

Rediseño de componentes metálicos en materiales termoplásticos: ejemplo de aplicación



Carlos Javierre-Lardiés*
Javier Abad-Blasco*
Víctor Camañes-Vera*
David Franch-Pardo*, **

Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Ingeniero Técnico en Diseño Industrial

* UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. EINA. Dpto. Ingeniería Mecánica y de Diseño.
C/Maria de Luna, 3 - 50018 Zaragoza. Tfno: +34 876 555148. carlos.javierre@unizar.es
** ZALUX S.A. Centro Empresarial Miralbueno. Ctra. Madrid Km 315,7 - 50012 Zaragoza.
Tfno: +34 976462200

Recibido: 28/06/2012 • Aceptado: 08/10/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5202>

REDESIGN OF METALIC PARTS WITH THERMOPLASTIC MATERIALS: APPLICATION EXAMPLE

ABSTRACT

- This work presents a redesign process of a high responsibility part, made of metal, which is wanted to be produced with thermoplastic material. At first point, the factors to be considered in this kind of processes in order to realize an optimized functional design taking into account thermoplastics properties and processing characteristics are analyzed, injection molding in this case. This analysis is the result of the authors experience over the last twenty years in plastic redesign processes in many industrial sectors. The second part of this document explains the design process carried out and the experimental validation. In the experimental process, it was compared the behavior of the metal and the final plastic part, and also, a prototype plastic part was tested and compared with the metal part before the final plastic part fabrication. This prototype was generated to validate one of the functions of this part, and it was designed without and optimized design using the advantages of the thermoplastic injection process over the shapes possibilities. Analyzing this work, conclusions can be made over the difference of a substitution process of metal to plastic with a methodic process, taking into account the complex thermoplastic materials behavior and optimizing or not the shapes of the part. Finally, the results of the experimental tests are presented in order to validate the calculations made over the parts in different working conditions and the results obtained by means of the finite element method.
- **Keywords:** redesign in plastic, design methodology, creep, thermoplastic materials.

RESUMEN

El trabajo que se presenta corresponde a un proceso de rediseño de una pieza de alta responsabilidad, fabricada en metal, que se quiere fabricar en material termoplástico. En primer lugar se realiza un análisis de los factores que hay que considerar en este tipo de procesos de cara a realizar un diseño funcional optimizado que considere las peculiaridades de los materiales termoplásticos y sus procesos de transformación, en este caso el moldeo por inyección.

La segunda parte del documento corresponde a la explicación del proceso de diseño real desarrollado y a la validación experimental desarrollada posteriormente. Tiene especial interés el hecho de que en la parte experimental no sólo se compara el comportamiento de la versión de la pieza en metal y la pieza final en plástico, sino que además en el planteamiento del proyecto se introdujo la generación de una pieza intermedia fabricada con el material real con un molde prototipo de formas muy parecidas a la pieza en metal. Esta versión intermedia que se generó para validar una de las funciones de la pieza tiene una forma semejante a la que se obtendría en un proceso de sustitución de material sin optimizar el diseño de la pieza ni aprovechar las ventajas que da el proceso de inyección de termoplásticos en cuanto a formas.

De esta manera, analizando el trabajo, se pueden obtener conclusiones sobre la diferencia existente entre,

un simple proceso de sustitución de metal por plástico y un proceso metódico en el que se consideran las particularidades de los materiales termoplásticos y la posibilidad de optimizar al máximo las formas. Por último se presentan los resultados de los ensayos experimentales realizados durante un año con el objetivo de validar los cálculos por elementos finitos.

Palabras clave: rediseño en plástico, metodología de diseño mecánico, creep, materiales termoplásticos.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas muchos componentes mecánicos han sufrido procesos de rediseño y han pasado de ser diseñados en metal a ser diseñados en materiales plásticos [1]. Cuando este proceso se convierte en un simple cambio de material se obtiene un diseño no optimizado técnicamente. El rediseño en material plástico tiene que ser un proceso metódico que considere las características del material y su proceso de transformación [2]. El diseñador en material plástico debe conocer que el comportamiento de las propiedades de los materiales plásticos es complejo y puede verse influenciado por muchos factores menos críticos que, por ejemplo, en los metales [3].

La influencia de temperaturas bajas o no muy elevadas, los efectos de la dilatación, su comportamiento a fatiga, la velocidad de aplicación de las cargas, los efectos a tiempos largos, difieren de forma notable en los plásticos frente a los metales. Las propiedades mecánicas como la resistencia o la rigidez suelen ser menores que en los materiales clásicos, haciendo que se trabaje con coeficientes de seguridad más ajustados, aumentando así los riesgos en el diseño. El tiempo de aplicación de la carga es un factor crítico en el cálculo de componentes fabricados en materiales termoplásticos. Piezas cargadas de forma permanente pueden presentar fenómenos de *creep* a medio y largo plazo que pueden ocasionar su fallo [4-7].

El ejemplo que se presenta en este trabajo corresponde a una pieza de alta responsabilidad fabricada en metal que se rediseña en material plástico. La pieza rediseñada es un anclaje para luminarias estancas. El fallo de esta pieza podría ser peligroso al ser empleada para sujetar luminarias de tamaños elevados y que pueden estar situadas a una altura considerable. En la versión en metal el problema del *creep* es inexistente mientras que en material plástico condiciona totalmente su diseño. Mediante *análisis por elementos finitos* se pueden simular las diferentes funciones de la pieza, incluida su comportamiento a tiempos largos mediante un análisis de *creep*.

El objetivo de este trabajo es mostrar la metodología de rediseño en plástico de un componente real de alta responsabilidad y validar teórica y experimentalmente su diseño. Se ha elegido un componente muy representativo, donde se ha seguido un proceso de diseño y cálculo teórico muy completo, teniendo en cuenta un gran número de factores (humedad, temperatura, tiempo de aplicación de la

carga, elevado número de funciones, etc.) que han podido ser validados posteriormente de forma experimental. A pesar de que el trabajo va a mostrar principalmente la parte técnica, que es la realmente singular y en la que se diferencia de otros ejemplos prácticos, se señalarán también las diferencias desde el punto de vista económico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. METODOLOGÍA

El rediseñar un componente o un conjunto metálico en materiales termoplásticos no puede convertirse en un simple proceso de sustitución de materiales en la pieza o piezas del mecanismo, debe ser un proceso completo de diseño global donde se tengan en cuenta las ventajas e inconvenientes que los materiales plásticos tienen. El proceso de rediseño se centrará en la hoja de especificaciones que debe cumplir el conjunto, adaptado a las características del nuevo material a emplear. En el proceso de rediseño se tendrá que tener muy en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Posibilidad de geometrías complejas y aumento de la funcionalidad:** formas que pueden ser consideradas complejas en muchos procesos de transformación no tienen porqué serlo en piezas que vayan a ser fabricadas mediante inyección de termoplásticos. Esto permite en muchas ocasiones agrupar funciones en una sola pieza, con lo que es muy común encontrar elementos rediseñados en plástico con un número menor de piezas y, por tanto, un ahorro en operaciones de montaje. También por el mismo motivo se puede plantear introducir formas en las piezas para aumentar las funciones de las mismas mejorando la funcionalidad del producto y dándole más valor añadido. Esto solo se puede conseguir con un planteamiento global del rediseño del conjunto mecánico y no con un rediseño por piezas.
- **Características y propiedades de los materiales plásticos:** los materiales plásticos tienen un amplio rango de características, esto hace que el tipo de piezas que se pueden diseñar pueda ser muy diverso tanto por su función como por sus dimensiones o sus características. Los metales suelen tener mejores propiedades mecánicas (resistencia, rigidez, etc.), pero con un diseño adecuado esto puede resolverse y aprovecharse de aquellas características en las que los plásticos pueden ser más beneficiosos: ligereza, acabado, comportamiento aislante térmico y eléctrico, y, sobre todo, el coste, que motiva en muchas ocasiones la elección de este tipo de materiales. Los materiales plásticos más utilizados pueden tener una rigidez del orden de cien veces menor que los aceros. Esto supone que al diseñar con estos materiales deberemos tener

especial atención en vigilar no sólo las tensiones que se producen en el funcionamiento de las piezas, sino también las deformaciones que sufren que pueden hacer, que sin romperse, las hagan no funcionales. Otro ejemplo podría ser la influencia de factores ambientales, como la temperatura, a la que los materiales termoplásticos son muy sensibles.

• **Condicionantes del proceso de fabricación:** los diversos procesos de transformación de los materiales plásticos y sus numerosas técnicas y variantes permiten geometrías, acabados y propiedades de piezas muy diferentes. El diseño de los utillajes y los parámetros de proceso pueden influir de forma notable en la funcionalidad de las piezas y en propiedades reales del material. Por ejemplo una pieza inyectada, fabricada en un mismo material, tendrá una resistencia diferente en función del número, la posición de los puntos de entrada de material al molde y de los parámetros de inyección que se establezcan.

• **Coefficientes de seguridad:** en muchos diseños en metal los coeficientes de seguridad son muy elevados debido a las elevadas propiedades mecánicas del metal frente a un bajo nivel de solicitaciones. Las características de los procesos de fabricación en metal hacen que, en muchas ocasiones, no sea viable técnicamente ni rentable económicamente reducir los elevados coeficientes de seguridad en componentes y conjuntos mecánicos. Los diseños en materiales plásticos suelen tener un coeficiente de seguridad mucho más ajustado que el diseño equivalente en metal. Al tener un coeficiente de seguridad menor es mucho más crítica la determinación de las acciones reales que actúan sobre las piezas y la rigurosidad y precisión en los cálculos que sobre ellas se realicen.

• **Naturaleza de las acciones:** en el análisis de componentes y conjuntos a ser fabricados en materiales plásticos es crítico la naturaleza de las acciones exteriores que sobre ellos actúan, por ejemplo hay que prestar especial cuidado en aspectos como la velocidad y tiempo de aplicación de las cargas. Se ha comentado anteriormente el efecto de la temperatura, alta o baja, en los materiales termoplásticos: temperaturas bajas o no muy elevadas, entre -20° y 100°C, no afectan prácticamente a aceros y cambian totalmente el comportamiento de muchos plásticos. Con la velocidad de aplicación de la carga se genera un efecto semejante al de la temperatura. El material tiene un comportamiento más rígido con velocidades altas de aplicación de esfuerzos y soporta deformaciones menores, el efecto contrario se produce con velocidades de aplicación de la carga lentas. Los fenómenos de *creep*, generados por tiempos largos de aplicación de la carga, o los de relajación de esfuerzos pueden ser críticos en materiales plásticos.

Teniendo en cuenta los puntos expuestos, el proceso de rediseño de un componente o un conjunto mecánico en material termoplástico tendrá que ser un proceso global de rediseño que preste especial atención en:

1. La optimización de la forma mediante integración de piezas y la suma de funciones;
2. Selección del material plástico en función de las propiedades mecánicas y su comportamiento en las situaciones ambientales en las que va a trabajar;
3. Consideración de la influencia del proceso de fabricación en las propiedades del material.
4. Naturaleza de las cargas y solicitaciones a lo largo de toda su vida de trabajo. Valoración de las solicitaciones reales a las que va a ser sometido y rigurosidad en los análisis y cálculos.

De forma esquemática se puede representar de la siguiente forma, Fig. (1).



Fig. 1: Proceso de rediseño en plástico

2.2. MATERIALES

El material propuesto para realizar el diseño del anclaje metálico en plástico es una poliamida 6.6. Se toman para el diseño los valores de tensión y deformación admisible así como de rigidez para poliamida húmeda, Tabla 1. El material empleado viene fijado en las especificaciones de diseño.

	PA 6.6 húmeda	PA 6.6 seca
Modulo elástico	3000 MPa	4900 MPa
Resistencia a la flexion	115 MPa	155 MPa

Tabla 1: Rigidez y resistencia a flexión de la PA 6.6

Para la realización de análisis en comportamiento no lineal se utilizaron las curvas de tensión/deformación para diferentes temperaturas y las curvas de *creep* proporcionadas por el fabricante Fig. (2).

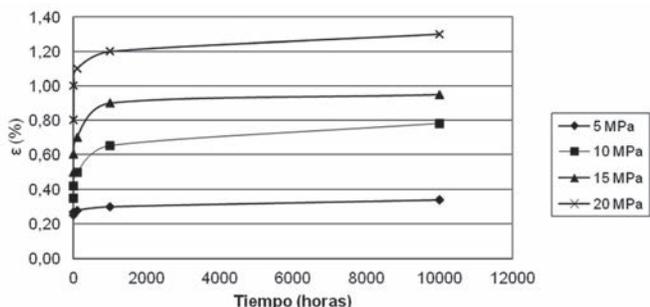


Fig. 2: Curvas de creep para la PA 6.6 en función de la tensión de trabajo

3. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En este apartado se detalla el proceso de rediseño de un anclaje de luminaria estanca, en el que la pieza pasa a fabricarse de acero a poliamida.

3.1. PLANTEAMIENTO

El modelo original de anclaje metálico, que va a ser objeto de rediseño en material plástico, es el que se muestra en la Fig. (3), donde se observa su diseño en metal y su función de clipado sobre la carcasa de una luminaria estanca. Las dimensiones máximas de este anclaje son 60x25x17 mm.



Fig. 3: (a) Anclaje metálico, (b) Clipado del mismo sobre una luminaria estanca

Este anclaje tiene que soportar un peso de 25 N, durante un tiempo largo, y bajo una temperatura máxima de trabajo de 40°C. Las funciones que tiene que cumplir son las siguientes:

1. Clipado en pieza: en la Fig. (4.a) se muestra una imagen real del clipaje de este anclaje sobre la luminaria.

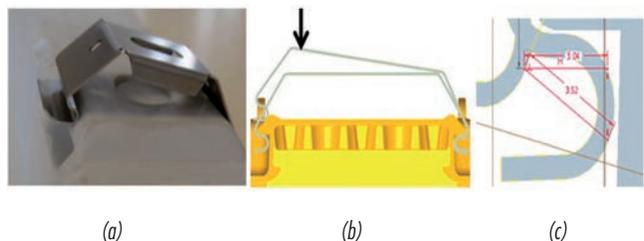


Fig. 4: (a) Función de clipado del anclaje sobre la luminaria, (b) Representación geométrica de posiciones extremas en el clipado, (c) Detalle de dimensiones de clipado en posiciones extremas

2. Colgado horizontal de techo o de triángulo: una de las formas de las que se puede colgar la luminaria con este anclaje es del techo, atornillando directamente el anclaje al mismo y clipando posteriormente la luminaria sobre el anclaje. La otra forma es colgar la luminaria a través de un elemento triangular fabricado en metal que engancha en el clip, mostrado en la Fig. (5.a), evitando así el atornillado del anclaje al techo.

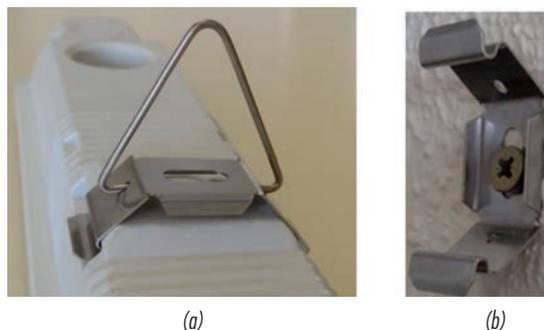


Fig. 5: (a) Elemento triangular para colgado horizontal, (b) Colgado vertical.

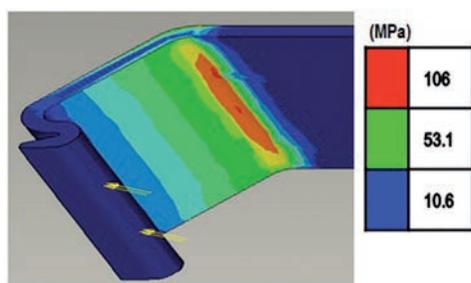
3. Colgado vertical: el otro modo de funcionamiento es atornillando el anclaje a la pared y colgar de él la luminaria, tal y como se muestra en la Fig. (5.b).

3.2. VERSIÓN PROTOTIPO

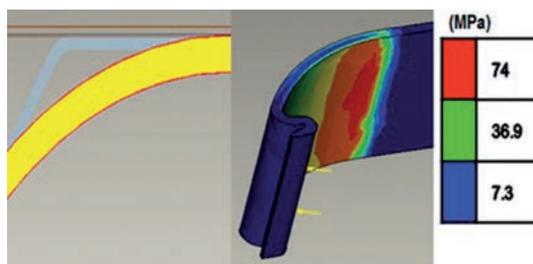
Inicialmente se planteó la posibilidad de un diseño con forma semejante al diseño metálico pero con mayor espesor. Debido a las pequeñas dimensiones del anclaje y al elevado valor de altura de clipado: 3.5 mm, y tras unos primeros cálculos analíticos se concluyó que la función de clipado podría ser crítica y se decidió comenzar por el cálculo del anclaje para esa función, de cara a ir analizando diferentes opciones de diseño.

Función de clipado: Analizaremos la altura de engarce, la fuerza necesaria para llegar a esa altura de engarce y las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos sufridos por el clip al realizar la función de clipado. Se establece la deformación que sufre la pieza durante el montaje en 3.5 mm. Para el cálculo por elementos finitos se simuló el desplazamiento que sufre la pieza durante el clipado obteniéndose, para un espesor de 2 mm, valores de tensión muy elevados, Fig. (6.a). Se comprobó de esta forma que el clipado iba a ser una función crítica para la pieza.

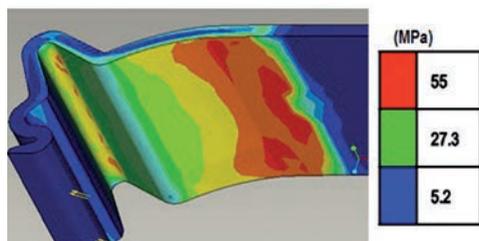
De cara a reducir estos valores se planteó la posibilidad de aumentar la longitud de la pieza que trabaja como clip aumentando el redondeo tal y como se aprecia en la Fig. (6.b). Con esta modificación se producía una mejora notable pero no suficiente. Se plantearon dos variantes de cara a la reducción de tensiones; la primera consistía en un intento de disminuir la rigidez de la pieza mediante un elemento tipo fuelle, que permitiera la deformación durante el clipado con unas tensiones moderadas. Esto se consiguió en gran medida



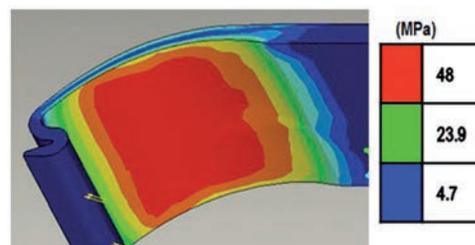
6.a: Estado tensional durante el clipado



6.b: Opción de rediseño y tensiones



6.c: Tensiones para el diseño tipo fuelle



6.d: Tensiones en el diseño óptimo para clipado

Fig. 6: Distribución de tensiones en los diferentes diseños

con el diseño de la Fig. (6.c), pero se observó que influía de forma muy negativa en las funciones de colgado. La segunda variante consistía en generar una zona de espesor variable a lo largo de la zona de la pieza que se deformaba durante el clipado, pasando progresivamente de una zona de espesor 3.5 mm a otra de 1.7 mm. Esto generaba una adaptación perfecta de la forma de la pieza a la función de clipado, uniformizando las tensiones como se puede ver en la Fig. (6.d).

Este diseño, que se tomó como referencia de cara a la generación de una geometría para un primer molde prototipo, Fig. (8), permitía obtener unas tensiones altas pero dentro de valores admisibles. Como se puede ver en la Tabla 2, se obtiene un coeficiente de seguridad relativamente bajo, pero al ser una sollicitación de muy poca duración se puede ajustar en mayor medida el coeficiente de seguridad, comprobando posteriormente que la pieza soportaba adecuadamente el estado tensional generado durante el clipado. Se realizó el análisis para el material seco y húmedo, obteniéndose un coeficiente de seguridad más ajustado para la primera situación, cosa lógica ya que para la misma deformación, las tensiones generadas son mayores para el material más rígido.

	E (MPa)	σ MPa	Δ mm	ϵ %	C.S.
Seca	4900	91	3.5	1.65	1.7
Húmeda	3000	48	3.5	1.65	2.3

Tabla 2: Resultados obtenidos en el análisis de la función de clipado para el prototipo

Comprobada la función de clipado, se pasó al análisis de la función colgado, tanto vertical como horizontal

siguiendo la misma metodología.

Función de colgado horizontal: esta función se refiere al colgado de las luminarias de forma paralela al suelo. En esta posición calcularemos las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos sufridos por el anclaje al realizar la función solicitada. Tanto en el colgado horizontal como en el vertical la situación más crítica es la de la poliamida húmeda que es menos rígida y generará

deformaciones mayores. En la Tabla 3 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para esta función, y se muestra una imagen de la simulación realizada en la Fig. (7.a).

	E (MPa)	σ MPa	Δ mm	ϵ %	C.S.
Seca	4900	7.7	0.16	0.26	20
Húmeda	3000	7.7	0.1	0.16	14

Tabla 3: Resultados obtenidos en el análisis de la función de colgado horizontal

Función colgado vertical: esta función se refiere al colgado de las luminarias sobre una pared o superficie perpendicular al suelo. En esta posición calcularemos las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos sufridos por el clip al realizar la función solicitada, igual que en el caso anterior. La Tabla 4 recoge los resultados de la simulación realizada y en la Fig. (7.b) se muestra la distribución de tensiones para este modo de trabajo.

	E (MPa)	σ MPa	Δ mm	ϵ %	C.S.
Seca	4900	17	0.52	0.35	9.1
Húmeda	3000	17	0.85	0.57	6.7

Tabla 4: Resultados obtenidos en el análisis de la función de colgado vertical

Este último análisis presenta un resultado que puede ser preocupante en una pieza de plástico, que es el correspondiente a la deformación. Un valor próximo a 1mm puede suponer

un problema a largo plazo debido a los efectos de *creep* que pueden sufrir los plásticos en esfuerzos prolongados.

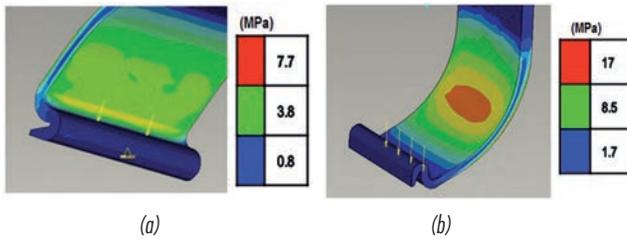


Fig. 7: Distribución de tensiones obtenidas en el análisis de las funciones de colgado, a) Distribución de tensiones obtenidas en el análisis de la función de colgado horizontal b) Distribución de tensiones obtenidas en el análisis de la función de colgado vertical,

En la Fig. (8.a) se muestra el diseño final de la versión prototipo 3D y en la Fig. (8.b) la pieza real. Se aprecia la incorporación de unas lengüetas de desmontaje que aportan una función extra al diseño sin suponer coste o complicación técnica.

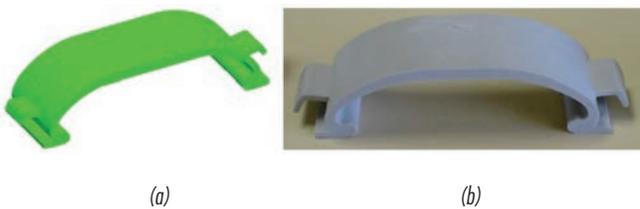


Fig. 8: (a) Modelo 3D del prototipo, (b) Pieza real

Sobre este prototipo se realizó un ensayo experimental de colgado vertical. En la Fig. (9) se puede observar el montaje de la pieza, simulando su colgado en una pared, y aplicando la carga del mismo modo que si se hubiera clipado una luminaria. La Tabla 5 recoge los resultados de este ensayo sobre el prototipo.



Fig. 9: Colgado vertical sobre el prototipo de anclaje

Pieza	Medida inicial	Medida final	Deformación
ANCLAJE PROTOTIPO	36.12 mm	37.46 mm	1.34 mm

Tabla 5: Resultados para la función de colgado vertical del prototipo

Como se puede observar, se obtuvo experimentalmente una deformación de 1.34 mm en la pieza prototipo, algo

excesivo, ya que la pieza pierde así su función de agarre de la luminaria, llegando a ser peligroso ya que puede descolgarse.

Tras los primeros ensayos sobre la pieza prototipo se pudieron obtener las siguientes conclusiones.

- Se obtuvo un correcto funcionamiento de la pieza durante el clipado
- Se obtuvo un correcto funcionamiento de la pieza durante colgado horizontal.
- Se generaban unas deformaciones elevadas en el colgado vertical a corto plazo, que aumentaban de forma notable en los primeros días.

3.3. DISEÑO FINAL

De cara al diseño final de la pieza se dio por buena la geometría de la pieza de cara a la función clipado, pero había que mejorar su comportamiento en el clipado vertical e introducir otras funciones pedidas en las especificaciones técnicas y otras no pedidas pero que no supusieran complicación ni encarecimiento de la pieza de cara a aprovechar las ventajas del proceso de inyección de termoplásticos, aplicando el primer punto de la metodología propuesta.

Se obtuvo el diseño final que se observa en la Fig. (10) donde se señalan los detalles más significativos.

