de 2021).*
- Resolución de 12 de enero de 2022, de la Dirección General de Tráfico: *Manual de características de los vehículos de movilidad personal.*
- Mi Electric Scooter 3 Xiaomi: <https://www.mi.com/es/product/mi-electric-scooter-3/>

- Los 5 patinetes eléctricos más elegidos del 2023:
<https://solumpv.com/actualidad/patinete-electrico-mas-vendido/>
- Cecotec Bongo Serie A: <https://cecotec.es/es/patinetes-electricos/bongo-serie-a>
- Ayuda en línea de Solid Works:
https://help.solidworks.com/2022/spanish/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm