

# Diseño de una pieza de plástico reciclado: Metodología y aplicación

M. Sánchez-Soto<sup>1,2</sup>, R. Gámez<sup>1</sup>, A. Gordillo<sup>1,2</sup>, P. Pagés<sup>2</sup>, M. LL. Maspoch<sup>1</sup>

1. Centre Català del Plàstic.
2. Dept. de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica, Universitat Politècnica de Catalunya.

## Resumen

El mecanismo por el que se diseña una pieza de plástico es un proceso complejo que implica el conocimiento de las características mecánicas, eléctricas y físicas de la pieza y también de los procesos de transformación. La principal tarea del diseñador es traducir una serie de requerimientos e ideas previas en las dimensiones y formas finales que tendrá la pieza. Para conseguirlo de forma optimizada el diseñador debe hacer uso de su experiencia, conocimientos y de una metodología de diseño adecuada. El objeto de este trabajo es poner de manifiesto los pasos a seguir cuando se aborda un diseño y la aplicación a una pieza de plástico fabricada en material reciclado.

## Palabras Clave

Técnicas CAE, reciclado, diseño, materiales plásticos, selección de materiales.

Cuando se aborda el diseño de una determinada pieza, artículo o mecanismo, el diseñador debe tomar en consideración numerosos factores o requisitos que son previos a la definición del objeto y que tienen una gran influencia sobre las prestaciones finales. La traducción de dichos factores en ideas, formas y dimensiones es en definitiva el fin último del diseño. El objeto de este artículo es poner de manifiesto una metodología de diseño y su aplicación final al ejemplo de una pieza realizada en material plástico reciclado.

La creación de una pieza es un proceso complejo en el que el diseñador, además de conocer los requerimientos funcionales de la misma, debe estar familiarizado con los procesos de transformación que se emplean, conocer las propiedades de los materiales así como las condiciones a las que estará sometida la pieza durante su vida útil. Una dificultad suplementaria es que numerosas veces, gran parte de los requisitos no son a priori conocidos o no están convenientemente definidos. [1]

El objetivo de un proceso de diseño es proporcionar una solución adecuada al problema que se plantea, pero además, la solución debe ser dada en su momento justo. En la actualidad, el nivel de exigencia del mercado obliga a acortar los tiempos de desarrollo de producto mientras que por otra parte deben reducirse costes e incrementar la calidad de los elementos que se fabrican, sin embargo, para conseguir un diseño óptimo es necesaria la inversión de tiempo y recursos. La solución de esta aparente contradicción estriba en el uso de herramientas de diseño y simulación potentes y en la adopción de una metodología de diseño efectiva.

Las técnicas de simulación a través de elementos finitos (CAD/CAE) constituyen herramientas fundamentales de apoyo a la consecución y desarrollo efectivo del producto, mientras que el empleo de disciplinas basadas en la ingeniería concurrente (Figura 1) permite anticipar soluciones en las etapas primarias de definición del producto, esto es, cuando los costes son menores. La intención fundamental de la ingeniería concurrente es la de implicar desde buen principio a

todas las personas que van a tener una participación futura en el mismo aprovechando la experiencia de cada participante para llegar mas rapidamente a la solución.

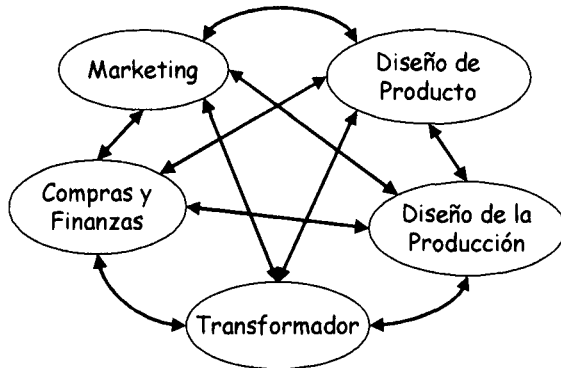


Figura 1.- Esquema del proceso de ingeniería concurrente.

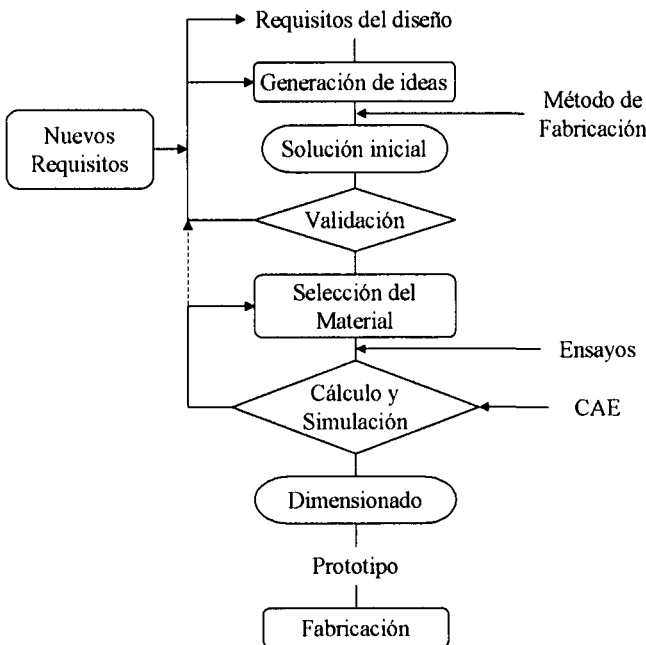


Figura 2.- Esquema del proceso de diseño

El proceso que conduce hasta la definición completa de la pieza tiene un caracter iterativo, las etapas basicas que lo forman pueden visualizarse en la Figura 2. Algunas de las etapas fundamentales se describen seguidamente.

### Especificaciones o requisitos de diseño

El primer paso a realizar es el establecimiento de las necesidades que se pretende satisfaga la pieza y la acotación y definición de todos los requerimientos funcionales y no funcionales de la misma. El establecimiento de estos requisitos es una de las tareas de mayor dificultad y también de mayor importancia en cualquier diseño porque cuanto mejor sea la definición de las especificaciones de la pieza tanto mejor sera el ajuste de sus prestaciones con respecto a la utilización prevista. Por otro lado si la definición de condicionantes es incompleta o incorrecta el resultado sera una pieza no valida o no totalmente optimizada.

En muchas ocasiones resulta muy difícil anticipar alguno de los requisitos de un producto, bien por su desconocimiento, como por ejemplo las condiciones de abuso o mal uso del mismo, o bien como resultado de su difícil definición, como por ejemplo en conceptos subjetivos como la estética. Aún así es siempre mas útil y practico tratar de encontrar propiedades o características que puedan medirse y que representen la cualidad que se desea posea el artículo.

Una vez acotados los requerimientos del diseño se identifican todas las variables libres y las restricciones de la pieza y se agrupan en términos de aspectos funcionales comunes (esfuerzos mecanicos, condiciones ambientales de trabajo, requerimientos dimensionales y legales etc.). A partir de aquí se cuantifican las especificaciones técnicas elaborando expresiones matematicas que muestren las relaciones existentes entre las diferentes variables para posteriormente seleccionar aquellas que ejercen una mayor influencia sobre el diseño.

### Concepto preliminar de la pieza

Una vez que los requisitos de la pieza han sido establecidos es posible desarrollar un diseño preliminar o conceptual del producto. En este diseño conceptual se elabora una primera visión de la pieza estableciendo las dimensiones generales de la misma y sus interrelaciones con el exterior o con otros componentes, también se especifican aquellas dimensiones o funciones que son

fijas y las que desde el punto de vista del diseño pueden estar sujetas a cambios. A lo largo de esta etapa no se realiza la definición completa de la pieza sino que preferentemente se definen aquellos elementos comunes que obligatoriamente debe proporcionar, contener o asegurar el producto. El siguiente paso a seguir es el de elegir los materiales que mejor se adapten a las especificaciones técnicas de la pieza.