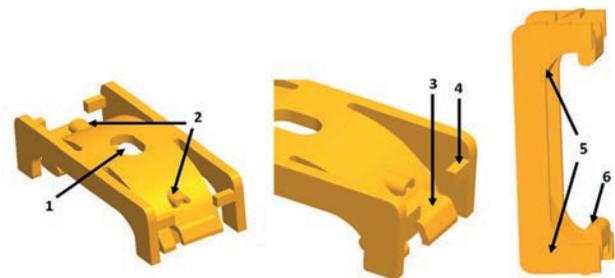


Fig. 10: Modelo 3D del diseño final

1) ORIFICIO DE ATORNILLADO: el orificio de atornillado se incorpora sobre la geometría de la pieza sin suponer ninguna operación extra en su fabricación. Este orificio disminuye la sección resistente en la zona de la pieza sometida a mayores tensiones durante el clipado y el colgado horizontal, con lo que afectará a su coeficiente de seguridad.

2) ORIFICIO PARA EL TRIÁNGULO: el orificio del triángulo se generará con un sistema de correderas que permite el desmolde de los laterales.

3) PESTAÑA DE DESMONTAJE: se introduce una pestaña en cada lado para facilitar el desmontaje del clip de forma manual.

4) TOPE DE DESMONTAJE: en la pieza se han introducido unos topes para limitar el recorrido de la pieza durante su desmontaje, con el objetivo de evitar deformaciones demasiado elevadas durante este proceso.

5) SOPORTE PARA COLGADO VERTICAL Y PROTECCIÓN FRENTE A APLASTAMIENTO: a ambos lados de la pieza se introduce una zona con forma de “U” que va a trabajar únicamente durante la función de colgado

vertical de forma que soporte la mayor parte de la carga. Apoyará sobre la superficie de anclaje y tiene un diseño muy rígido que evitará las deformaciones elevadas que se producían en dicha función, en la versión prototipo.

6) ELEMENTO DE CLIPADO: el elemento de clipado se reduce de anchura al estar limitada la anchura de la pieza y tener que introducir la zona soporte del colgado vertical. Esto afectará a la función de colgado horizontal.

Sobre este diseño se llevaron a cabo los análisis necesarios para comprobar las solicitaciones a las que iba a estar sometido. Aplicando el segundo punto de la metodología se realizaron los cálculos considerando el efecto que sobre las propiedades del material tiene la temperatura y la humedad. Teniendo en cuenta el tercer punto de la metodología se localizó el punto de entrada del material en el centro de la pieza, de esta forma la orientación del material era óptima y las líneas de soldadura se situaban en zonas poco solicitadas.

Función clipado en la pieza final: se realizaron los mismos cálculos que los explicados en el apartado anterior para la función de clipado, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 6 y en la Fig. (11).

Pieza	F (N)	E (MPa)	σ (MPa)	Δ (mm)	C.S
Húmeda	41.7	3000	85	3.5	1.35
Seca	68	4900	138	3.5	1.12
Fría 0°	52.5	3800	107	3.5	1.31
Caliente 40°	25	1800	51	3.5	1.6

Tabla 6: Resultados para la función de clipado en la pieza final

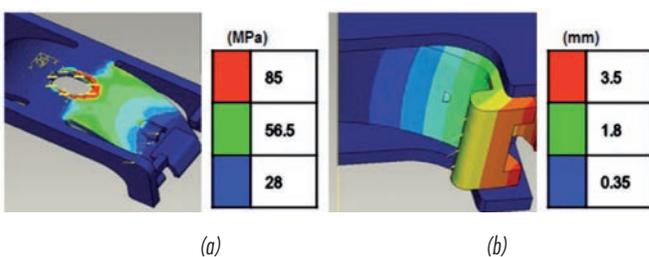


Fig. 11: Función clipado de la pieza final, (a) Distribución de tensiones, (b) Desplazamientos

Función colgado horizontal en la pieza final: se realizaron los mismos cálculos que los explicados en el apartado anterior para la función de colgado horizontal, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 7 y en la Fig. (12).

Pieza	F (N)	E (MPa)	σ (MPa)	Δ (mm)	C.S
Húmeda	25	3000	6.6	0.1	17.4
Seca	25	4900	6.6	0.06	23.5

Tabla 7: Resultados para la función de colgado horizontal en la pieza final

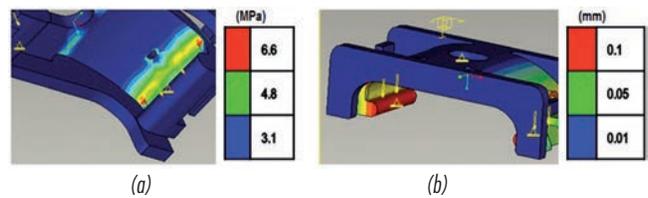


Fig. 12: Función colgado horizontal de la pieza final, (a) Distribución de tensiones, (b) Desplazamientos

Función colgado vertical en la pieza final: se realizaron los mismos cálculos que los explicados en el apartado anterior para la función de colgado vertical, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 8 y en la Fig. (13).

