



Universidad
Zaragoza

1542

Trabajo Fin de Grado

Diseño, fabricación y análisis de una rampa ortopédica
con materiales poliméricos

Design, manufacture and analysis of an orthopedic
ramp with polymeric materials

Autor

Francisco Gutiérrez Boira

Director

Jesús Cuartero Salafranca

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

EINA UNIZAR

2025

Índice

1.	Introducción.....	4
1.1.	Objeto	4
1.2.	Alcance del trabajo.....	5
2.	Estudio de la técnica.....	5
3.	Diseño	7
3.1.	Diseño actual.....	7
3.2.	Diseño propuesto	9
4.	Análisis de elementos finitos.....	9
4.1.	Rampa de aluminio	9
4.1.1.	Materiales	9
4.1.2.	Condiciones de contorno	10
4.1.3.	Cargas externas	11
4.1.4.	Resultados.....	12
4.2.	Rampa de Composite.....	14
4.2.1.	Materiales	15
4.2.2.	Condiciones de contorno	16
4.2.3.	Cargas externas	16
4.2.4.	Resultados.....	17
5.	Fabricación	19
6.	Ensayo	23
7.	Mejora de la rampa de materiales compuestos.....	25
7.1.	Fibra de Carbono.....	26
7.2.	Resultados	26
7.3.	Ensayo	27
8.	Comparación	28
8.1.	Comparación estructural.....	28
8.2.	Comparación económica	29
9.	Conclusiones	30
10.	Bibliografía.....	31

1. Introducción

1.1. Objeto

La accesibilidad es un derecho fundamental que permite a las personas, independientemente de sus capacidades físicas, tomar parte y de forma autónoma en la sociedad. En particular, este derecho aplica a los usuarios de sillas de ruedas, quienes frecuentemente encuentran obstáculos arquitectónicos que limitan su movilidad y restringen su acceso a ciertos espacios. El diseño de infraestructuras accesibles como rampas portátiles adaptadas, es una posible solución a este problema.

Según estudios sobre el mercado actual de rampas y productos similares, la mayoría de las infraestructuras son de aluminio o metales. Estas plantean algunos inconvenientes como la resistencia a la corrosión, su alta conductividad térmica, el peso, el coste, superficie resbaladiza con la lluvia, etc. En cambio, si estas rampas se fabricasen con materiales poliméricos y sintéticos presentar numerosas ventajas con respecto a las anteriores.

En este trabajo, por un lado, se llevará a cabo un análisis comparativo entre una rampa de aluminio y una rampa de materiales poliméricos y sintéticos, y por otro lado, se analizarán sus características físicas y estructurales para evaluar su seguridad, rendimiento, comodidad y usabilidad. Para ello, se harán diversos estudios simulados por ordenador con el método de elementos finitos para obtener datos como los desplazamientos, cociente de seguridad, tensiones normales y cortantes, deformaciones, y se aplicarán los criterios necesarios para cada tipo de material. Además, se fabricará un prototipo de rampa de materiales poliméricos.

El material por utilizar consistirá en un composite con una configuración tipo sándwich, que dispondrá de un núcleo de espuma de PVC (policloruro de vinilo) y unas láminas en la cara superior e inferior de fibra de vidrio.

A través de la comparación, se evaluará si el uso de materiales poliméricos puede ser una alternativa más eficiente y segura frente a las rampas convencionales de aluminio, contribuyendo al desarrollo de una solución distinta al problema de la accesibilidad.

1.2. Alcance del trabajo

En la realización de este trabajo se han llevado a cabo las siguientes fases:

1. Estudio de la normativa relativa a los dispositivos de mejora a la accesibilidad para conocer las restricciones, medidas y consideraciones a tener en cuenta en el diseño de la nueva rampa (Anexo I).
2. Estudio de los sistemas utilizados actualmente y su mercado para obtener información sobre los productos existentes.
3. Obtención del diseño de una rampa de aluminio similar a las utilizadas normalmente y realización de análisis estáticos de la misma para recabar datos estructurales mediante el software Solid Works®.
4. Diseño de una rampa con los materiales escogidos y dimensiones próximas a la de aluminio para su posterior análisis estático mediante el software Abaqus®, comparando distintas configuraciones del material compuesto.
5. Comparación de los resultados obtenidos en ambos análisis y los recursos.
6. Documentación del proceso de fabricación de la rampa llevado a cabo en las instalaciones de la EINA para obtener un prototipo.
7. Ensayo experimental a tensiones para evaluar su desempeño en resistencia, seguridad y funcionalidad.
8. Conclusiones sobre el análisis comparativo de ambas estructuras y viabilidad de fabricación.

2. Estudio de la técnica

Las rampas ortopédicas portátiles son dispositivos diseñados para facilitar la accesibilidad de personas en silla de ruedas o con movilidad reducida a espacios con obstáculos o donde no se ha implementado una estructura dedicada a estos usuarios. Son una solución práctica y temporal para superar desniveles, escalones o bordillos.

Las características principales de estas estructuras son:

- Muchas tienen la capacidad de plegarse o cambiar su configuración para facilitar su almacenamiento.
- Son ligeras, fabricadas con metales como el aluminio o polímeros de alta resistencia, lo que permite transportarlas con comodidad.
- Tienden a soportar una carga máxima de entre 250 kg y 400 kg.
- Disponen de una superficie antideslizante como texturas rugosas o de materiales específicos para evitar resbalones y caídas.
- Están diseñadas de manera que pueden fijarse de forma segura con el fin de que no se produzcan desplazamientos accidentales.

Estos dispositivos se pueden usar en viviendas privadas, para salvar escalones en la entrada o dentro de la casa, para el acceso a vehículos como coches, furgonetas o autobuses adaptados, o en espacios públicos o privados con el fin de mejorar su accesibilidad o como solución temporal.

Entre las alternativas a las rampas portátiles se podrían considerar las plataformas elevadoras verticales para desniveles mayores, salvaescaleras inclinados cuando hay escaleras sin una alternativa o los ascensores adaptados que son la opción más cómoda y segura. Entre los problemas asociados a estas opciones cabe mencionar la necesidad de corriente eléctrica, su difícil instalación, el hecho de que ocupan mucho espacio, además de que pueden no ser viables en determinadas edificaciones y de que utilizan tecnología costosa que requiere mantenimiento.

En el análisis de la rampa de aluminio se ha utilizado como modelo la rampa “LIEKUMM Rampa Plegable Aluminio para Sillas de Ruedas 91,5 x 77cm” de 156,99€ (Figura 1). Sus características son:

- Dimensiones: 91,5l. x 77an. x 4,5al. centímetros
- Impermeable y antideslizante
- Capacidad de carga máxima de 400 kg
- Peso de 6,6 kg
- Plegable
- Rango de altura de 8 cm a 22 cm
- Material de aluminio
- Dispone de barreras laterales

En el mercado también está la “Rampa de acceso universal modular” de 180,29€, que está hecha de polímeros y tiene una configuración distinta (Figura 2). Sus características son:

- Dimensiones: 100l. x 67an. x 15al. centímetros
- Superficie antideslizante
- Carga máxima de 250 kg
- Peso de 9 kg
- Material de polietileno (PEMD)
- Permite unir módulos



Figuras 1 y 2: Rampa de aluminio LIEKUMM a la izquierda y rampa de acceso universal modular de polímero a la derecha.

Ambas cumplen con las características principales y cuentan con algunas cualidades adicionales. No obstante, tienen algunos inconvenientes como el alto coste y peso, lo que puede hacerlas poco accesibles y prácticas para algunos clientes o usuarios.

3. Diseño

Para el diseño de las rampas se han utilizado dos programas. Para el caso de la rampa de aluminio, al estar ensamblada con varias piezas y tener un diseño complejo se ha utilizado el software SolidWorks. Este software permite diseñar y ensamblar las piezas cómodamente y proporciona información que se considera suficientemente precisa para el aluminio, con propiedades elásticas poco complejas. La rampa de materiales poliméricos se ha calculado mediante el software Abaqus. Abaqus permite un análisis estático en profundidad y será especialmente útil para materiales complejos como el composite.

3.1. Diseño actual

La rampa de aluminio está conformada de tal forma que se divide en dos mitades unidas en la dirección transversal por bisagras para que se pueda plegar (Figura 3). En el análisis solo se va a analizar una mitad.