## Selección de materiales

La elección del material constituyente es un factor determinante en el diseño de una pieza, por lo que conseguir una buena aproximación al inicio del proceso puede ahorrar mucho esfuerzo, tiempo y sobretodo dinero. Actualmente existe una gran variedad de tipos y grados diferentes de materiales con propiedades muy diversas de manera que la selección del material ideal para una pieza o componente no es un trabajo fácil.

Una primera aproximación razonable es utilizar formas y materiales que tradicionalmente se han venido o vienen empleando en piezas con funcionalidad similar a la que nos ocupa, sin embargo, esto deja de ser válido cuando se abordan diseños nuevos o cuando se buscan alternativas más baratas y eficientes a las existentes.

A partir del establecimiento de los requisitos finales de la pieza el diseñador puede generar un perfil de propiedades clave con el que empezar a comparar y seleccionar los materiales más adecuados para la aplicación final. En este sentido es útil realizar la comparación en función de aquellas propiedades que no son susceptibles de ser mejoradas a través del diseño como por ejemplo la transparencia, resistencia química, conductividad eléctrica etc.

Otra forma de realizar la elección del material es emplear una serie de gráficas [2-3] en las que se agrupan las diferentes familias de materiales en función de los atributos que, según requiera el diseño, se pretendan maximizar o minimizar. Tales atributos han sido definidos con anterioridad y reflejan aquellos parámetros o relación de parámetros que normalmente tienen influencia en los diseños como: Módulo de Young/densidad, resistencia/densidad tenacidad/resistencia, expansión térmica/conductividad, módulo/coste etc, una vez seleccionados los parámetros críticos, la aplicación de estas gráficas proporcionará al diseñador una serie de familias de materiales que de acuerdo a lo anterior cumplen las prestaciones requeridas.

En este nivel de desarrollo del producto es útil contar con varios materiales candidatos para poder

contrastarlos entre sí, por otra parte debe tenerse en consideración que las propiedades de dichos materiales serán diferentes y por lo tanto también lo será la geometría de las piezas asociadas a cada una de ellas. Así por ejemplo un material con rigidez doble que otro necesitará en principio la mitad de espesor para soportar un mismo esfuerzo mecánico.

## Proceso de fabricación

Tan importante como realizar una correcta selección de materiales es asegurar que la pieza puede ser realizada mediante los procesos de transformación y con la tecnología existente. La falta de consideración de este factor puede desembocar en una pieza con diseño excelente pero imposible de fabricar o económicamente inviable. Así pues, todo proceso de diseño debe considerar las restricciones que impone el método de fabricación.

En el caso de la transformación de materiales plásticos las principales restricciones afectan a tamaños, espesores y formas de pieza alcanzables, debiéndose verificar la viabilidad de realización de la pieza o en caso contrario modificarla adecuadamente para conseguir su fácil fabricación.

Al igual que en la selección de materiales también se han elaborado gráficas genéricas [3] que permiten seleccionar los procesos más adecuados para la fabricación de la pieza de acuerdo con parámetros como el área específica de la pieza, espesor, peso, rugosidad superficial o temperatura de fusión.

El proceso por el que se transforman un mayor número de piezas de plástico diferentes y la mayoría de piezas técnicas es la inyección, por ello, a lo largo de este artículo nos referiremos específicamente al caso de artículos inyectados, sin embargo, la metodología de trabajo es análoga independientemente del método de transformación empleado.

## Selección final de materiales

Para acometer la selección final del material con el que se va a realizar la pieza un procedimiento que puede emplearse es el de la cuantificación objetiva de cada uno de los materiales resultantes de la selección efectuada en la anterior etapa.

En primer lugar es conveniente realizar un listado exhaustivo de todas las propiedades que desde el punto de vista del material se desea que tenga la pieza, por ejemplo en términos de resistencia mecánica, resistencia

química, módulo elástico etc. En segundo lugar, cada una de las propiedades se valora con un índice numérico, dando, si es el caso, mayor importancia a aquella o aquellas propiedades que resulten de vital importancia para la pieza. Finalmente se realiza el cómputo de todas las propiedades y se extrae como resultado un valor global representativo del material que indicará la mayor o menor adecuación del material a la finalidad prevista.

