

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica

Análisis experimental y numérico de deformaciones límite en lámina polimérica deformada mediante conformado incremental mono-punto

Autor: Jaime Domínguez Salas

Tutor: Gabriel Centeno Báez

**Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeronáutica (Plan 2002)

Análisis experimental y numérico de deformaciones límite en lámina polimérica deformada mediante conformado incremental mono-punto

Autor:

Jaime Domínguez Salas

Tutor:

Gabriel Centeno Báez

Profesor Contratado Doctor

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Carrera: Análisis experimental y numérico de deformaciones límite en lámina polimérica deformada mediante conformado incremental mono-punto

Autor: Jaime Domínguez Salas

Tutor: Gabriel Centeno Báez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, el profesor Dr. Gabriel Centeno Báez, su disposición, su ayuda y el trato amigable brindado durante la realización de este proyecto fin de carrera. Por facilitarme todo lo necesario para realizar el proyecto. A la investigadora Isabel Bagudanch Frigolé y a la profesora Dra. María Luisa García-Romeu de Luna por compartir la información de sus investigaciones y aportar sus conocimientos a este proyecto.

Por otro lado, me gustaría dar el agradecimiento al profesor Dr. Carpóforo Vallellano Martín, al profesor Dr. Andrés Jesús Martínez Donaire y al investigador Marcos Borrego que me han ofrecido su útil ayuda desinteresada en tantos momentos con las aplicaciones Deform-3D y ARGUS, así como con su amplio conocimiento en conformado convencional y SPIF.

En tercer lugar, a mi familia que me ha apoyado durante todos estos años incondicionalmente y que siempre está ahí para empujarme hacia adelante.

A mis amigos y compañeros de carrera, que tantos buenos momentos hemos vivido y de los que algunos ya se han convertido en hermanos.

Jaime Domínguez Salas

Sevilla, 2017

Resumen

En el presente estudio se ha realizado el análisis de las deformaciones generadas en un proceso de conformado incremental mono-punto, denominado por sus siglas en inglés como SPIF, en diferentes probetas con una misma geometría piramidal truncada. El estudio ha sido realizado para los materiales policarbonato, policloruro de vinilo y policaprolactona con dos condiciones de ensayo en cada material: con giro de herramienta a 2000 rpm y sin giro de herramienta.

El análisis ha consistido en la medición de las deformaciones generadas en las distintas probetas mediante técnicas de fotogrametría empleando el software ARGUS y técnicas de fractografía con microscopio con el fin de generar los diagramas límites de conformado de las distintas probetas.

Por otro lado, se ha realizado una aproximación a la simulación mediante elementos finitos del proceso SPIF de la probeta de policarbonato en condiciones de ensayo sin giro de herramienta con el fin de analizar los problemas y decisiones que se presentan en el proceso de modelado y simulación de un proceso de conformado SPIF en el software DEFORM 3D.

Abstract

In this study has been performed the analysis of the deformations generated in a single - point incremental forming process, aka SPIF, for different specimens with the same truncated pyramidal geometry. The study was made for polycarbonate, polyvinyl chloride and polyrapolactone materials with two test conditions in each material: with tool rotation at 2000 rpm and without tool rotation.

The analysis consisted of the measurement of the specimens using photogrammetry techniques, supported by ARGUS software, and fractography techniques using a microscopy to generate the forming limit diagrams of the different specimens.

On the other hand, an approximation by finite element method simulation of the SPIF process in the polycarbonate specimen was carried out under the test condition “no tool rotation” in order to analyze the problems and decisions that arise in the modeling and simulation process of the single point incremental forming process supported by DEFORM 3D software.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
1.1 <i>Antecedentes</i>	3
1.2 <i>Diagramas límite de conformado</i>	3
1.3 <i>Procesos de conformado incremental</i>	6
1.4 <i>Conformado incremental mono punto</i>	7
1.4.1 Componentes básicos	7
1.4.2 Ventajas y desventajas	8
1.4.3 La herramienta de conformado	8
1.4.4 El utillaje	9
1.4.5 Equipos para conformado incremental	10
1.4.6 Conformabilidad en SPIF	12
1.5 <i>SPIF en polímeros</i>	16
1.5.1 Aplicaciones biomédicas de piezas fabricadas por SPIF	17
1.6 <i>Medición de deformaciones</i>	19
1.6.1 Método del patrón de círculo	19
1.6.2 Sistema ARGUS®	20
1.7 <i>Objetivos del proyecto</i>	24
2 Desarrollo experimental	25
2.1 <i>Metodología</i>	26
2.2 <i>Geometría de la probeta</i>	26
2.3 <i>Parámetros de ensayo.</i>	26
2.4 <i>Captura de imágenes.</i>	28
2.5 <i>Procesamiento de imágenes mediante ARGUS</i>	30
2.6 <i>Generación de FLDs</i>	32
2.7 <i>Determinación de deformaciones en fractura.</i>	34
2.8 <i>Curvas de fractura.</i>	36
2.9 <i>Análisis de estados de deformación mediante secciones.</i>	37
3 Análisis de los resultados	39
3.1 <i>Análisis de resultados en FLDs</i>	40
3.1.1 Ensayos SPIF cuyo fallo genera fractura	43
3.1.2 Ensayos SPIF cuyo fallo no genera fractura	51
4 Aproximación a la simulación MEF de un proceso SPIF	53
4.1 <i>Introducción a la simulación de un proceso de conformado de conformado en DEFORM 3D</i>	54
4.2 <i>Geometría del problema</i>	55