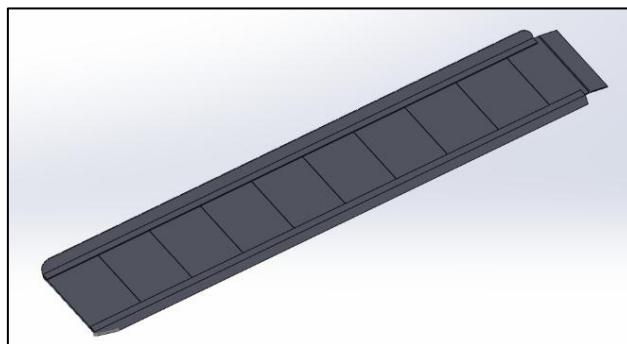


Figura 3: Rampa de aluminio en SolidWorks.

Esta a su vez la componen 9 travesaños idénticos, un travesaño inicial, un larguero exterior y un larguero interior (Figura 4). Los travesaños están unidos a los largueros a través de unas cavidades en los largueros y los travesaños están unidos entre sí.

Para facilitar la accesibilidad y garantizar la seguridad, las piezas tienen implementadas algunas características, como el saliente en el travesaño inicial para facilitar la entrada, la salida y su fijación, o la barrera en el larguero exterior para evitar caídas.

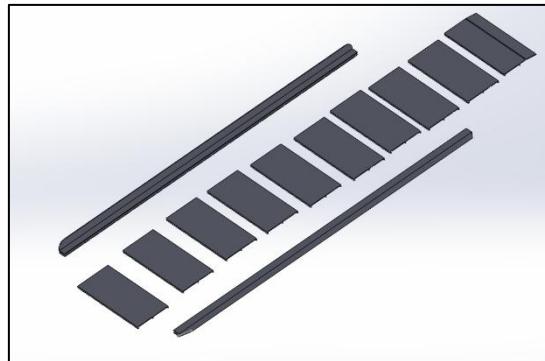


Figura 4: Rampa de aluminio en SolidWorks separada por piezas.

Las medidas de la rampa son de 1470 mm de largo y 340x2 mm de ancho, cada travesaño mide 151 mm de ancho y 330 mm de largo, las barreras miden 36mm de alto y el saliente del travesaño inicial mide 49,25 mm (Anexo II).

En el diseño de las superficies de las cargas se ha tenido en cuenta las huellas de las ruedas de una silla de ruedas y la pisada de una persona.

Para medir las huellas de las ruedas se ha utilizado una silla de ruedas real a la que se le ha aplicado una carga de 80 kg y posteriormente se ha medido la superficie en contacto con el suelo. Esta medición se ha realizado acercando dos reglas de forma paralela por debajo de la rueda hasta que toquen la cubierta. De esta forma se han medido dimensiones de 45 x 62 mm y de 35 x 53 mm para las ruedas grandes y pequeñas, respectivamente.

Para la huella de una persona, se ha recurrido a las dimensiones de un zapato de la talla 42, determinando el ancho medio y el largo, y posteriormente se ha aproximado a una elipse de eje mayor 300 mm y eje menor 100 mm.

Posteriormente, se han implementado las superficies a la rampa de aluminio (Figura5), utilizando las medidas experimentales para distanciarlas entre sí y se han realizado distintos análisis estáticos considerando varias posiciones.

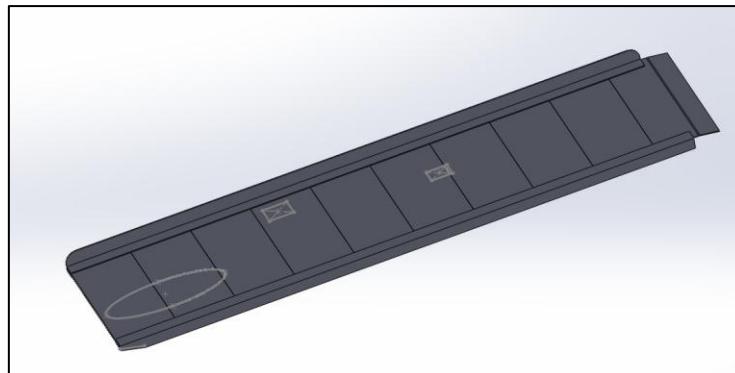


Figura 5: Media rampa de aluminio con las superficies implementadas.

3.2. Diseño propuesto

La rampa de composite cuenta con un diseño más simple (Figura 6). Está formada por la propia superficie principal de material compuesto, y adicionalmente se colocarán barreras de protección para evitar accidentes y un tramo inicial para facilitar la introducción de la silla.

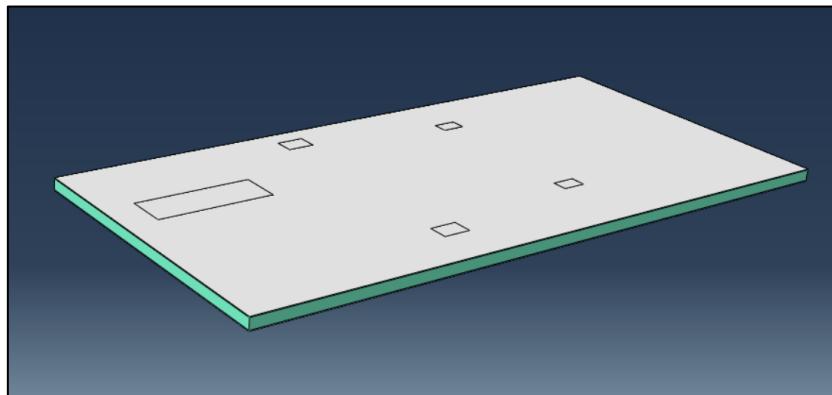


Figura 6: Rampa de composite en Abaqus.

Las dimensiones son similares a las de la rampa de aluminio, con 1470 mm de largo, 730 mm de ancho y un espesor que se estudiará en los siguientes apartados. Este estudio servirá para determinar el grosor necesario de cada parte del dispositivo para su óptimo rendimiento y prestaciones. Se buscará un coeficiente de seguridad similar al de la rampa de aluminio.

En el diseño de las superficies se han empleado las mismas dimensiones que las de la otra rampa, con la diferencia de que para la huella de la persona se ha utilizado un rectángulo, ya que Abaqus no permite definir las cotas de una elipse con precisión.

4. Análisis de elementos finitos

4.1. Rampa de aluminio

4.1.1. Materiales

En la composición de este caso se ha escogido el material aluminio 6061-T6 que es una aleación principalmente compuesta en un 95.8 - 98.6% de aluminio, un 0.8 - 1.2% de magnesio y un 0.4 - 0.8% de silicio. El tratamiento T6 implica un proceso térmico en el que el material se soluciona a alta temperatura y luego se envejece artificialmente a alrededor de 160°C durante varias horas, lo que permite que se formen precipitados finos que endurecen la aleación.

Algunas propiedades a destacar de este material son:

- **Alta relación resistencia-peso**, con una resistencia a la tracción de aproximadamente 240 MPa, 290 MPa a compresión y 190 MPa al corte, además

de una densidad baja cercana a 2.7 g/cm^3 . Esto permite que las rampas, además de ser resistentes, puedan ser manipuladas con facilidad.

- Permite **fácil mecanización y soldadura**, lo cual es importante para una producción eficiente y para aplicar tratamientos superficiales.
- Posee gran **resistencia a la corrosión** gracias a su contenido en magnesio y silicio.

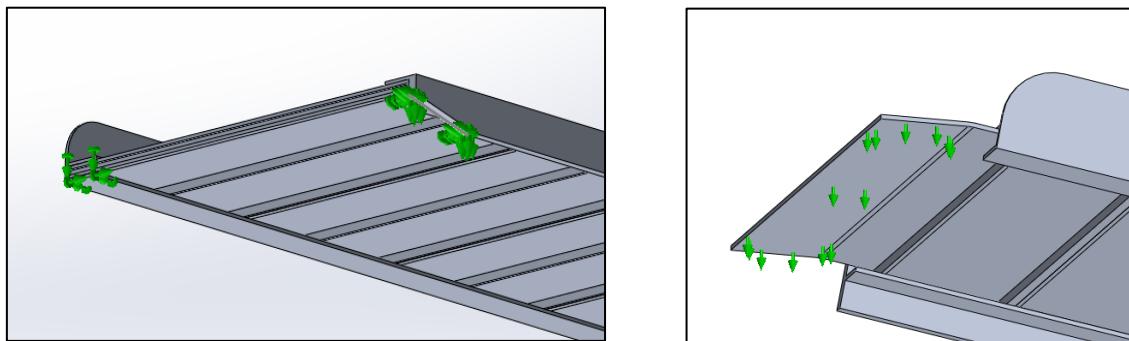
Las propiedades mecánicas implementadas por defecto en SolidWorks se muestran en la siguiente tabla:

Propiedades del Aluminio 6061-T6		
Módulo elástico	Gpa	69
Coeficiente de Poisson	-	0,33
Límite de tracción	MPa	310
Límite elástico	MPa	275
Coeficiente de expansión térmica	/K	2,40E-05
Densidad	kg/m3	2700

Tabla 1: Propiedades del Aluminio 6061-T6.

