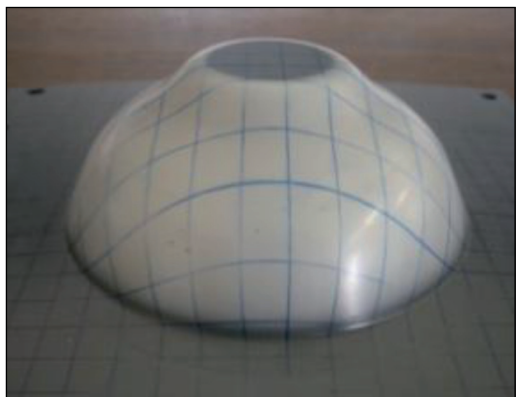


Fabricación rápida de prototipos para automoción mediante deformación incremental de chapa



Pablo Romero-Carrillo
Francisco Javier Aguilar-Contreras
Rubén Dorado-Vicente
Rafael López-García

Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD DE JAÉN. Dpto. de Ingeniería Mecánica y Minera.
Campus "Las Lagunillas" – 23071 Jaén. Tfno: +34 953 211712. promero@ujaen.es

Recibido: 20/12/2012 • Aceptado: 08/04/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5681>

RAPID PROTOTYPING FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY VIA INCREMENTAL SHEET FORMING

ABSTRACT

• First papers relative to use of polymers in incremental forming of sheet are dated in 2008. Nowadays, only a reduced number of works have been published, and most of them are oriented to the experimental validation of the process. Almost no work is focused on the use of the technique in a real industrial application.

In this paper, it is explained the implementation of one of the incremental forming techniques for rapid prototyping of a plastic headlight reflector for automotive industry. In the first sections of the paper, the incremental forming process applied to polymers is presented, as well as main parameters that govern it. The tools used to adapt a conventional CNC machine-tool are described too. After the first tests, in the following sections, the methodology employed to manufacturing a headlight reflector, including the use of a multi-stage strategy, is explained. Finally, the results of a dimensional comparison between the prototype and the real model are shown, so the suitability of the process is checked.

• **Keywords:** Single point incremental forming, Rapid prototyping, Polymers, Experimentation.

RESUMEN

Los primeros trabajos relativos a procesos de deformación incremental con chapas de material polimérico se publicaron en 2008. El reducido número de trabajos publicados sobre este tema están dedicados casi exclusivamente a la validación experimental del proceso, y no existen publicaciones que versen sobre aplicaciones reales de la técnica a procesos industriales del sector del plástico.

En el presente artículo se estudia la viabilidad del uso de la técnica de deformación incremental de PVC mediante un único punto SPIF (*Single Point Incremental Forming*) a la fabricación de prototipos de reflectores de las ópticas de faro de automóvil. En la primera parte del artículo, se describen y explican el fundamento y los parámetros que gobiernan el proceso SPIF en polímeros, así como el utillaje necesario para adaptar una

fresadora CNC para el proceso SPIF. Tras la puesta a punto del proceso, en la segunda parte del artículo se presenta la metodología seguida para realización del prototipo de un reflector sencillo, incluyendo el uso de una estrategia multietapa, además de los resultados de las comprobaciones dimensionales realizadas, de cara a establecer la bondad del proceso SPIF con polímeros en la realización de prototipos para automoción.

Palabras clave: Deformación incremental, SPIF, Prototipado rápido, Polímeros, Experimentación.

1. INTRODUCCIÓN

En las fases más avanzadas del proceso de desarrollo de un nuevo producto o componente de la industria, los equipos de diseño suelen dejar atrás la información en formato papel o los

modelos paramétricos 3D de la pantalla del ordenador, y prefieren trabajar con prototipos reales. Son varias las ventajas de trabajar directamente con el modelo físico conceptual del producto: mayor capacidad de optimización del diseño, identificación rápida de problemas, reducción de costes y plazos y disponibilidad de productos para marketing [1].

Para conseguir materializar un modelo CAD (del inglés, *computer-aided design*) existen varias técnicas, conocidas con el nombre general de “sistemas de prototipado rápido” o RP (del inglés, *Rapid Prototyping*). Las técnicas tradicionales están basadas en la fabricación por adición o AM (del inglés, *Additive Manufacturing*), ya que consisten en ir añadiendo material, capa a capa, hasta conseguir la pieza completa. Cada técnica se diferencia de la anterior en el formato de la materia prima utilizada (polvo, hilo), en la propia materia prima (metal, polímero, cerámica), o en la tecnología usada para convertir esa materia prima en una pieza sólida de la forma deseada, y con mayor o menor resistencia [2].

En 1996, Matsubara introdujo un nuevo tipo de proceso de prototipado rápido, basado en la deformación incremental de materiales en forma de chapa o ISF (del inglés, *Incremental Sheet Forming*) [3]. Los primeros años de desarrollo del ISF se dedicaron casi exclusivamente a la deformación de materiales metálicos [4], con aplicaciones en automoción [5] y en biomedicina [6]. Desde el año 2008, algunos autores han comenzado a trabajar con probetas de chapa polimérica [7-10]. En este sentido, no se han encontrado publicaciones que versen sobre aplicaciones reales del proceso de deformación incremental sobre chapas de materiales poliméricos.

En la provincia de Jaén, existe una importante industria de inyección de plástico, orientada básicamente a la fabricación de componentes de iluminación para el automóvil. La constante evolución de los diseños y la necesidad de los fabricantes de minimizar la fase de lanzamiento del ciclo de vida de cada modelo de automóvil, hace no sólo frecuente sino también imprescindible, el uso de prototipos por parte tanto del fabricante como de todas estas industrias auxiliares [1]. Sin embargo, hasta ahora, las técnicas de RP utilizadas estaban basadas en AM. Es por ello que en el grupo de trabajo de fabricación del área de “Ingeniería Mecánica” de la Universidad de Jaén se está trabajando en la aplicación de las técnicas de ISF a la fabricación de prototipos para la industria auxiliar del automóvil, concretamente la dedicada a la iluminación y la señalización.

En el presente trabajo se pretende evaluar la viabilidad del uso de la técnica SPIF en la fabricación de prototipos poliméricos para el sector de automoción, en base a criterios puramente dimensionales. En la sección 2, se presentarán los fundamentos y las distintas técnicas de ISF existentes en la actualidad. También se explicarán los parámetros más importantes del proceso. A continuación, en la sección 3, se detallará el utillaje diseñado y fabricado para convertir un centro de mecanizado existente en el taller mecánico de la Escuela Politécnica Superior de Jaén en una máquina de deformación incremental mediante un único punto o máquina SPIF. También se expondrán las pruebas preliminares reali-

zadas para comprobar el montaje y caracterizar el material utilizado para la fabricación del prototipo. En la sección 4, se presentará un ensayo de aplicación de SPIF a la fabricación de un prototipo de un reflector de la óptica de un faro de automóvil. En la sección 5 se mostrarán las mediciones realizadas para comprobar la bondad del proceso, a nivel dimensional. Finalmente, en la sección 6, se expondrán las conclusiones extraídas de las pruebas realizadas, en relación a la idoneidad del proceso SPIF para la fabricación de prototipos de componentes para faros de automóvil, así como posibles futuros desarrollos.

2. FUNDAMENTOS DE LA DEFORMACIÓN INCREMENTAL. TÉCNICAS EXISTENTES

La deformación incremental de una chapa se viene utilizando en el torno convencional en operaciones tan tradicionales como el repujado o entallado. Sin embargo, hace apenas veinte años, Matsubara [3] extendió el concepto a otras máquinas que permiten conformar piezas no necesariamente de revolución (Fig. 1). Para ello, se fija la chapa, mediante un marco metálico, a un bastidor previamente anclado a la mesa de una fresadora con control numérico (CN). Una herramienta o punzón, que gira sobre su propio eje, va describiendo una trayectoria previamente programada en el CN, a la vez que deforma poco a poco la chapa. Las trayectorias suelen estar contenidas en el plano XY, con una coordenada Z constante. Tras completar cada vuelta, la herramienta desciende un incremento de Z fijo, y vuelve a describir una trayectoria en el plano XY.

Existen varios tipos de procesos de deformación incremental mediante punzón (Fig. 2) [4]:

- Deformación incremental mediante un único punto, o SPIF.
- Deformación incremental con punzón de seguimiento.
- Deformación incremental con dos puntos o TPIF (del inglés, *Two Point Incremental Forming*). En este caso, el segundo punto es en realidad un molde, parcial o total.



Fig. 1: Proceso de deformación incremental de una chapa

La técnica más sencilla de implementar y la más flexible es el SPIF, ya que no demanda máquinas ni montajes complejos ni es necesaria la fabricación de moldes parciales o totales.

A continuación, se explicarán cuáles son los parámetros más importantes del proceso: chapa (material, espesor, dimensiones), geometría de la pieza (ángulo máximo), herramienta (diámetro), velocidad de giro del punzón y avance.

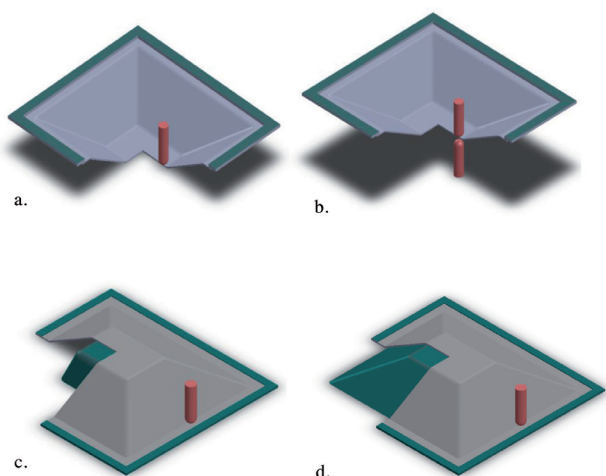


Fig. 2: Distintas técnicas de deformación incremental mediante punzón: a) Mediante un único punto (SPIF); b) Con punzón de seguimiento; c) Mediante dos puntos, con molde parcial; d) Mediante dos puntos, con molde total (TPIF)

2.1. CHAPA

Los primeros ensayos y trabajos de investigación en SPIF se orientaron hacia las chapas de carácter metálico. Se han realizado pruebas con aceros, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, aleaciones de magnesio y se ha llegado incluso a utilizar titanio [6]. En los últimos cuatro años, varios autores han trabajado también con polímeros, como el policloruro de vinilo (PVC), la poliamida (PA), polioximetileno (POM), policarbonato (PC) y polietileno (PE) [8-9].

El espesor de la chapa es, lógicamente, un parámetro importante. Para los metales, los espesores van desde 1,0 mm para los aceros [12], hasta 3,3 mm, para las aleaciones de cobre [13]. En el caso de los polímeros, los espesores usados son de 2 a 3 mm [9].

Las dimensiones “ancho” y “largo” de la chapa vienen dadas por el campo de trabajo de la máquina con CN y por las dimensiones del prototipo a fabricar. Obviamente, no tiene sentido intentar fabricar un prototipo de tamaño mayor al que permite la máquina con CN con una chapa de partida de dimensiones menores a las de la pieza final.

2.2. GEOMETRÍA DE LA PIEZA. ÁNGULO MÁXIMO DE DEFORMACIÓN

La técnica es reciente y todavía se está validando experimentalmente. En general, se analizan tres tipos de geometrías: cono, pirámide e hipérbola (Fig. 3). Estas geome-

trías son sencillas de programar y el número de parámetros geométricos que influyen en la operación es reducido. Además, en ellas es fácil de medir el ángulo máximo de deformación. Este ángulo se define como el mayor ángulo que se puede deformar un material mediante SPIF sin que aparezca fallo alguno en la chapa (Fig.4).