Pieza	F (N)	E (MPa)	σ (MPa)	Δ (mm)*	C.S
Húmeda	25	3000	4.1	0.02	28
Seca	25	4900	4.1	0.01	37.8

Tabla 8: Resultados para la función de colgado vertical en la pieza final (*: desplazamiento en la zona crítica)

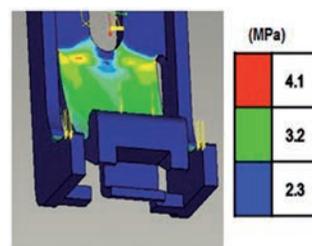


Fig. 13: Distribución de tensiones para la función colgado vertical de la pieza final

Finalmente, tras la realización de todos los cálculos se fabricó la pieza real, Fig. (14). Tras los primeros ensayos realizados sobre la misma, en el que las solicitaciones se aplicaron durante un corto instante de tiempo, se obtuvieron resultados satisfactorios, en todas las funciones previstas: clipado, colgado horizontal atornillado y con triángulo y colgado vertical.



Fig. 14: Pieza real del anclaje rediseñado en plástico

3.4. ESTUDIO DE CREEP SOBRE EL DISEÑO FINAL

De cara a la aplicación del cuarto punto de la metodología, se ha considerado que cuando la pieza se encuentra sometida a solicitaciones de larga duración se presenta un fenómeno crítico de la función de colgado, y por eso se ha realizado un análisis de creep por elementos finitos mediante el programa *SolidWorks-Simulation*; tanto en el colgado vertical como en el horizontal. En la Fig. (15) se muestra el modelo utilizado para el cálculo de la función de colgado vertical en dicho análisis, donde se utiliza un cilindro muy rígido para hacer de empujador sobre el clip, igual que en las pruebas experimentales.

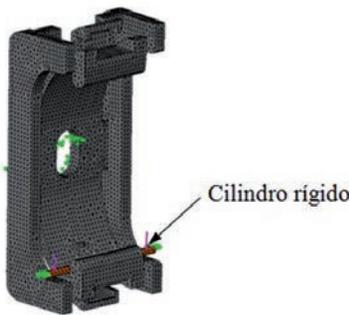


Fig. 15: Modelo de simulación

El modelo de creep que se ha empleado en este estudio numérico es la “Ley de potencia clásica para fluencia” de *Bailey-Norton* [8], formulada a continuación, Ec. (1):

$$\epsilon^c = C_0 \sigma^{(C_1)} t^{(C_2)} e^{\left(\frac{-C_3}{T}\right)} \quad C_1 > 1 \quad \text{y} \quad 0 < C_2 \leq 1 \quad (1)$$

En este estudio no se ha tenido en cuenta el efecto de la temperatura, por lo que en la ecuación anterior se despreciaría el término relativo a la temperatura. Las constantes C_1 y C_2 se han obtenido a partir de las curvas proporcionadas por el fabricante.

Con el fin de validar los resultados numéricos, se han realizado diversos ensayos experimentales, tanto para colgado vertical como para colgado horizontal. En la Fig. (16) se muestra el montaje experimental que se realizó, mediante el cual se registró la deformación a *creep* durante 1 año.

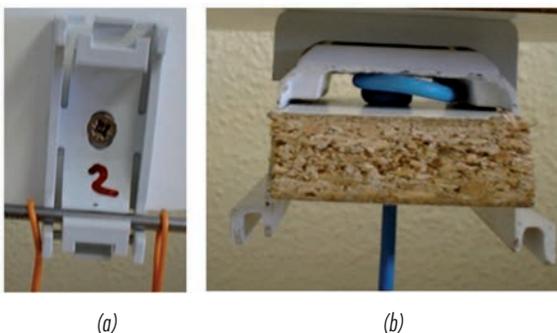


Fig. 16: Montaje experimental, (a) Colgado vertical, (b) Colgado horizontal

En la Fig. (16.a) se aprecia cómo se aplica la carga a través de una barra de acero únicamente en uno de los brazos, trabajando igual que si se hubiera colgado la luminaria en vertical. En la Fig. (16.b) se aprecia una sección de la luminaria colgada del clip en horizontal. Se utilizó un taco de madera para rigidizar la sección de luminaria a lo ancho, ya que al estar cortada perdía rigidez y podía dar lugar a resultados erróneos.

3.4.1. Resultados de creep para colgado vertical: correlación numérico-experimental

En la Fig. (17) se muestra el resultado experimental del ensayo de la pieza a creep, donde se puede apreciar la influencia que el tiempo de aplicación de la carga tiene sobre el desplazamiento de la pieza, produciéndose los mayores incrementos de deformación a lo largo de los primeros días, estabilizándose pasado un mes, a una deformación constante a lo largo del tiempo.

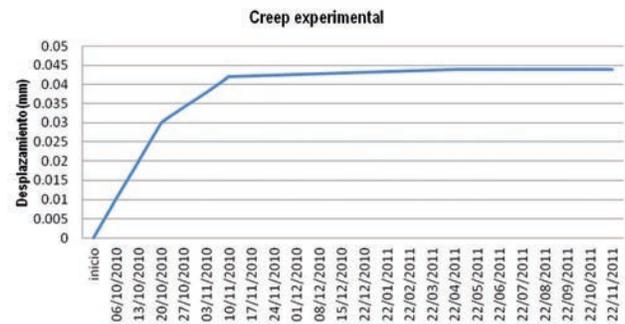


Fig. 17: Resultado experimental del ensayo de creep en colgado vertical

En la Tabla 9 se muestran los resultados experimentales en tiempos representativos.