4.1.2. Condiciones de contorno

Para las condiciones de contorno, se ha aplicado la restricción de geometría fija en las superficies que están en contacto con el suelo al comienzo de la subida (Figura 7). Estas impiden los desplazamientos en todas las direcciones. También se han aplicado restricciones de control deslizante en la superficie que facilita la salida al final de la rampa (Figura 8). Estas restricciones impiden los desplazamientos en todas las direcciones excepto la longitudinal a la rampa.



Figuras 7 y 8: Geometría fija a la izquierda y restricción deslizante a la derecha.

De esta forma, se logra una reproducción fiel de las condiciones de apoyo en una situación real, replicando con precisión el comportamiento estructural esperado. Específicamente, establece lo que en ingeniería se denomina un apoyo simple (Figura 9), el cual permite la rotación libre de la estructura en el punto de apoyo, pero impide el desplazamiento vertical.

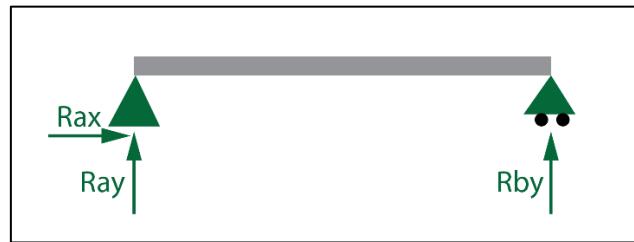


Figura 9: Apoyo simple.

4.1.3. Cargas externas

Para estudiar el comportamiento de la rampa a cargas, se han simulado tres casos con el objetivo de obtener distintos resultados desfavorables. En los tres casos se han utilizado los mismos valores para cada superficie de presión.

En la huella elíptica se ha distribuido una fuerza de 392,4 N simulando la mitad del peso de una persona de 80kg. Para la presión en las huellas de las ruedas se ha medido experimentalmente la distribución del peso en una silla de ruedas, obteniendo un 45% en las ruedas grandes y un 55% en las pequeñas. Después, se ha pesado la silla, obteniendo una masa total para la silla más el usuario de 96 kg. Esto a resultado en 211,9 N en la huella de la rueda grande (la cercana a la elipse) y 258,9 N en la pequeña (alejada de la elipse) (Figura 10).

En el primer análisis se ha ubicado la superficie elíptica al principio de la rampa y las ruedas algo adelantadas para simular una situación inicial en la que la persona y la silla están completamente apoyados en esta (Figura 10).

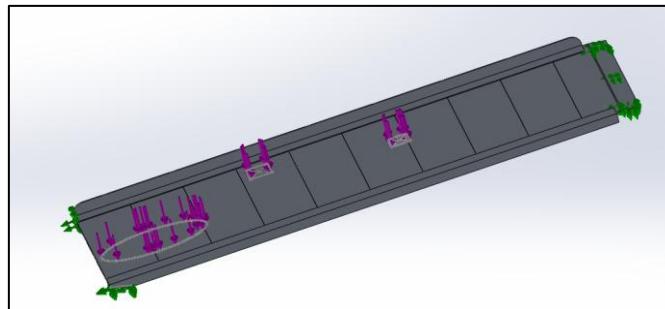


Figura 10: Distribución de cargas en el primer análisis.

En el segundo análisis se han situado las huellas aproximadamente en una zona intermedia, resultando en que la mayor parte del peso se concentra en la mitad de la rampa en forma de flexión (Figura 11).

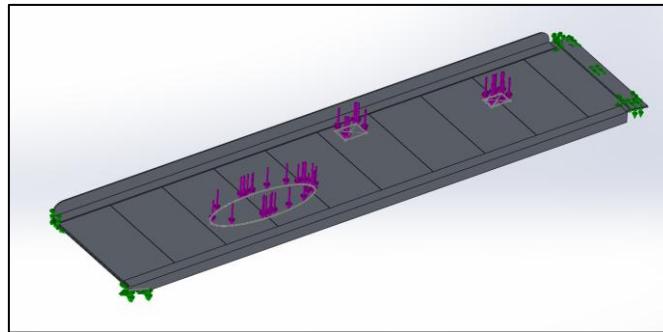


Figura 11: Distribución de cargas en el segundo análisis.

Para el tercer análisis se ha considerado la situación en la que las huellas están en la zona más adelantada pero todavía permanecen encima de la rampa (Figura 12). De esta forma, la superficie elíptica que aporta la mayor cantidad de carga está en la zona más intermedia y por tanto más flectora.

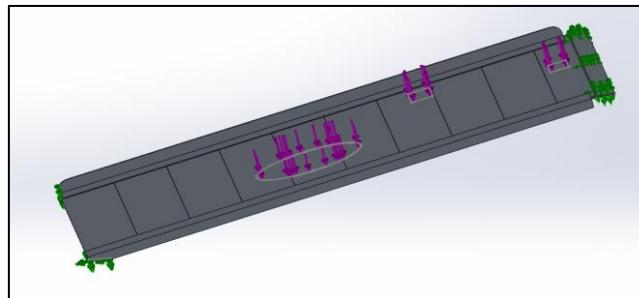


Figura 12: Distribución de cargas en el tercer análisis.

4.1.4. Resultados

En este punto se exponen los resultados obtenidos del análisis estructural realizado sobre la rampa (Anexo III). Se van a examinar las tensiones generadas en los distintos componentes, las deformaciones producidas en la estructura y los desplazamientos experimentados en las zonas de interés. También se van a considerar algunos puntos que pueden actuar como concentradores de tensión y pueden confundir el análisis.

Los valores máximos de cada caso se presentan en las siguientes tablas.

Tensiones y Deformaciones	S, Mises (MPa)		E, Unitarias	
	Max.	Min.	Max.	Min.
Primer análisis	163,00	0,01	1,30E-03	1,25E-07
Segundo análisis	277,00	0,03	1,74E-03	1,04E-07
Tercer análisis	215,00	0,01	1,85E-03	1,80E-07

Tabla 2: Tensiones de Von Mises y deformaciones unitarias.

Tensiones (MPa)						
Tensiones Normales	S11		S22		S33	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Primer análisis	105,00	-181,00	61,00	-91,20	113,00	-131,00
Segundo análisis	293,00	-336,00	81,90	-103,00	130,00	-117,00
Tercer análisis	225,00	-261,00	64,40	-115,00	120,00	-101,00
Tensiones Tangenciales	S12		S13		S23	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Primer análisis	34,50	-40,30	26,90	-40,30	30,90	-35,40
Segundo análisis	54,20	-59,90	32,20	-29,30	46,80	-18,30
Tercer análisis	40,90	-63,60	29,20	-29,00	39,00	-29,30
Desplazamientos (mm)						
Desplazamientos	U1		U2		U3	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Primer análisis	0,347	-0,582	4,94	-0,0137	0,723	-0,0273
Segundo análisis	0,486	-1,06	10,7	-0,0125	1,28	-0,103
Tercer análisis	0,408	-0,853	10,6	-0,0125	1,03	-0,127

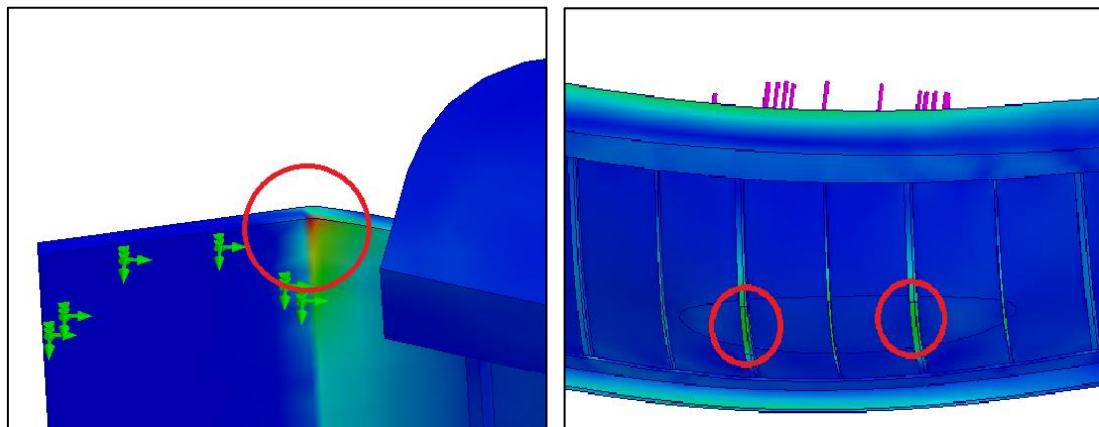
Tabla 3: Tensiones normales, cortantes y desplazamientos.