El valor del ángulo máximo de deformación depende del material y del espesor de la chapa. Por ejemplo, para una chapa de aleación de aluminio Al 3003, con 0,93 mm de espesor, el ángulo máximo es de 67° mientras que para una chapa del mismo material, pero de 2,1 mm de espesor, el ángulo máximo es 78° [14]. Por lo anterior, para obtener una forma libre en una chapa de determinado material mediante SPIF, habrá que localizar discontinuidades en la normal de la superficie del modelo CAD. Estas discontinuidades se corresponden con los ángulos de deformación máximos, cuyo valor debe ser menor al ángulo máximo de deformación de la chapa del citado material, para el espesor elegido.



Fig. 3: Geometrías más utilizadas en los ensayos de SPIF: a) Tronco de cono; b) Pirámide truncada; c) Hipérbola.

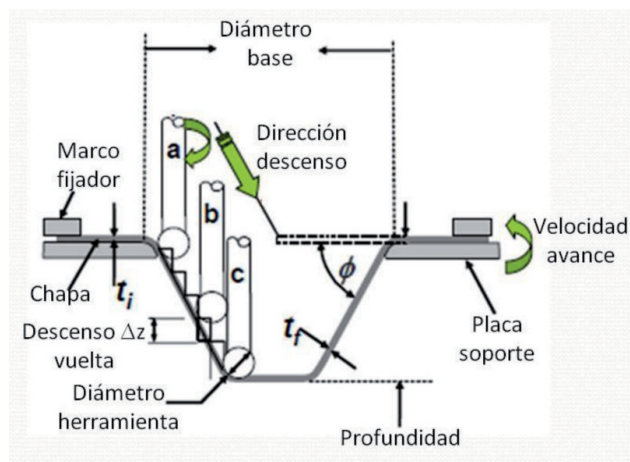


Fig. 4: Parámetros más importantes en el proceso SPIF (figura basada en [15])

2.3. HERRAMIENTA

Como ya se ha comentado en epígrafes anteriores, en el SPIF se utiliza como herramienta de deformación un punzón de punta semiesférica. Esta geometría asegura un punto de contacto continuo entre la herramienta y la chapa. La herramienta normalmente es de acero, si las chapas que se van a emplear en el proceso son metálicas, aunque en algunas aplicaciones se emplean herramientas de plástico para evitar la reacción química entre la herramienta y el material de la chapa.

Respecto al diámetro de la herramienta, se vienen utilizando diámetros que van desde los 6mm hasta 100mm [4], en función del tamaño de la pieza a fabricar, y de su geometría (Fig. 5). La elección del diámetro de la herramienta depende del radio de la superficie cóncava más pequeña del prototipo y de la deformación máxima que se pretenda alcanzar en el material, ya que diámetros menores de herramienta conducen normalmente a mayores deformaciones [8].

El empleo de mayores diámetros de herramienta se traduce en un aumento de la potencia requerida a la máquina de CN, debido al incremento del ángulo de contacto. Por otro lado, herramientas con secciones transversales reducidas pueden llegar a romper, sobre todo en procesos de deformación de materiales de gran resistencia, como pueden ser el acero inoxidable o el titanio.

Por último, indicar que la herramienta tiene una importante influencia en la calidad superficial de la pieza fabricada y en el tiempo de fabricación [16].



Fig. 5: Herramientas de distintos diámetros, utilizadas en procesos SPIF [17]

2.4. VELOCIDAD DE GIRO Y VELOCIDAD DE AVANCE DE LA HERRAMIENTA

El punzón, durante su trabajo de deformación incremental, va girando sobre su propio eje. El número de revoluciones depende del grado de fricción que se desee entre chapa y herramienta. Hay autores que permiten que la herramienta gire “loca” [18], mientras que otros investigadores trabajan con un elevado número de revoluciones, buscando un calentamiento extra que facilite el proceso de deformación.

Lo usual es calcular las revoluciones de tal modo que la herramienta vaya deslizando sobre la chapa sin que exista fricción añadida, más allá de la propia del proceso. Para ello, se iguala la velocidad tangencial en el punto de la herramienta en contacto con la chapa más alejado del eje de la misma, con la velocidad de avance con la que se mueve la herramienta en sus trayectorias en el plano XY. Utilizando la construcción trigonométrica mostrada en la Fig. 6, Micari et al. [4] deducen la expresión para calcular la velocidad de giro ω dada en la Ecuación 1.

$$\omega = \frac{v}{\pi \cdot r \sqrt{\frac{1}{2(1 - \cos 2\phi)}}} \quad (1)$$

La velocidad de avance v parece no ser un factor determinante en estos procesos. En la bibliografía consultada, para materiales metálicos, las velocidades usadas van de 300 a 3000 mm/min, mientras que en polímeros la velocidad de avance utilizada normalmente es 1500 mm/min [8-9].

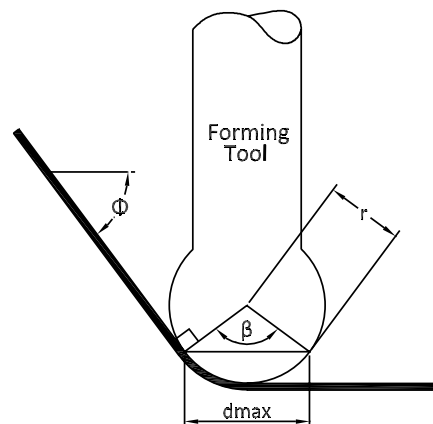


Fig. 6: Parámetros del proceso SPIF necesarios para calcular la velocidad de giro de la herramienta [4]

2.5. DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO Y LÍNEAS LÍMITE DE FRACTURA

Para predecir si una chapa de un determinado material y espesor soportará un determinado nivel de deformación se utilizan los diagramas límite de conformado o diagramas FLD (del inglés, *Forming Limit Diagram*) y las líneas de fractura en la deformación (ver Fig. 7).