### Consideraciones a tener en cuenta en el diseño de piezas de plástico

Tal y como se ha visto anteriormente el diseño de una pieza debe concebirse en función de las propiedades del material, así, no es lo mismo diseñar una bisagra, o un muelle, en metal o en plástico.

Tradicionalmente, para la concepción de una pieza inyectada de plástico, se ha partido de un primer diseño funcional de la misma, y también de la elección de un tipo, grado y formulación del material. A partir de estas dos primeras selecciones, se ha procedido al cálculo o a la estimación de las características mecánicas de la pieza, a fin de colocar los nervios y refuerzos necesarios para proporcionar la adecuada rigidez y consistencia mecánica.

La baja conductividad térmica junto con las contracciones que sufre el material plástico al enfriarse dentro del molde limitan el espesor máximo que puede tener la pieza inyectada, obligando a diseñar con grandes superficies específicas. El diseño de piezas inyectadas con grandes espesores es problemático y difícil pues lleva asociados numerosos defectos e implica largos tiempos de procesado.

En comparación con otras alternativas como los metales o cerámicos, los materiales plásticos tienen un bajo módulo elástico, por lo tanto, para obtener por ejemplo una rigidez en flexión equivalente, debe compensarse el bajo módulo del material con el aumento del momento de inercia. El aumento del momento de inercia se consigue a través de la adecuada disposición de nervios y refuerzos que deberán ser estrechos y profundos tanto para maximizar el momento de inercia como para evitar las vacuolas internas o los rechupes superficiales que puedan producirse al enfriarse el material.

Otro aspecto a considerar en la viabilidad de una pieza inyectada es como se distribuye el material dentro del molde durante el proceso de inyección. Es bien conocido [4] que las condiciones empleadas en la inyección pueden alterar las propiedades e incluso las

dimensiones finales de las piezas y por tanto resulta de gran utilidad anticipar en lo posible los problemas que puedan aparecer en la pieza antes de la construcción del molde.

El desarrollo de los métodos de cálculo numérico por ordenador y la aparición de ordenadores cada vez más rápidos, está permitiendo la implementación extensiva de técnicas CAE para el cálculo y diseño de piezas de plástico que en general abordan dos conceptos: el cálculo mecánico y la simulación de la inyección.

### Proceso de cálculo mecánico

Como consecuencia de su naturaleza viscoelástica, los materiales plásticos presentan un comportamiento elástico cuando se solicitan a altas velocidades de deformación, mientras que cuando se solicitan a bajas velocidades de deformación predomina un comportamiento viscoso. Dicho comportamiento está provocado por la libertad de movimientos de los segmentos de cadena polimérica y queda representado en la Figura 3.

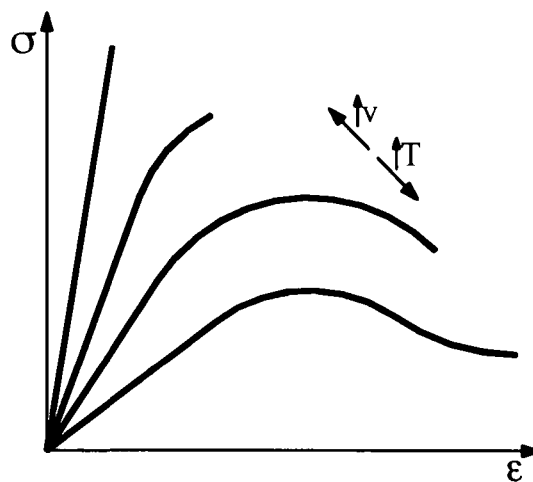
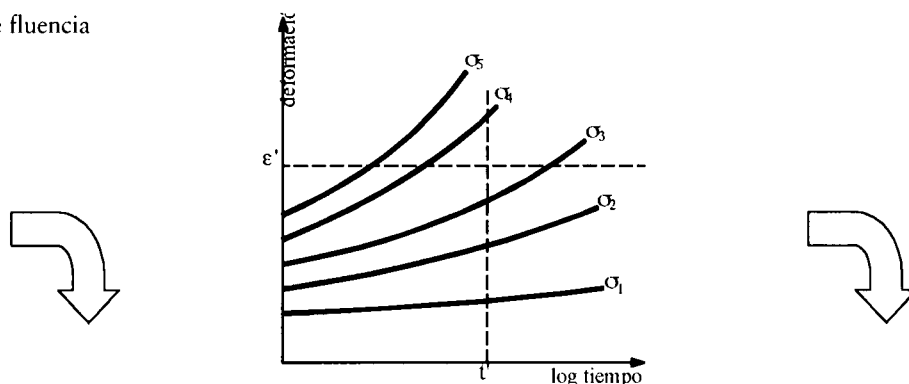


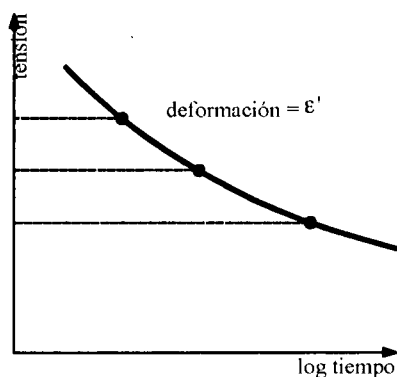
Figura 3.-Diagramas tensión-deformación a diferentes velocidades de sollicitación.

En la gráfica anterior se observa que, a medida que aumenta la temperatura, disminuye el módulo elástico y la tensión de cedencia, aumentando la elongación a rotura, mientras que ocurre lo contrario a medida que aumenta la velocidad de deformación. Ello implica que además de la variación de las propiedades con respecto a la temperatura, en los materiales plásticos debería tenerse en cuenta el tiempo de aplicación de la carga,

Curva de fluencia



Curva Isométrica



Curva isócrona

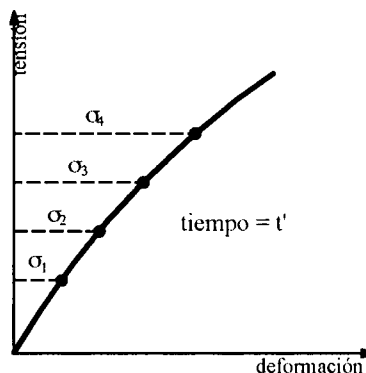


Figura 4.-Curvas genéricas de fluencia con el tiempo de un material plástico. Curvas isométrica e isócrona.

siendo de especial relevancia aquellos casos en los que una determinada carga está aplicada sobre una pieza durante un largo periodo de tiempo.

Cuando una pieza de plástico se encuentra solicitada de manera continua, exhibirá inicialmente una deformación elástica instantánea seguida de un continuo incremento de deformación debido al comportamiento viscoso del material, siendo esta última deformación dependiente del tiempo de aplicación de la carga y obviamente de la tensión aplicada (Figura 4).

Para obtener una pieza que soporte una carga aplicada durante un largo periodo de tiempo deben emplearse las curvas de fluencia con el tiempo del material y asegurar que la pieza no se rompiera o deformara en exceso durante su vida en servicio. Una forma sencilla,

aunque conservadora, es trabajar con la curva tensión-deformación isócrona en el tiempo que se desea soportar la pieza y extraer las propiedades mecánicas a partir de dicha curva. Así por ejemplo, el módulo elástico vendría dado por:

$$E_i(t, T) = \frac{\sigma_i}{\epsilon(t, T)}$$

O de otro modo por la pendiente de la curva isócrona trazada al tiempo t. La forma más exacta de cálculo es disponer de las curvas experimentales del material en forma de ecuación matemática y analizar la evolución de las tensiones de la pieza con el tiempo por ejemplo mediante programas de calculo mecanico por elementos

finitos [5], de esta forma es incluso posible predecir el comportamiento de la pieza bajo esfuerzos variables.