Mediante estos valores y las propiedades del material se pueden calcular los coeficientes de seguridad, que se muestran en la siguiente tabla.

C.S	Coeficientes de Seguridad Aluminio
Primer análisis	1,856
Segundo análisis	1,000
Tercer análisis	1,239

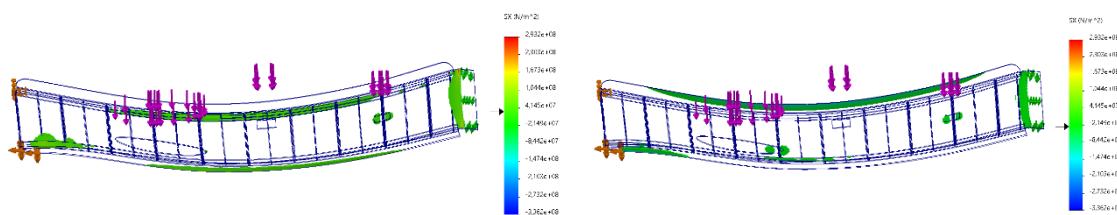
Tabla 4: Coeficientes de seguridad en la rampa de aluminio.

Esta última tabla muestra que las tensiones son muy ajustadas respecto al límite elástico del material. Incluso en el caso de las tensiones normales en X del segundo análisis se sobrepasa ese valor. Esto se debe a que debido a la geometría de la rampa se forman varios concentradores de tensión (Figuras 13 y 14).



Figuras 13 y 14: Concentradores de tensión en la rampa de aluminio.

Para contrastar esta hipótesis, se ha realizado un análisis que muestre áreas en las que hay una tensión mayor (Figuras 15 y 16). En la figura 15 (izquierda) se muestran las zonas afectadas por una tensión mayor a 27,5 MPa. Por otro lado, en la figura 16 (derecha) se muestran las zonas con una tensión menor a -27,5 MPa. El límite elástico está definido en 275 MPa, por lo que la mayor parte de la rampa tiene un coeficiente de seguridad mayor a 10.



Figuras 15 y 16: Áreas con tensiones mayores a 27,5 MPa a la izquierda y áreas con tensiones menores a 27,5 MPa a la derecha.

Los desplazamientos verticales, que serán datos de gran importancia en la comparación, son máximos en el segundo análisis en el que alcanza 10,7 mm (Figura 17). También se han calculado las propiedades de masa que han resultado en 6,15 kg para la mitad de la rampa y 12,3 kg para la rampa completa.

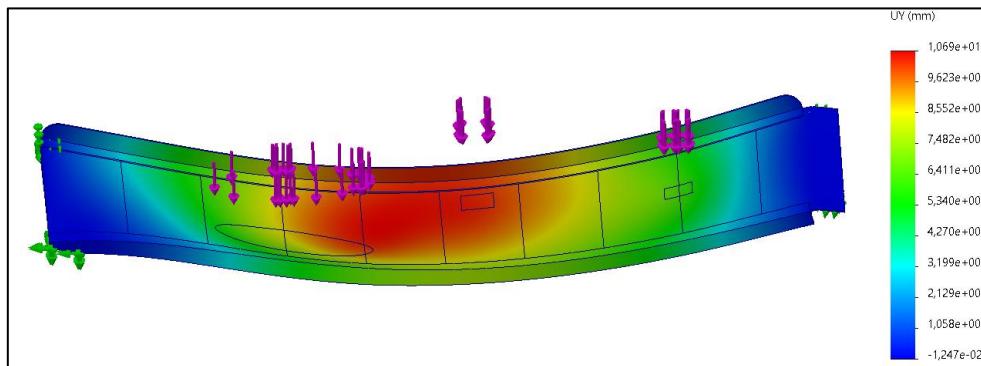


Figura 17: Desplazamientos de la rampa en Y.

4.2. Rampa de Composite

En este caso, se ha llevado a cabo un análisis numérico utilizando el software de elementos finitos Abaqus. Este análisis se centra en evaluar la respuesta mecánica y el peso del conjunto cuando variando el espesor de las capas de fibra de vidrio.

Se han definido cuatro configuraciones diferentes, cada una con un espesor distinto, con el fin de comparar los resultados y determinar la influencia de este parámetro sobre los desplazamientos, las tensiones, las deformaciones y el criterio TSAI-WU (Anexo IV) para materiales compuestos. De esta forma se tratará de optimizar el diseño estructural de la rampa, buscando un equilibrio entre resistencia mecánica y peso.

4.2.1. Materiales

Como ya se ha mencionado anteriormente, la rampa la forma un composite con una configuración tipo sándwich. El núcleo es de Divinycell H60, una espuma rígida de PVC (policloruro de vinilo) de célula cerrada, ampliamente utilizado en aplicaciones de ingeniería. Por otro lado, para las láminas se usa fibra de vidrio equilibrada cuyas dimensiones se determinarán mediante los análisis. Finalmente, para unir los elementos se emplea una resina epoxi para infusión e inyección. Esta última unirá los componentes mediante una reacción de polimerización en cadena al juntarla con un endurecedor. Las fichas técnicas se encuentran en los anexos (Anexo VII).

La espuma de PVC Divinycell H60 es un núcleo estructural utilizado en aplicaciones de materiales compuestos debido a su excelente combinación de propiedades mecánicas y bajo peso. Además, posee una buena absorción de impactos, alta resistencia al agua y a la mayoría de los productos químicos. Gracias a su estabilidad dimensional, facilidad de mecanizado y compatibilidad con diversos sistemas de resina (como epoxi, poliéster y viniléster), el Divinycell H60 se emplea comúnmente en la fabricación de paneles sándwich para la industria naval, aeroespacial, automotriz y eólica, así como en estructuras ligeras donde se requiere rigidez sin aumentar significativamente el peso total. En la siguiente tabla se muestran sus propiedades.

Propiedades del Núcleo de PVC		
Densidad	kg/m ³	60
Módulo elástico (tracción)	MPa	70
Resistencia a tracción	MPa	1,8
Módulo elástico (compresión)	MPa	70
Resistencia a compresión	MPa	0,9
Módulo de cortadura	MPa	20
Resistencia a cortadura	MPa	0,76
Coeficiente de Poisson	-	0,4

Tabla 5: Propiedades de la espuma de PVC Divinycell H60.

El tejido de fibra de vidrio equilibrado es un tipo de tejido en el que los filamentos están dispuestos de manera simétrica en dos direcciones principales, usualmente en los ejes 0° (urdimbre) y 90° (trama). Esta configuración proporciona una distribución uniforme de las propiedades mecánicas, ofreciendo una excelente resistencia tanto en el sentido longitudinal como transversal. Su compatibilidad con diferentes tipos de resinas y su facilidad de manipulación lo hacen un refuerzo versátil y eficiente en la fabricación de materiales compuestos de alto rendimiento. A continuación, se presenta la tabla con las propiedades de los análisis.

Propiedades de la Fibra de Vidrio		
Densidad	kg/m ³	2550
Módulo elástico (dir. 1)	GPa	21
Resistencia a tracción (dir. 1)	MPa	280
Módulo elástico (dir. 2)	GPa	21
Resistencia a compresión (dir. 2)	MPa	280
Módulo de cortadura	GPa	3,3
Resistencia a cortadura	MPa	52
Coeficiente de Poisson	-	0,25

Tabla 6: Propiedades de la fibra de vidrio.