Los diagramas FLD fueron desarrollados por Keeler y Goodwin (de hecho, algunos autores todavía los denominan diagramas *Keeler-Goodwin*). No dejan de ser sino “mapas” de deformaciones principales (ϵ_1, ϵ_2) que sirven para establecer los estados de deformación “seguros” y los estados de deformación “no seguros” (que pueden provocar estricción no deseada o rotura). El valor “ ϵ_1 ” representa la deformación principal de mayor valor (siempre positiva) mientras que el valor “ ϵ_2 ” representa el valor menor (puede ser positiva o negativa).

La línea “roja” del diagrama de la Fig. 7 es conocida como línea de fractura en la deformación o FFL (del inglés, *Fracture Forming Line*). La zona situada por debajo de dicha línea roja se considera segura, mientras que la zona situada por encima de la misma probablemente conducirá a rotura. Esta línea se elabora a partir de ensayos de tracción uniaxial (línea color “naranja”) y ensayos bi-axiales (línea color “verde”). Realmente, aunque siempre se habla de “línea de fractura”, es en realidad una banda ya que hay que tener en cuenta un 10% de posible error debido a las incertidumbres en la determinación de la misma [10].

Para medir las deformaciones principales es necesario imprimir sobre la chapa a deformar una rejilla formada por círculos que después de la deformación pasan a ser elipses (se utilizan varios tipos y técnicas de impresión). Midiendo el eje mayor y el eje menor de dichas elipses se puede calcular la deformación principal mayor y menor en distintos puntos de la geometría conformada. En la Fig. 7 se muestran parejas de valores (ϵ_1, ϵ_2) típicas en procesos SPIF para troncos de cono (ϵ) y para troncos de pirámide (ϵ). Los puntos rellenos corresponden a deformaciones medidas en grietas, generadas tanto en troncos de cono (ϵ) como en troncos de pirámide (ϵ).

Los diagramas FLD son muy útiles en el sector de la automoción, ya que el software de simulación de procesos de estampación de chapa metálica los utiliza para identificar puntos o zonas de posible rotura o de estricción no deseada, durante la fase de diseño de matrices. Más información referente a los diagramas límite de conformado en proceso SPIF puede obtenerse de la referencia [19].

3. ADAPTACIÓN DE MÁQUINA EXISTENTE. ENSAYOS PRELIMINARES

La máquina elegida para intentar reproducir el proceso SPIF fue un centro de mecanizado con control numérico, marca ALECOP, modelo ODISEA (Fig. 8). El control numérico de la máquina es un FAGOR 8050M. Lo primero que se hizo fue comprobar las dimensiones del campo de trabajo (200 mm. x 200 mm. x 200 mm) ya que, como se ha comentado en el epígrafe anterior, ese campo de trabajo nos da las dimensiones máximas de la pieza a fabricar en la máquina.

A continuación, se tomaron medidas de la mesa de trabajo de la máquina, y se diseñó y construyó un bastidor de fijación, que tiene la función principal de mantener firmemente sujeta la chapa, a una altura de 80 mm sobre la mesa de trabajo. El bastidor está formado por los siguientes elementos: base, placa soporte y marco fijador (Fig. 9). La base está constituida por cuatro perfiles UPN80, soldados firmemente unos a otros. La placa soporte es un chapón de 10 mm de espesor, en el que se practicó un hueco circular de 140 mm. de diámetro (Fig. 10). El marco fijador está formado por cuatro pletinas de sección 50 mm. x 8 mm.

A parte del bastidor de fijación, hubo que fabricar un punzón, con la punta esférica. El material elegido fue una aleación de aluminio UNS A96063, y el diámetro final seleccionado para el punzón, 10 mm. La herramienta se conformó mediante mecanizado en un torno de CN, a partir de un tocho de 20 mm diámetro. Esta herramienta se montó sobre una pinza, que se colocó en el porta pinzas correspondiente.

El siguiente paso fue probar la máquina. Antes de comenzar la fabricación del reflector, se decidió realizar algunos ensayos con un tronco de cono, geometría más sencilla de generar y aparentemente más fácil de conformar. Estos ensayos previos servirían también para caracterizar el material a utilizar, unas planchas de PVC de 3 mm. de espesor, que según la bibliografía [9] tienen un ángulo máximo de 68° , para punzones de 10 mm de diámetro. Como se ha comentado en el epígrafe anterior, es importante conocer el ángulo máximo de deformación de la chapa utilizada, que depende del material y del espesor de la misma, ya que a partir de él, se podrá decidir qué geometrías se pueden reproducir y cuáles no.

El tronco de cono que se pretendía fabricar tenía un diámetro de 140 mm. en la base y una altura de 70 mm. Dado

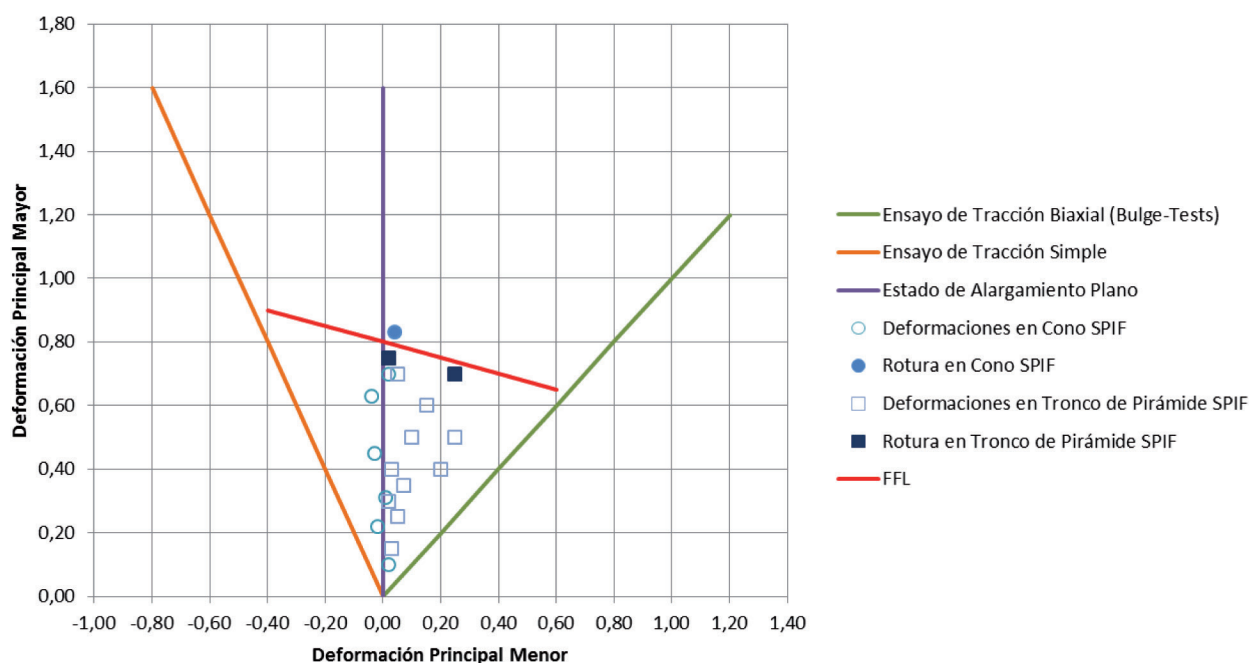


Fig. 7: Ejemplo de FLD para chapa de PVC de 3 mm de espesor (elaborado a partir de [8] y de [10])

que la geometría de un tronco de cono es sencilla, se elaboró un programa mediante una hoja de cálculo (OpenCalc), que permitía calcular los puntos de inicio y fin de las interpolaciones circulares, así como los cambios en la coordenada Z. Mediante esa hoja de cálculo se generaba un fichero “txt” que es el que se manda al CN, como paso previo a la fabricación.

Se realizaron varias pruebas, con distintos ángulos (Fig.11), hasta que se dio por bueno un ángulo máximo de 60°. Este valor es algo inferior al extraído de la bibliografía, pero es el que se toma como referencia para siguientes ensayos. En todas las pruebas se utilizaron incrementos de Z de 0,5 mm, una velocidad de avance de 1500 mm/min y refrigeración. En relación a este último punto, hay que indicar que se usó en todos los ensayos una solución de agua jabonosa, cuya principal función era evitar que el aumento de temperatura debido a la fricción entre la superficie de la chapa y la herramienta afectara a la estabilidad del proceso de deformación.



Fig. 8: Centro de mecanizado adaptado para realizar el proceso SPIF

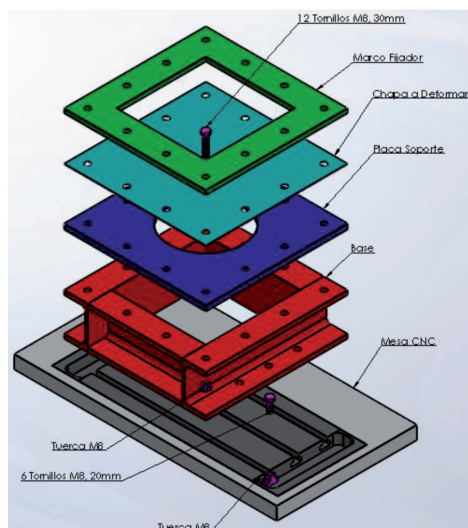


Fig. 9: Conjunto explosionado del bastidor de fijación, diseñado y fabricado para realizar los ensayos



Fig. 10: Fabricación, mediante mandrinado, de hueco circular en placa soporte



Fig. 11: Comprobación del ángulo máximo del material: a) 65°; b) 61°; c) 60°.

4. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA A LA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

En primer lugar, se modeló la geometría del reflector en un programa de diseño CAD. Las dimensiones fueron tomadas de un reflector real (Fig. 12). En el epígrafe anterior se indicó el ángulo máximo de deformación del material, y cómo se halló su valor experimentalmente (60°). En el modelo CAD generado, se midió el mayor ángulo, y se comprobó que su valor era 75°, superior al ángulo máximo que admite el material. Esto significa que, a priori, no sería posible fabricar el prototipo con esta chapa de PVC de 3 mm de espesor.

Una solución al problema anterior es el uso de una estrategia multietapa [20-21], que consiste en alcanzar la geometría final requerida, no de manera directa, en una única fase, sino pasando primero por distintas geometrías o etapas intermedias (Fig.13). En cada etapa, se incrementa el ángulo que forma la geometría con la horizontal, de tal modo que se consigue obtener ángulos finales superiores al ángulo máximo de deformación.

La primera estrategia multietapa que se probó constaba de dos etapas: un tronco de cono de 30° más un tronco de cono de 65°. La pieza falló a los 30mm de profundidad de la segunda etapa (Fig. 14). La combinación de deformaciones principales en ciertos puntos de la pieza superó los valores límites comentados en el epígrafe 2.5.

La segunda estrategia que se probó, dado el fallo de la primera, constaba de 6 etapas (Fig. 15). La primera etapa es un tronco de cono de 30° y la segunda un tronco de cono de 45°. A partir de esta etapa los ángulos varían a lo largo del

proceso. En la tercera etapa se mantuvo un tronco de cono de 60° hasta una profundidad de 20mm, a partir de este punto el ángulo disminuía progresivamente hasta los 20° . En la cuarta etapa se mantuvo los 60° los primeros 10mm, luego se aumentó a 65° hasta una profundidad de 30mm y a partir de este punto el ángulo disminuía progresivamente hasta los 20° . En la quinta y sexta etapa se siguió el mismo patrón, alcanzando unos ángulos de 70° y 75° , respectivamente. La generación del código ISO se realizó de nuevo en una hoja de cálculo (OpenCalc), ya que para geometrías no demasiado complejas los autores consideran que es más rápido, sencillo y eficiente el uso de este software libre, disponible por otra parte de forma gratuita y abierta para cualquier usuario. Para geometrías complejas, si bien es cierto que no existe una implementación específica de este proceso en ningún software de manufactura asistida por computador (CAM), se puede utilizar el módulo de mecanizado de cualquier paquete CAM comercial.