TIEMPO	Medida inicial	Medida final	Desplazamiento
100h (4días)	44.86 mm	44.89 mm	0.03 mm
1000h (41días)	-	44.902mm	0.042 mm
2400 h (100 días)	-	44.907 mm	0.044 mm
10000h (416días)	-	44.907 mm	0.044 mm

Tabla 9: Resultados experimentales de creep para colgado vertical

Así mismo en la Fig. (18) se muestra la gráfica obtenida con los resultados de *creep* de la simulación numérica realizada con *SolidWorks*.

Podemos comprobar que se obtiene una curva de *creep* semejante a la obtenida experimentalmente. Tanto los resultados experimentales como la simulación tienden a estabilizarse en el tiempo. En las medidas experimentales,

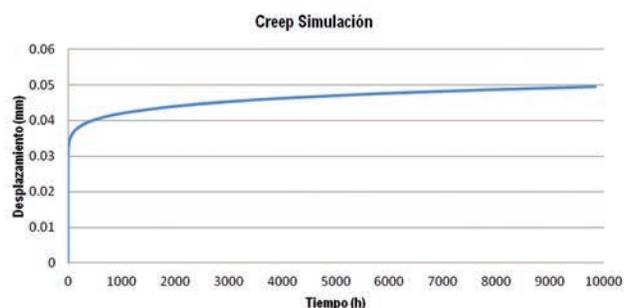


Fig. 18: Resultado de la simulación para creep colgado vertical

el máximo desplazamiento que se da es de 0.044 mm, y en la simulación 0.049 mm, tanto cualitativamente como cuantitativamente se puede considerar que la simulación proporciona unos resultados fiables para el cálculo de este componente a creep.

4. CONCLUSIONES

1. Se ha presentado un ejemplo de rediseño de una pieza de metal a material plástico donde se muestra la diferencia entre limitarse a una simple sustitución de material o generar un rediseño completo, considerando las características del diseño propias del material plástico:
 - Optimización de formas y espesores e introducción de funciones adicionales
 - Consideración de los condicionantes del proceso de fabricación en el diseño
 - Análisis funcional y resistente considerando el comportamiento del material frente a tipos de carga y condiciones de trabajo específicas.
2. Se ha comprobado de forma experimental el funcionamiento de una versión mal diseñada donde se ha visto la problemática de la sustitución del material y no el rediseño de la pieza.
3. Se ha validado experimentalmente el diseño y cálculo resistente de la pieza realizado con el programa de elementos finitos SolidWork-Simulation analizando situaciones a corto plazo y a largo plazo mediante el modulo de creep. Se han obtenido valores de deformación que no influyen en la funcionalidad de la pieza.
4. Se ha comprobado cómo se deben plantear diferentes coeficientes de seguridad en las piezas de plástico en función de la forma de trabajo de la pieza y del tipo de esfuerzos. Con coeficientes de seguridad bajos en funciones con esfuerzos de poca duración y condiciones controladas, coeficientes de seguridad altos en otras condiciones de trabajo.

Dentro del aspecto económico destacar que el diseño original en metal, fabricado por un proveedor externo, tiene

un coste de 0.2 euros frente a los 0.14 euros previstos para el modelo en plástico. De los 0.14 euros, 0.06 corresponden a la amortización del molde para la producción estimada.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Javierre C., Fernández A., "Criterios de diseño mecánico en tecnologías industriales", 1ª ed., Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2012. ISBN: 978-84-15274-53-7.
- [2] Aisa J, Javierre C, De la Serna JA. "An example of simulation tools use for large injection moulds design: The CONTENUR™ 2400 l solid waste container", *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Vol. 175, p. 15-19. (doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.006)
- [3] Berins ML. "Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry", 5th ed. New York: Van Nostram Reinhold, 1991. ISBN: 978-0412991813.
- [4] Khan F. "Loading history effects on the creep and relaxation behavior of thermoplastics". *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2006. Vol. 128, p. 564-571. (doi: 10.1115/1.2345448)
- [5] Khan F, Yeakle C. "Experimental investigation and modeling of non-monotonic creep behavior in polymers", *International Journal of Plasticity*. 2011. Vol. 27, p. 512-521. (doi: 10.1016/j.ijplas.2010.06.007)
- [6] Krempl E, Khan F. "Rate (time)-dependent deformation behavior: an overview of some properties of metals and solid polymers", *International Journal of Plasticity*. 2003. Vol. 19, p. 1069-1095. (doi: 10.1016/S0749-6419(03)00002-0)
- [7] Sá MF, Gomes AM, Correia JR, et al. "Creep behavior of pultruded GFRP elements - Part 1: Literature review and experimental study.", *Composite Structures*. 2011. Vol. 93, p. 2450-2459. (doi: 10.1016/j.compstruct.2011.04.013)
- [8] SolidWorks-Simulation Release 2011, Documentation: Bailey-Norton law, Dassault Systemes Inc., 2012.