4.2.2. Condiciones de contorno

En este caso, las condiciones de contorno se han aplicado en las aristas inferiores que definen el ancho de la rampa (Figura 18). En la parte de comienzo de subida, se han restringido los desplazamientos en los tres ejes y se han permitido rotaciones en los tres ejes. En el otro extremo, al final de la rampa, se han restringido los desplazamientos en X y en Z y se han permitido en Y (el eje solidario a la dirección longitudinal).

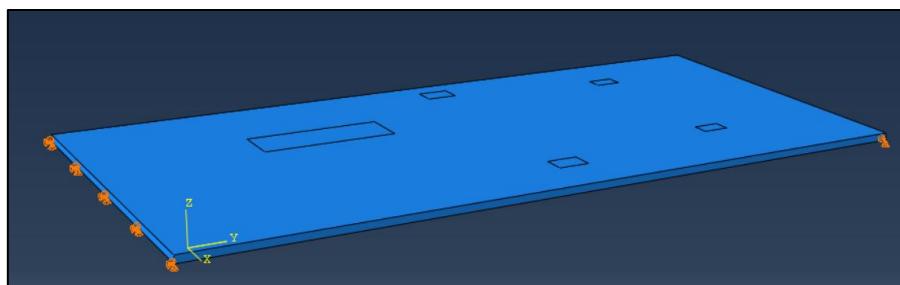


Figura 18: Restricciones en rampa de materiales compuestos.

4.2.3. Cargas externas

A través de los análisis de la rampa de aluminio se ha seleccionado el caso más desfavorable para su comparación con uno similar en la rampa de composite. Las cargas se han colocado de la misma forma que en la de aluminio (Figura 19). La diferencia es que en este análisis se ha simulado la rampa completa. Además, se ha considerado el caso desfavorable en el que el peso de una persona está concentrado en un solo pie, lo cual se acerca más al análisis de la media rampa de aluminio (en la media rampa solo se considera medio apoyo).

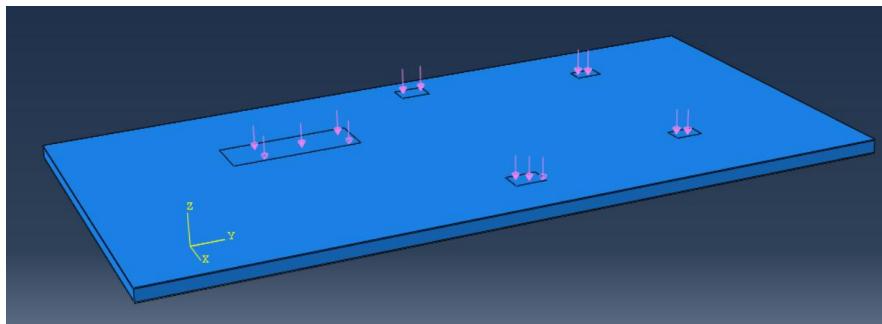


Figura 19: Cargas externas en la rampa de material compuesto.

4.2.4. Resultados

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos tras la simulación por elementos finitos de la rampa fabricada con material compuesto (Anexo V). Se han examinado las distribuciones de tensiones tanto en el núcleo como en las láminas, los desplazamientos máximos registrados, los coeficientes de seguridad y criterios de fallo. Estos parámetros aportan información objetiva suficiente para hacer la comparación con la rampa anterior.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos del análisis de tensiones (Tabla 7). Se muestran los valores máximos y mínimos de tensiones normales (S_{11} y S_{22}), tensiones tangenciales (S_{12}) y tensiones equivalentes de Von Mises ($S.$ Mises), tanto en las láminas como en el núcleo (core) del material.

Tensiones en las láminas	Tensiones (Mpa)							
	Láminas							
	S, Mises		S_{11}		S_{22}		S_{12}	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
25mm core 2mm lám.	16,99	0,141	2,693	-2,217	15,76	-16,97	1,187	-1,252
25mm core 1,5mm lám.	23,94	0,23	3,218	-3,233	22,33	-24,02	1,698	-1,75
25mm core 1mm lám.	38,11	0,341	6,2	-6,042	35,59	-38,32	2,681	-2,702
25mm core 0,5mm lám.	81,69	0,605	14,17	-14,28	76,08	-81,71	5,684	-5,754
Tensiones en el core	Tensiones (Mpa)							
	Core							
	S, Mises		S_{11}		S_{22}		S_{12}	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
25mm core 2mm lám.	0,057	0	0,015	-0,021	0,043	-0,062	0,009	-0,008
25mm core 1,5mm lám.	0,08	0	0,022	-0,03	0,061	-0,089	0,013	-0,011
25mm core 1mm lám.	0,128	0,002	0,07	-0,051	0,079	-0,142	0,02	-0,017
25mm core 0,5mm lám.	0,272	0,001	0,083	-0,114	0,21	-0,302	0,044	-0,037

Tabla 7: Tensiones normales y cortantes en la rampa de material compuesto.

A partir de los datos obtenidos, se han calculado los coeficientes de seguridad indicados en la siguiente tabla (Tabla 8).

C.S. Láminas	Coeficientes de las láminas		
	Compresión	Tracción	Cizalla
25mm core 2mm lám.	11,786	12,690	31,949
25mm core 1,5mm lám.	8,326	8,957	22,857
25mm core 1mm lám.	5,219	5,620	14,804
25mm core 0,5mm lám.	2,448	2,629	6,952
C.S. Core	Coeficientes de el core		
	Compresión	Tracción	Cizalla
25mm core 2mm lám.	14,516	41,860	84,444
25mm core 1,5mm lám.	10,112	29,508	58,462
25mm core 1mm lám.	6,338	22,785	38,000
25mm core 0,5mm lám.	2,980	8,571	17,273

Tabla 8: Coeficientes de seguridad en las láminas y en el core.

Como se puede observar, se ha verificado que los coeficientes de seguridad superan con holgura el valor mínimo requerido respecto a los valores de resistencia especificados anteriormente.

Por otro lado, los desplazamientos en la siguiente tabla muestran una dependencia bastante lineal respecto al grosor de las láminas, siendo bastante similares a la de aluminio en la de 1 mm y la de 0,5 mm (Tabla 9).

Desplazamientos en las láminas	Desplazamientos (mm)					
	Laminas					
	U1	U2	U3	Max.	Min.	Max.
25mm core 2mm lám.	0,12	-0,108	0,719	0,044	0,008	-25,27
25mm core 1,5mm lám.	0,169	-0,142	1,024	-0,064	0,008	-35,04
25mm core 1mm lám.	0,268	-0,211	1,64	-0,106	0,009	-54,6
25mm core 0,5mm lám.	0,561	-0,407	3,475	-0,232	0,006	-112,7
Desplazamientos en el core	Desplazamientos (mm)					
	Core					
	U1	U2	U3	Max.	Min.	Max.
25mm core 2mm lám.	0,12	-0,108	0,719	-0,044	0,008	-25,27
25mm core 1,5mm lám.	0,169	-0,142	1,024	-0,064	0,008	-35,04
25mm core 1mm lám.	0,268	-0,211	1,64	-0,106	0,009	-54,61
25mm core 0,5mm lám.	0,561	-0,407	3,475	-0,232	0,006	-112,7

Tabla 9: Desplazamientos en las láminas y en el core.

También se ha analizado el criterio de fallo TSAI-WU que predice el fallo de un material anisotrópico. Cuando se simplifica a un estado de esfuerzo plano es especialmente útil en análisis laminados compuestos. Este se ha utilizado para las láminas y supone la rotura cuando alcanza la unidad.

Criterio TSAI-Wu en las láminas	TSAI-WU	
	Max.	Min.
25mm core 2mm lám.	0,0607	0,000587
25mm core 1,5mm lám.	0,0864	0,00107
25mm core 1mm lám.	0,138	0,00182
25mm core 0,5mm lám.	0,295	0,00421

Tabla 10: TSAI-WU en las láminas.

Según los análisis los valores son bajos y están bastante lejos de alcanzar el fallo incluso en el caso de las láminas más finas.

Por último, se ha realizado el cálculo del peso total para cada configuración, el cual está fuertemente influenciado por el espesor de las láminas. El núcleo presenta un peso constante de 1,61 kg, al que debe sumarse el peso de la resina utilizada en el laminado, estimado en 2 kg/m². Para este caso específico, la contribución de la resina al peso total es de 2,14 kg.