Fig. 12: Reflector real elegido como modelo

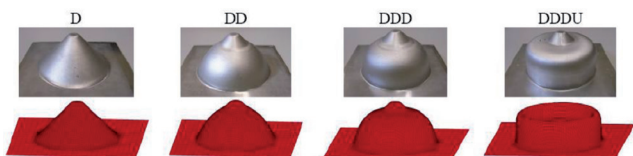


Fig. 13: Ejemplo de estrategia multietapa [20]

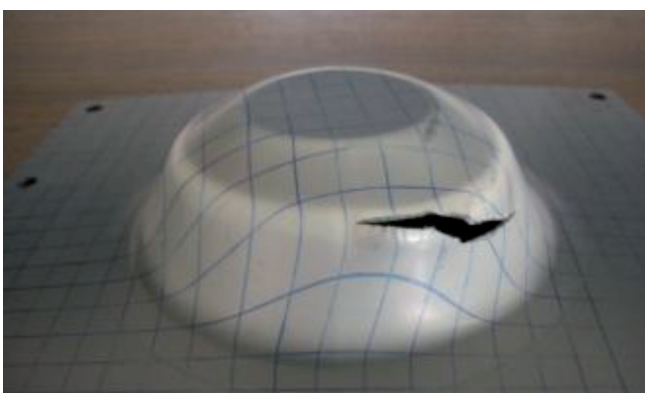


Fig. 14: Intento de fabricación del prototipo mediante una estrategia multietapa de dos pasos: tronco de cono 30° + tronco de cono 65°

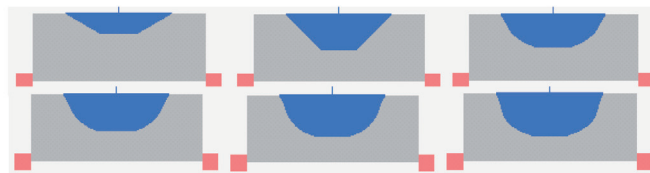


Fig. 15: Simulación de fabricación del prototipo mediante una estrategia multietapa de 6 pasos

A continuación, se montó en la fresadora de CN el bastidor mostrado en la Fig. 9, con una chapa soporte con un hueco circular en el centro, de diámetro igual al máximo diámetro del reflector que se pretende fabricar. El material elegido para la operación es una chapa de PVC de 3 mm, material polimérico sobre el que se han publicado varios trabajos recientes [7-10, 22]. En la parte inferior de la chapa se rotula una retícula de 10 x 10 mm que se utilizará para controlar cualitativamente qué partes de la chapa sufren mayor deformación.

El programa elaborado se comprobó en el software Win-Unisoft, desde el cual se envía el programa a la memoria del centro de mecanizado. Una vez hecho el “cero máquina” y el “cero pieza”, se dio comienzo al proceso de fabricación. Se hizo uso de refrigeración, por los motivos expuestos en la sección 3 (Fig. 16).

El resultado final del proceso se muestra en la Fig. 17. En la figura también se aprecia cómo se ha deformado la rejilla durante el proceso de deformación incremental.



Fig. 16: Vista general del proceso SPIF. Refrigeración del proceso

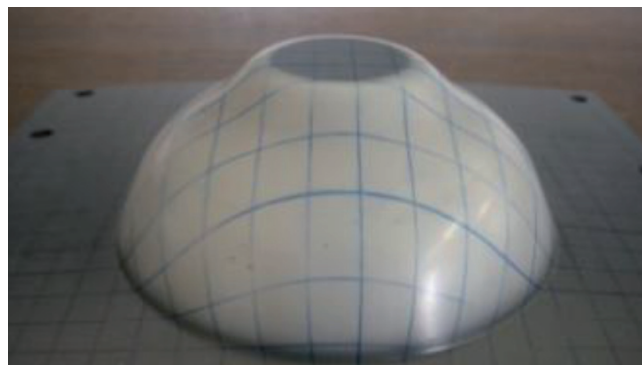


Fig. 17: Reflector fabricado mediante proceso SPIF, sobre una chapa de PVC

5. MEDICIONES REALIZADAS SOBRE EL PROTOTIPO PARA EVALUAR LA VIABILIDAD DEL PROCESO

Una vez realizado el prototipo, se realizaron varias mediciones para evaluar la precisión del proceso, a nivel dimensional:

- Medición de la geometría inicial y final, mediante máquina de medición de coordenadas, y comparación entre ambas geometrías, al objeto de obtener la desviación máxima entre ambas.
- Medición del espesor del prototipo y comparación con espesor teórico predicho por la “Regla del Seno”.

No se realizaron pruebas mecánicas sobre el prototipo ya que dicho prototipo estaba inicialmente destinado a fines meramente dimensionales.

5.1. MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA FINAL Y COMPARACIÓN CON LA INICIAL

El centro de mecanizado adaptado para el proceso SPIF también puede ser utilizado como máquina de medición de coordenadas. Para ello, es necesario colocar un comparador mecánico con palpador de punta esférica en el cabezal de la máquina. El proceso seguido fue el mismo tanto para el faro original como para el prototipo. La pieza se amarró firmemente a la mesa y se estableció un cero pieza en el punto más adecuado. A partir de dicho cero, se midió un conjunto de puntos situados sobre la superficie interior (x_p , y_p , z_p).

Los puntos así obtenidos fueron importados desde un programa CAD, y mediante técnicas gráficas de interpolación, se obtuvo un modelo de la superficie que contiene a todos los puntos del conjunto. Las dos superficies generadas se comparan usando también un software CAD, obteniéndose una desviación máxima de 2,86 mm (ver Fig. 18). Estos valores son del orden de los presentados por otros autores de la bibliografía [9].