Por otra parte el comportamiento de los plásticos es diferente en tracción que en compresión de manera que deberán aplicarse los distintos valores de compresión o de tracción según esté solicitada la parte de la pieza, y en caso de indeterminación aplicar los valores de tracción que son más críticos. En la práctica sin embargo, es habitual trabajar con las curvas de tracción del material y mantener un pequeño nivel de seguridad.

## Simulación de la inyección

Los programas de simulación de la inyección permiten predecir el comportamiento reológico de los plásticos en el molde y determinar los parámetros del proceso de transformación e incluso optimizar el diseño del molde, pudiendo obtenerse mejoras significativas en la calidad del producto final [6]

Para realizar la simulación del proceso de inyección es necesario conocer la geometría de la pieza a inyectar, el tipo de máquina, el material del molde y las características del material que se inyecta (temperatura de inyección, curvas PVT, etc.) sin embargo, el propio programa de cálculo [7] incorpora la mayoría de las características y propiedades que se necesitan.

En un primer paso se introducen las características aproximadas del proceso: temperatura de inyección, temperatura del molde y de expulsión, proporcionando el programa lo que se conoce como ventana de proceso en la que se reflejan las condiciones en las que la inyección será factible (Figura 5).

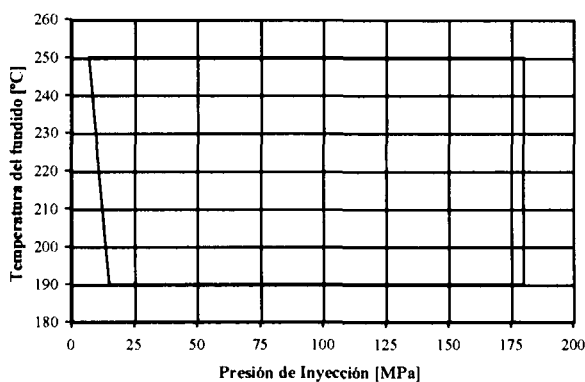


Figura 5.- Ejemplo de ventana de proceso.

A partir de este punto el programa proporciona una primera aproximación a las variables óptimas del sistema, pudiéndose determinar por ejemplo el perfil de velocidades de inyección recomendado, el tiempo de inyección y de mantenimiento de presión o una primera estimación de las oclusiones de aire y de en su caso las líneas de soldadura.

Uno de los gráficos que proporciona más información es el que muestra avance del flujo de material fundido por el interior de la pieza. A través de este resultado puede determinarse la posición más idónea para el punto de inyección o definir si el paso del material está convenientemente compensado y por lo tanto adoptar las correspondientes medidas correctoras. Esta primera fase de análisis permite optimizar pues la alimentación del molde, su equilibrado, la situación y dimensión de la entrada a la pieza y la posición de salida de gases y líneas de soldadura.

En un segundo nivel de profundidad en la simulación, introduciendo la geometría de los canales de refrigeración del molde, se puede obtener el tiempo de refrigeración de la pieza y por consiguiente el tiempo total de ciclo, lo que nos permite tener una aproximación fiable al coste final de la pieza. Además de lo anterior, el sistema proporciona la eficiencia de los canales de refrigeración y la distribución de temperaturas dentro de la pieza con lo que cualitativamente puede obtenerse una estimación del potencial alabeo o deformación de la pieza.

Como último nivel de resultados el sistema proporciona las contracciones y deformaciones de la pieza simulada. La estimación de las contracciones y deformaciones es uno de los principales objetivos en el diseño de moldes y tiene una gran repercusión desde el punto de vista económico. Las causas principales de contracción se pueden agrupar en tres categorías [8]: Orientación del flujo, diferencias de presión y cristalización y refrigeración diferencial de la pieza. A partir de la observación de contracción volumétrica de la pieza, de los posibles reflujos del material dentro del molde y de la evolución de la velocidad de deformación, se puede optimizar el perfil de presiones de mantenimiento y su tiempo de aplicación, factores ambos que son de gran importancia para la estabilidad dimensional y calidad de la pieza.

## Aplicación: Soporte de un palet en plástico reciclado

A través de este análisis se desea comprobar la viabilidad de la fabricación en material plástico reciclado de