PESO (Kg)	
25mm core 2mm lám.	11,26755
25mm core 1,5mm lám.	9,389625
25mm core 1mm lám.	7,5117
25mm core 0,5mm lám.	5,633775

Tabla 11: Pesos de las distintas configuraciones.

5. Fabricación

La infusión de resina epoxi es una técnica avanzada de fabricación de materiales compuestos que permite obtener piezas ligeras, resistentes y de alta calidad, muy utilizadas en sectores como la aeronáutica, la náutica, la automoción y el deporte. Este proceso consiste en colocar refuerzos secos, como fibra de vidrio o carbono, sobre un molde y luego impregnar estas fibras con resina epoxi líquida utilizando vacío, lo que asegura una distribución uniforme y elimina el aire atrapado. Gracias a su capacidad para producir componentes con excelentes propiedades mecánicas y una buena relación peso/resistencia, la infusión al vacío se ha consolidado como una de las tecnologías más eficientes y limpias en la fabricación de compuestos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, se ha empleado un núcleo de espuma de PVC de 60 kg/m³ y 15 mm de grosor (Figura 21), dos capas de tejido equilibrado de fibra de vidrio de 0,6 mm de espesor en cada cara (Figura 20) y resina epoxi para fijar la unión de los materiales (Figuras 22 y 23).



Figuras 20 y 21: Núcleo de PVC a la izquierda y fibra de vidrio a la derecha.



Figuras 22 y 23: Resina epoxi a la izquierda y endurecedor a la derecha.

Para el proceso de fabricación se preparó un molde que sirviera de soporte y base para la colocación de los materiales compuestos (Figura 24). El molde fue limpiado cuidadosamente para eliminar polvo, grasa u otras impurezas que pudieran interferir con el proceso. Una vez colocadas las capas de fibra y el núcleo en el molde, se añadieron los materiales auxiliares necesarios para llevar a cabo el proceso de infusión por vacío. Sobre las láminas de fibra de vidrio se colocó una malla de distribución, cuya función es facilitar el flujo uniforme de la resina epoxi a lo largo de toda la superficie del laminado. Posteriormente, todo el conjunto se cubrió con una lámina de film plástico sellada herméticamente al molde para vacío.



Figura 24: Molde sin infusión.

Previamente al inicio de la infusión, se preparó la mezcla de resina epoxi con su correspondiente endurecedor, siguiendo con precisión las proporciones indicadas por el fabricante para asegurar un curado adecuado (Figura 25).



Figura 25: Mezcla de resina y endurecedor.

Para iniciar el proceso de infusión se instalaron, la línea de entrada de resina y las salidas conectadas a dos bombas de vacío, lo que permitió generar la presión negativa necesaria para que la resina fluyera a través del refuerzo y lo impregnara de manera homogénea (Figuras 26 y 27).



Figuras 26 y 27: Bombas de vacío.

Una vez establecido el vacío en el interior del sistema, se procedió a la infusión de la resina epoxi. La resina, previamente mezclada, fue introducida por la línea de entrada y comenzó a desplazarse a través de la malla de distribución, impregnando progresivamente las láminas de fibra de vidrio y el núcleo de espuma de PVC (Figura 28). Gracias a la diferencia de presión generada por el vacío, la resina fue absorbida de forma uniforme por todo el material, al mismo tiempo que el aire contenido en el interior fue eliminado, evitando la formación de burbujas o zonas secas. Este proceso aseguró una correcta impregnación del refuerzo y una consolidación homogénea del laminado.



Figura 28: Resina infusionando en el molde.

Finalizada la infusión, se procedió al curado del material compuesto con el objetivo de que la resina epoxi alcanzara su endurecimiento y propiedades mecánicas finales. Para favorecer este proceso se colocó una manta térmica sobre la pieza, la cual permitió mantener una temperatura constante de aproximadamente 40 °C, adecuada para acelerar y estabilizar la reacción de curado (Figura 29).

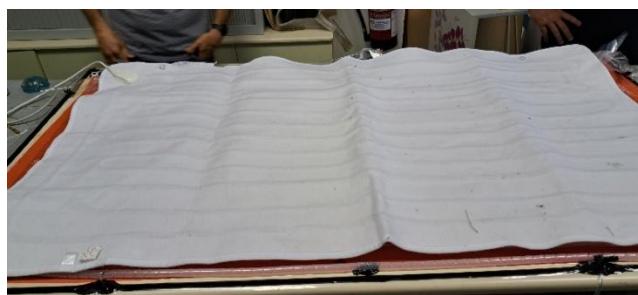


Figura 29: Manta térmica encima del molde.

Encima de la manta térmica, se añadieron varias láminas de espuma de polietileno con el fin de proporcionar aislamiento térmico y conservar el calor generado de manera uniforme (Figura 30). Esta configuración fue mantenida durante un período de dos días, garantizando un curado lento y controlado que mejoró la calidad estructural del laminado y redujo el riesgo de tensiones internas o curado incompleto.



Figura 30: Láminas de espuma de polietileno encima de la manta térmica.

Con el fin de verificar que la mezcla de resina epoxi y endurecedor se encontraba en las proporciones correctas y que el proceso de curado se desarrollaba adecuadamente, se vertió una pequeña cantidad de la mezcla en un molde aparte (Figura 31). Esta muestra de control permitió observar el comportamiento de la resina de forma independiente, sin interferencias con el sistema de vacío ni de los materiales compuestos.



Figura 31: Muestras de control de resina y endurecedor.

Transcurridos dos días desde el inicio del curado se procedió a retirar la manta térmica, el aislamiento y la película de vacío para evaluar el resultado final. La resina se había endurecido completamente, consolidando la estructura del material compuesto de forma uniforme y sin presencia visible de defectos como burbujas o zonas secas. La placa resultante presentaba una buena rigidez, adherencia entre capas y un acabado superficial adecuado, lo que indica que el proceso de infusión y curado se desarrolló de manera satisfactoria (Figura 32).



Figura 32: Rampa de material compuesto.

Además, se comprobó que el peso final de la rampa fue de 6,55 kg, lo cual se considera un valor adecuado y acorde con lo previsto.

6. Ensayo

Con el fin de validar los resultados obtenidos en los análisis previos, se han ensayado ambos modelos de rampa en condiciones que reproducen situaciones de carga reales. Para ello, cada rampa se colocó apoyada sobre dos vigas, simulando su instalación práctica, y se aplicó una carga representativa mediante una silla de ruedas ocupada por una persona y acompañada por otra persona que asistía en el empuje. Esta

configuración permite analizar de forma realista los desplazamientos verticales producidos en la estructura bajo condiciones de uso habituales.

Para la toma de datos experimentales, se emplearon relojes comparadores ubicados en puntos estratégicos de la rampa, seleccionados por su relevancia en la medición de los desplazamientos más significativos (Figura 33). No obstante, esta metodología solo pudo aplicarse en el caso del modelo fabricado en aluminio, ya que la rampa de material compuesto presentaba deformaciones excesivas que excedían el rango de medición de los instrumentos. En su lugar, para este segundo modelo se usó un calibre pie de rey, que permitió registrar los desplazamientos de forma más adecuada dadas las condiciones del ensayo.



Figura 33: Relojes de comparación en rampa de material compuesto.

Posteriormente, se dispusieron dos personas para representar las cargas (Figuras 34 y 35). Una de ellas se situó sentada en la silla de ruedas, mientras que la otra se colocó justo detrás, simulando la acción de empuje durante el uso habitual de la rampa.



Figuras 34 y 35: Ensayos en rampa de material compuesto a la izquierda y de aluminio a la derecha.

Los resultados de los desplazamientos fueron los siguientes:

Desplazamientos	Silla	Silla + persona	Silla + 2 personas
Rampa de material compuesto	6 mm	37 mm	50,64 mm
Rampa de aluminio	1,7 mm	5,96 mm	10,96 mm

Tabla 12: Desplazamientos en ambos modelos.

Los desplazamientos fueron mayores a los esperados para una capa de 1,2 mm de fibra de vidrio por cara. Esto se debió a que durante el proceso de curado de la rampa se compactó el material de fibra de vidrio y lo que se pensaba que eran 1,2 mm de material resultaron ser finalmente 0,7 mm.

Aunque el resultado difiere de las dimensiones teóricas previstas, el comportamiento estructural observado durante el ensayo fue coherente con los análisis numéricos realizados. Esto indica que, a pesar de las desviaciones en la fabricación, el modelo empleado refleja de forma fiable la respuesta mecánica del conjunto.