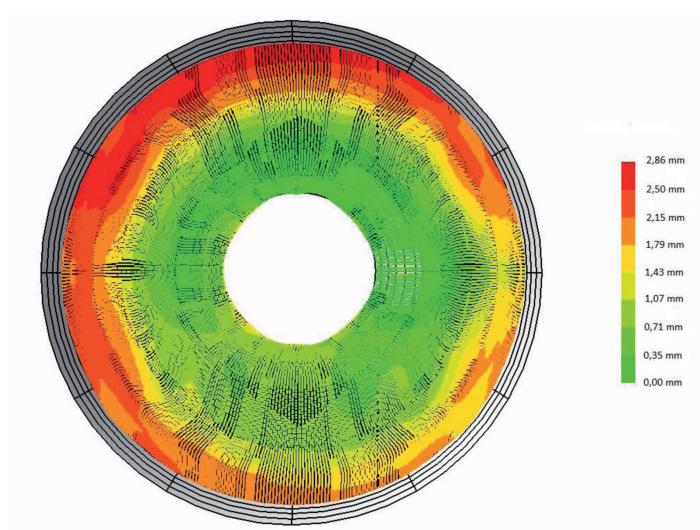


Fig. 18: Diferencias medidas entre geometría original y la geometría fabricada por SPIF

5.2. MEDICIÓN DEL ESPESOR Y COMPARACIÓN CON ESPESOR TEÓRICO

El espesor final teórico de la pared del prototipo fabricado mediante SPIF se puede calcular mediante la conocida como “ley del seno”, a partir del espesor inicial y del ángulo de deformación:

$$t_f = t_i \cdot \sin \alpha$$

Esta expresión fue introducida en las primeras publicaciones realizadas sobre el proceso SPIF. Como se puede observar, proporciona un valor constante del adelgazamiento en geometrías con ángulo de deformación no variable. Trabajos más recientes han demostrado que el adelgazamiento no puede considerarse constante, aunque la “ley del seno” se sigue empleando como primera aproximación.

Para medir el espesor, se cortó en dos el prototipo y se midió mediante calibre en puntos equidistantes de la superficie. En la figura 19 se presenta la gráfica comparativa entre los valores reales del espesor y los predichos por la “ley del seno”.

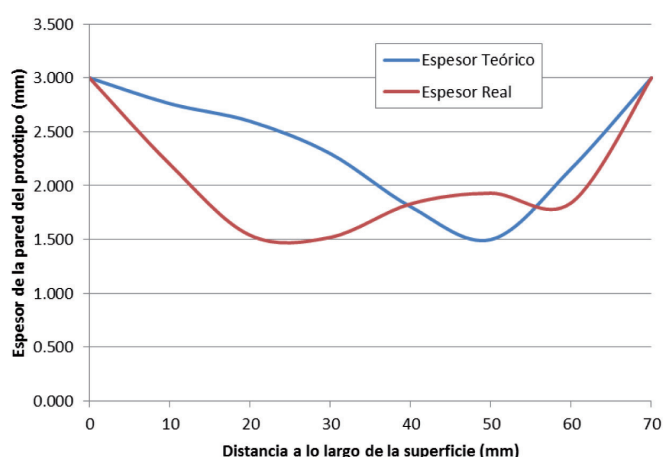


Fig. 19: Comparativa entre espesor real medido y el teórico predicho por la “ley del seno”

6. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

En este trabajo se analiza la viabilidad de utilizar la técnica SPIF en la generación de prototipos en PVC de ciertos componentes para la industria automovilística, concretamente la industria de la iluminación. No se han encontrado publicaciones anteriores que presenten aplicaciones prácticas reales del SPIF sobre polímeros por lo que, a juicio de los autores, esta es la principal de sus aportaciones.

Como se ha mostrado (Sección 2), los fundamentos de la técnica conocidos para chapas metálicas se pueden extender a materiales poliméricos. Basta controlar los siguientes parámetros: material-espesor de la chapa, ángulo máximo de deformación, material-diámetro de la herramienta, y velocidad de giro y avance. Los diagramas FLD y las curvas FFL permiten conocer *a priori* las deformaciones máximas que admite el material y son imprescindibles para la realización

de la simulación del proceso mediante software basado en FEM.

El método general necesario para la elaboración de cualquier prototipo mediante deformación incremental se basa en (Sección 3):

- Diseño y fabricación de utillaje: punzón y bastidor de fijación (Figs. 5 y 9).
- Caracterización de la chapa polimérica. Se realizaron distintas pruebas (Fig.11), para comprobar la viabilidad del proceso y determinar el ángulo máximo de deformación del material empleado (PVC).
- Preparación del programa ISO para las trayectorias de deformación incremental (mediante hoja de cálculo).

En la sección 4 se muestra el proceso de fabricación de un componente concreto. El componente elegido ha sido un sencillo reflector de óptica de faro, dada la importancia de la industria de la iluminación del automóvil en esta zona geográfica. Este aparentemente sencillo elemento ha obligado a emplear una estrategia multietapa, ya que ciertos puntos de su geometría sobrepasaban el valor del ángulo máximo del material.

En la sección 5 se presentan sendas comprobaciones realizadas sobre el prototipo, con objeto de establecer la idoneidad del proceso desde el punto de vista dimensional. La primera de estas comprobaciones (sección 5.1) ha consistido en obtener, mediante un sistema de medición de coordenadas, una nube de puntos de la superficie interior del prototipo y en comparar la superficie de interpolación de dicha nube de puntos medidos con la superficie del modelo original. Los resultados de la comparación (Fig. 18) indican que se obtiene una desviación aceptable (por debajo de 1,50mm) en los dos tercios centrales del reflector, si bien las diferencias entre ambas superficies aumentan en el anillo exterior del reflector. Estas diferencias se podrían deber a un fenómeno de “springback” de la chapa tras el proceso de deformación.

La segunda comprobación realizada (sección 5.2) ha consistido en evaluar la variación del espesor a lo largo de una sección transversal del prototipo. Se ha medido el valor real del espesor en varios puntos y se ha comparado con el predicho por la “ley del seno” (Fig. 19). El valor mínimo de ambas curvas, teórica y real, coincide y tiene un valor de 1,50 mm (justo la mitad del espesor inicial). Sin embargo, se aprecia cierto desfase entre ambas curvas.