7. Mejora de la rampa de materiales compuestos

Para mejorar los resultados de la rampa, se propone una modificación en su diseño con el fin de optimizar su respuesta mecánica y reducir las deformaciones, acercando su rendimiento al de la rampa metálica.

Para ello, se ha planteado la incorporación de dos barras longitudinales de 25 mm de grosor y 120 mm de ancho a modo de nervios estructurales de refuerzo en la parte inferior de la rampa. Estas barras, compuestas del material del núcleo, actuarán como refuerzos que incrementarán la resistencia a la flexión, mejorando así la distribución de las cargas. Además, se recubrirán con una capa de fibra de carbono de 0,6 mm de espesor, lo que aportará una mayor rigidez específica sin penalizar significativamente el peso del conjunto (Figura 36).

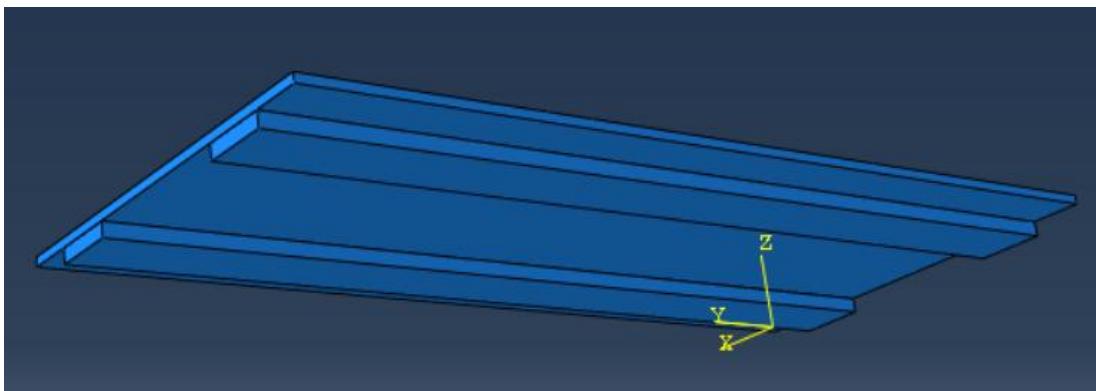


Figura 36: Rampa reforzada con nervios longitudinales.

7.1. Fibra de Carbono

La fibra de carbono es un material compuesto por filamentos extremadamente finos de carbono, caracterizado por su elevada resistencia mecánica y su baja densidad. Entre sus propiedades más destacadas se encuentran una excelente relación resistencia/peso, alta rigidez, buena resistencia a la fatiga y a la corrosión, así como una estabilidad dimensional frente a cambios térmicos. Gracias a estas cualidades, la fibra de carbono se utiliza ampliamente en sectores que requieren materiales ligeros y resistentes, como la aeronáutica, la automoción, el deporte de alto rendimiento, la construcción y la ortopedia. En la siguiente gráfica se presentan sus propiedades.

Propiedades de la Fibra de Carbono		
Densidad	kg/m3	1750
Módulo elástico (tracción)	GPa	90
Resistencia a tracción (longitudinal)	MPa	900
Resistencia a tracción (transversal)	MPa	125
Módulo elástico (compresión)	GPa	8
Resistencia a compresión (longitudinal)	MPa	700
Resistencia a compresión (transversal)	MPa	65
Módulo de cortadura	GPa	4,5
Resistencia a cortadura	MPa	45

Tabla 13: Propiedades de la Fibra de Carbono.

7.2. Resultados

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de tensiones, donde puede observarse que las láminas de fibra de carbono han absorbido la mayor parte de las tensiones generadas durante la carga. Esto confirma la eficacia del refuerzo, ya que la fibra de carbono, gracias a su elevada resistencia mecánica, actúa como el principal elemento portante dentro del conjunto, reduciendo significativamente las solicitudes. Los análisis se encuentran en los anexos (Anexo VI).

Tensiones	Refuerzo					
	Tensiones (Mpa)					
	S11		S22		S12	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Láminas	4,36	-6,34	9,85	-19,20	3,07	-3,32
Core	0,12	-0,05	0,03	-0,10	0,03	-0,03
Barras	0,09	-0,10	0,07	0,03	0,05	0,08
Fibra de Carbono	13,10	-8,03	70,20	-22,00	15,20	-14,60

Tabla 14: Tensiones de cada parte.

En cuanto a los desplazamientos, mostrados en la siguiente tabla, se ven reducidos significativamente respecto al anterior modelo. Mediante la modificación incorporada se han reducido en un 85%.

Desplazamientos	Refuerzo					
	Desplazamientos (mm)					
	U1		U2		U3	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Láminas	0,02	-0,10	0,30	-0,50	0,00	-10,10
Core	0,02	-0,10	0,30	-0,50	0,00	-10,10
Barras	0,17	-0,12	0,23	-0,47	0,00	-9,61
Fibra de Carbono	0,17	-0,12	0,23	-0,47	0,00	-9,61

Tabla 15: Desplazamientos de cada parte.

Por otro lado, el peso ha aumentado 0,529 g por las barras, 1,3 kg por la infusión de resina y 879 g por los refuerzos de fibra de carbono. Esto supone un aumento de 2,708 kg del peso, dejando un resultando en un peso total de 9,255 kg.

Finalmente, para el TSAI-Wu se ha obtenido un valor de 0,22 para el tejido de fibra de carbono y de 0,08 para el tejido de fibra de vidrio. Por tanto, la estructura está muy lejos del fallo con un coeficiente de seguridad mayor 4.

7.3. Ensayo

Una vez completado el proceso de fabricación de la nueva rampa reforzada (Figura 37), se procedió a realizar el correspondiente ensayo experimental. Este ensayo permitió comparar los resultados obtenidos con los análisis teóricos y validar las mejoras introducidas en términos de rigidez, resistencia y distribución de tensiones.



Figura 37: Rampa reforzada.

La metodología empleada fue la misma que la utilizada en el modelo anterior. Para la medición de los desplazamientos se utilizarán relojes comparadores, colocados en los mismos puntos (Figuras 38 y 39).



Figuras 38 y 39: Ensayo en la rampa reforzada.

Los valores de desplazamiento del ensayo experimental de la rampa reforzada, recogidos en la tabla siguiente, muestran ser ligeramente inferiores a los obtenidos en los análisis numéricos. La diferencia puede deberse a que el peso de los sujetos utilizados en el ensayo era menor que las cargas simuladas en los modelos. Por tanto, se puede concluir que el comportamiento estructural es bastante fiel a las predicciones, lo que valida la simulación.

Desplazamientos	Silla	Silla + persona	Silla + 2 personas
Rampa reforzada	0,36 mm	5,3 mm	7,23 mm

Tabla 16: Desplazamientos en la rampa reforzada.

8. Comparación

Con el fin de evaluar las ventajas del uso de materiales compuestos frente a materiales tradicionales, se ha realizado una comparativa entre la rampa reforzada de composite y la rampa fabricada en aluminio. Esta comparación se ha centrado en analizar aspectos clave como el comportamiento bajo carga, el peso, la eficiencia mecánica de ambos diseños, además de, los costes asociados a los materiales utilizados. De este modo, se pretende evaluar no solo el rendimiento estructural, sino también la viabilidad económica del uso de composites en aplicaciones ortopédicas.

8.1. Comparación estructural

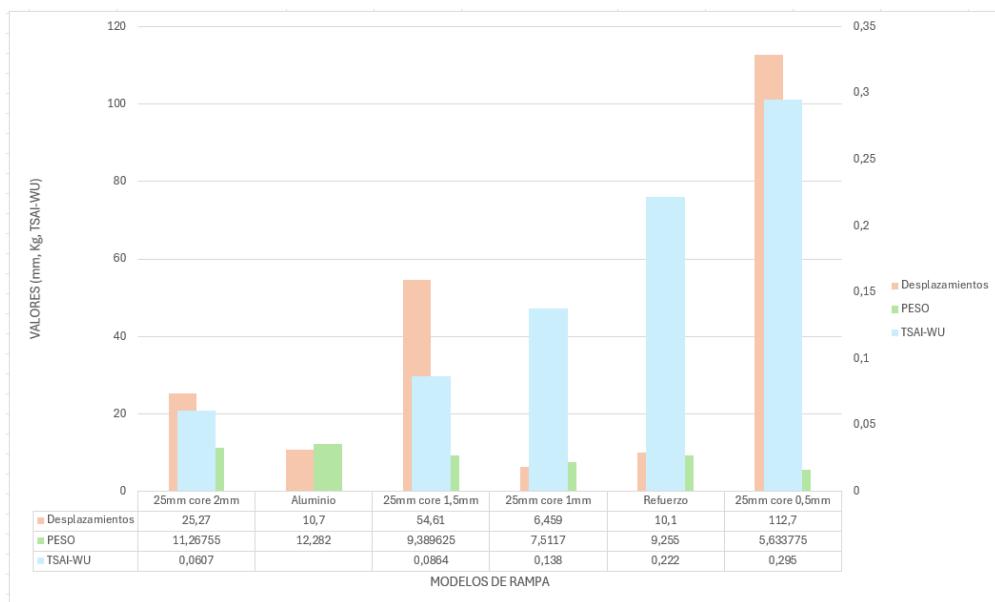
Ambas rampas presentan geometrías similares y han sido sometidas a condiciones de carga y contorno parecidas, permitiendo así una comparación objetiva y fiable. Mediante el análisis comparativo se determinará si la solución en composite ofrece mejoras

significativas en términos de reducción de peso y costes sin comprometer la resistencia estructural.

En primer lugar, las tensiones muestran ser bajas respecto a los valores de rotura para ambos casos. Si bien es cierto que la de aluminio tenía partes más ajustadas también se ha analizado con una geometría más complicada que inducía a concentradores de tensión, a diferencia de la de material compuesto que tiene una geometría más sencilla y que presentaba gran homogeneidad. Por tanto, se puede concluir que no es un factor decisivo, aunque la segunda no haya tenido coeficientes de seguridad tan ajustados.

En cuanto a los desplazamientos, se han representado los valores en una gráfica de barras en la que se puede comprobar que, aunque las configuraciones de composite no reforzadas tenían deformaciones excesivas, estas e incluso han sido algo más reducidas en el caso de la reforzada.

Por otro lado, la rampa reforzada presenta una reducción de peso de tres kilogramos en comparación con la de aluminio. Esta diferencia constituye un factor clave, ya que influye directamente en la movilidad y la facilidad de uso del dispositivo en diversas situaciones, mejorando su transporte, manipulación e integración en entornos cotidianos.



Gráfica 1: Desplazamientos, peso y TSAI-WU de los distintos modelos.

8.2. Comparación económica

Además del análisis estructural, resulta fundamental considerar el aspecto económico a la hora de seleccionar el material más adecuado para la fabricación de la rampa. En este apartado se comparan los costes asociados a la producción mediante un análisis aproximado.

Para el caso de la de aluminio, a partir de búsquedas por internet en varias webs que ofrecen rampas ortopédicas metálicas, se ha podido aproximar que la gama media de este producto con unas dimensiones similares está en torno a los 180 euros de precio de venta.

En cuanto a la de materiales compuestos, se ha buscado en la web de CastroComposites y mediante la selección de los materiales se puede estimar el coste de una rampa de composite.

Para la resina se ha elegido la *Resina epoxi Castropox 1233 para Infusión e Inyección* con un precio de 20,29 €/kg de resina más endurecedor. Para su fabricación se han necesitado unos 3,45 kg. Para la fibra de vidrio se usará *500 g/m² Tejido de Fibra de Vidrio Tafetán, ancho 125 cm* con un precio de 3,34 €/m². En el caso del núcleo de espuma se ha escogido *Divinycell H60* de 15 mm de grosor con un precio de 28,97 €/m² y otro de 25 mm con un precio de 48,29 €/m². Por último, el tejido de fibra de carbono escogido es *Tejido de Carbono Chomarat 3K SARGA 2x2 CWEAVE 245T 3K GP3 de 245 g/m², ancho 125 cm / SPOT* con un coste de 35,09 €/m². El total asciende a 154,91 € sin contar los moldes o procesos anteriormente descritos, en la tabla a continuación se muestran los costes para cada parte.

Costes de la rampa mejorada	Precio	Cantidad	Coste
Resina + endurecedor	20,29 €/kg	3,45 kg	70 €
Núcleo de 15 mm	28,97 €/m ²	1,073 m ²	31,08 €
Núcleo de 25 mm	48,29 €/m ²	0,353 m ²	17,05 €
Fibra de vidrio	3,34 €/m ²	4,292 m ²	14,33 €
Fibra de carbono	35,09 €/m ²	0,64 m ²	22,45 €

Tabla 17: Costes de los materiales.

Finalmente, la rampa mejorada ha costado 25,1 € menos que la rampa de aluminio. A pesar de que en este cálculo no se han incluido los gastos asociados al proceso de fabricación manual, el resultado demuestra el potencial del composite como una alternativa económicamente competitiva. Además, hay que tener en cuenta que esta rampa se ha fabricado de manera puntual y con materiales seleccionados para una única unidad, por lo que, en un contexto de producción industrial, es probable que puedan emplearse materiales más económicos o procesos más eficientes que reduzcan aún más el coste final.

9. Conclusiones

Después de haber recopilado y analizado suficiente información tanto a nivel teórico como experimental, y tras llevar a cabo simulaciones numéricas, procesos de fabricación y ensayos prácticos, se procede a exponer las conclusiones principales del estudio. Estas conclusiones se centran en la comparativa entre los dos modelos de rampa, la de aluminio convencional y la fabricada con materiales compuestos, con especial atención a aspectos como el comportamiento estructural, el peso y la viabilidad económica de cada alternativa.

Se ha podido comprobar que la rampa construida inicialmente con materiales compuestos sin refuerzos presentaba un rendimiento estructural inferior al de la rampa de aluminio, mostrando mayores desplazamientos y menor rigidez. No obstante, con la

incorporación de refuerzos longitudinales y el uso de fibra de carbono en su estructura, el modelo de rampa reforzada de material compuesto ha logrado superar en varios aspectos a la rampa metálica.

En primer lugar, la rampa reforzada con materiales compuestos ha demostrado un mejor comportamiento estructural en términos de deformación, reduciendo los desplazamientos en un 85% respecto al modelo sin reforzar, e incluso obteniendo resultados comparables y en ciertos casos mejores que la rampa de aluminio.

Además de su buen desempeño mecánico, la rampa reforzada presenta otras ventajas notables: es más ligera, con un peso final de 9,26 kg frente a los 12,3 kg de la rampa de aluminio, lo cual mejora significativamente su portabilidad y facilidad de uso. Igualmente, desde un punto de vista económico, la rampa de material compuesto ha resultado ser más barata, con un coste de materiales inferior al del modelo metálico.

En conjunto, este estudio demuestra que el uso de materiales compuestos, especialmente en configuraciones tipo sándwich con refuerzos estratégicos y fibras de alto rendimiento como la fibra de carbono, constituye una alternativa viable y prometedora frente a las rampas convencionales de aluminio. Gracias a su ligereza, coste reducido y buen rendimiento estructural, este tipo de rampas podría constituir una opción eficiente y competitiva para mejorar la accesibilidad en entornos domésticos y urbanos.

10. Bibliografía

- Amazon. (s.f.). *LIEKUMM Rampa para discapacitados antideslizante plegable*. Obtenido de <https://www.amazon.es/LIEKUMM-Discapacitados-Antideslizante-Plegable-escaleras/dp/B08HKNXR9V>
- KAISER+KRAFT. (s.f.). *Rampa de acceso universal modular (1000 x 670 x 150 mm)*. Obtenido de <https://tinyurl.com/kaiser-rampa>
- SolidWorks. (2021). *Criterio de fallo de Tsai-Wu*. Obtenido de https://help.solidworks.com/2021/spanish/SolidWorks/cworks/r_tsaiwu_failure_criterion.htm
- Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. (s.f.). *Documento Básico SUA - Seguridad de utilización y accesibilidad*. Obtenido de <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SUA/DccSUA.pdf>
- Vestalia. (s.f.). *¿Qué es la fibra de carbono y para qué sirve?* Obtenido de <https://vestalia.es/actualidad/que-es-la-fibra-de-carbono-y-para-que-sirve/>

- *Gabrian. (s.f.). Aluminio 6061: conozca sus propiedades y usos.* Recuperado de <https://www.gabrian.com/es/aluminio-6061-conozca-sus-propiedades-y-usos/>

- *Easy Composites. (s.f.). Guía de infusión de resina.* Recuperado de <https://media.easycomposites.co.uk/datasheets/EC-TDS-Guide-to-Resin-Infusion.pdf>