A la vista de estos resultados se puede concluir que, con muy baja inversión, la industria de la iluminación del automóvil puede encontrar en el SPIF una vía alternativa de fabricación de prototipos de ciertos componentes (como reflectores) en materiales poliméricos como el PVC. Las comprobaciones dimensionales realizadas indican que, si bien el espesor de la pared de los prototipos así fabricados sufre variaciones debidas al proceso que llegan hasta la mitad del espesor inicial de la chapa utilizada, las diferencias dimensionales son menores a 1,50 mm en los dos tercios centrales del prototipo y salvo en algunas zonas puntuales de la periferia, menores a los 2,86 mm.

Posibles futuros desarrollos pasarían por:

- Estrechar las citadas tolerancias dimensionales.
- Medir fuerzas y consumos energéticos durante el proceso SPIF que permitan compararlo con otros procesos de generación de prototipos.
- Medir deformaciones en tiempo real durante el proceso SPIF, mediante el uso de alguna técnica óptica y obligar al control del centro de mecanizado a modificar ciertos parámetros del proceso, por ejemplo, cuando se detecten valores de las deformaciones cercanos a la FFL.
- Realizar simulaciones del proceso SPIF de fabricación del prototipo, usando software adecuado y utilizando los FLD que proporciona la bibliografía y comprobar experimentalmente que los resultados de las simulaciones y los resultados experimentales coinciden.
- Realizar pruebas mecánicas sobre prototipos generados por SPIF y generados por otras vías más convencionales, a efectos de comparar los resultados, por si pudiera resultar interesante generar prototipos plenamente funcionales mediante SPIF.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a D. Agustín Busquets Muñoz, técnico de laboratorio, su ayuda en la fabricación de los elementos que componen el bastidor de fijación. La realización de los ensayos ha sido posible gracias a la financiación aportada por el Proyecto de Investigación del Plan Propio de la Universidad de Jaén UJA2011/13/16.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gibson I, Rosen DW, Stucker B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. 1st edition. New-York: Springer, 2010. 459 p. ISBN: 978-1-4419-1119-3. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- [2] Pham DT, Gault RS. “A comparison of rapid prototyping technologies”. International Journal of Machine Tools & Manufacture. October 1998. Vol. 38 (10-11). p.1257-1287. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)
- [3] Matsubara M, Tanaka S, Nakamura T. “Development of incremental sheet metal forming system using elastic tools”. JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing. 1996. Vol. 39-1. p.156-163.
- [4] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, et al. “Asymmetric single point incremental forming of sheet metal”. CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2005. Vol 54-2. p.88-114.

- [5] Jeswiet J, Hagan E. "Rapid prototyping of a headlight with sheet metal". Technical Paper – Society of Manufacturing Engineers. 2002. Issue MR02-205. p.1-6.
- [6] Tanaka S, Nakamura T, Hayakawa K, et al. "Incremental sheet metal forming process for pure titanium denture plate". Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity – ICTP 135-136. 2005. Verona, Italy.
- [7] Le VS, Ghiotti A, Lucchetta G. "Preliminary Studies on single point incremental forming for thermoplastic materials". International Journal of Material Forming. July 2008. Vol. 1-1. p.1179-1182. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-008-0191-0>
- [8] Martins PAF, Kwiatkowski L, Franzen V et al. "Single point incremental forming of polymers". CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58-1. p. 229-232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.095>
- [9] Franzen V, Kwiatkowski L, Martins PAF et al. "Single point incremental forming of PVC". Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. p.462-469. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.013>
- [10] Marques TA, Silva MB, Martins PAF. "On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts". International Journal of Advanced Manufacturing Technology. April 2012. Vol. 60 (1-4). p.75-86. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3585-y>
- [11] Bambach M, Hirt G, Junk S. "Modelling and experimental evaluation of the incremental CNC sheet metal forming process". VII International Conference on Computational Plasticity, COMPLAS, 2003. Barcelona 7-10 April 2003.
- [12] Petek A, Kuzman K, Kopac J. "Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming". Archives of Materials Science and Engineering. February 2009. Vol.35-2. p.107-116.
- [13] Jackson K, Allwood J. "The mechanics of incremental sheet forming". Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209-3. p.1158-1174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025>
- [14] Jeswiet J, Hagan E, Szekeres A. "Forming parameters for incremental forming of aluminium alloy sheet metal". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2002. Vol. 216-10. p.1367-1371. 06. Vol. 55-1. p. 241-244. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60407-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60407-7)
- [15] Ham M, Jeswiet J. "Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003". Annals of the CIRP. 2006. Vol. 55-1. p. 241-244.
- [16] Durante M, Formisano A, Langella A. "Comparison between analytical and experimental roughness values of components created by incremental forming". Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. p.1934-1941. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.006>
- [17] Silva MB, Nielsen PS, Bay N, Martins PAF. "Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals". International Journal of Advanced Manufacture Technology. 2011. Vol. 56. p. 893-903. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3254-1>
- [18] Jeswiet J, Duflou J, Szekeres A et al. "Custom manufacture of a solar cooker, a case study". Journal Advanced Materials Research. May 2005. Vol. 6-8. p. 487-492. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.487>
- [19] Silva MB, Skjoedt M, Atkins AG et al. "Single-point incremental forming and formability-failure diagrams". Journal of Strain Analysis for Engineering Design. January 2008. Vol 43-1. pp. 15-35. <http://dx.doi.org/10.1243/03093247JSA340>
- [20] Skjoedt M, Silva MB, Martins PAF et al. "Strategies and limits in multi-stage single-point incremental forming". Journal of Strain Analysis for Engineering Design. January 2010. Vol. 45-1. p. 33-44. <http://dx.doi.org/10.1243/03093247JSA574>
- [21] Douflou JR, Verbert J, Belkassam B et al. "Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths". CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. Vol. 57. p. 253-256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.030>
- [22] Silva MB, Alves LM, Martins PAF. "Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation". European Journal of Mechanics, A/Solids. 2010. Vol. 29-4. p. 557-566. <http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechsol.2010.03.008>