4.3	<i>Parámetros de la simulación</i>	56
4.4	<i>Movimiento de la herramienta</i>	57
4.5	<i>Ley de comportamiento</i>	58
4.6	<i>Mallado MEF</i>	64
4.7	<i>Condiciones de contorno del problema.</i>	68
4.8	<i>Problemática asociada a un proceso de simulación</i>	69
4.8.1	Posicionado de elementos en la simulación	69
4.8.2	Mallado de la lámina	70
4.8.3	Ley de comportamiento del material	71
4.8.4	Time step de simulación	72
4.9	<i>Posibles vías de trabajo para simular procesos de conformado incremental</i>	73
5	Conclusiones y desarrollos futuros	75
5.1	<i>Conclusiones</i>	75
5.2	<i>Desarrollos futuros</i>	76
6	Bibliografía	77

Índice de Tablas

Tabla 1 Parámetros de ensayo	27
Tabla 2 Resultados de ensayos	40
Tabla 3 Características de los materiales ensayados	40
Tabla 4 Deformaciones principales obtenidas (fractografías y FLD Argus)	41

Índice de Figuras

Figura 1. Diferentes estados de las deformaciones principales	4
Figura 2. Curva representativa de los diferentes mecanismos de fallo.	4
Figura 3. FLD para materiales muy dúctiles y poco dúctiles.	5
Figura 4. Configuraciones del conformado incremental: a) mono-punto, b) mono-punto con matriz completa y c) doble punto	6
Figura 5. Configuración de un proceso de SPIF	7
Figura 6. Trayectoria seguida por el punzón durante el proceso de conformado incremental	8
Figura 7. Herramienta de conformado incremental	9
Figura 8. Utillaje de sujeción de la lámina	10
Figura 9. Máquina CNC de grandes dimensiones y carga	10
Figura 10. Máquina diseñada para procesos SPIF	11
Figura 11. Brazo robótico para procesos SPIF	11
Figura 12. Plataforma Stewart	12
Figura 13. Formas cónicas para ensayos en SPIF	12
Figura 14. Puntos de fractura según paso en profundidad (Micari, 2004)	13
Figura 15 Influencia del espesor de la lámina en el ángulo de pared.	13
Figura 16 Conformabilidad hasta fractura en SPIF vs Stretch-Bending usando diámetro de herramienta de a) 20mm y b) 10mm (Centeno <i>et al.</i> , 2014)	14
Figura 17 Estabilidad del proceso de deformación para SPIF y conformado convencional	16
Figura 18 Prótesis de PC fabricada mediante SPIF, Centeno et al. [2015]	17
Figura 19 Proceso de desarrollo de una prótesis mediante SPIF (Centeno et al., 2015)	18
Figura 20 Generación de trayectorias en CATIA v5 (Centeno et al., 2017)	18
Figura 21. Patrón de círculos antes y después de la deformación	19
Figura 22 Principios de la fotogrametría: Principio de colinealidad (Izq.) y de triangulación (Der.)	20
Figura 23 Patrones de puntos estandarizados	21
Figura 24 Lámina de aluminio con patrón en estados inicial y deformado.	21
Figura 25 Puntos codificados de referencia espacial	22
Figura 26 Patrón de puntos antes y después de la deformación.	22
Figura 27 Modo de visualización	23
Figura 28 Visualización de resultados	23

Figura 29 Setup de ensayo SPIF	27
Figura 30 Identificación inicial de probetas	29
Figura 31 Orientación de las series de capturas de imágenes.	29
Figura 32 Posición de la probeta con respecto a los coded points	30
Figura 33 Dos tomas distintas de una misma probeta. (Flecha señala a la cara equivalente en ambas fotos)	31
Figura 34 Resultado de deformaciones principales máximas a lo largo de la geometría de la probeta de PC sin rotación de herramienta.	31
Figura 35 Evolución de las deformaciones principales máxima y mínima en la sección que pasa por la zona de deformación biaxial para el PC 2000 rpm	32
Figura 36 FLD generado por ARGUS con evolución de las deformaciones en las tres secciones realizadas en la probeta.	33
Figura 37 FLD de PC 2000 rpm creado a partir de los datos de ARGUS	33
Figura 38 Aproximación de deformaciones principales mínimas para los puntos de fractura.	35
Figura 39 Fractografías de la probeta de PC sin giro de herramienta para la zona de deformación plana	35
Figura 40 Fractografías de la probeta de PCL 2000 rpm para la zona de deformación biaxial	36
Figura 41 FLD de PC 2000 rpm con los datos de fractura (puntos y recta de ajuste)	36
Figura 42 Evolución de deformaciones principal máxima y mínima en la sección de deformación biaxial para el PC 2000 rpm	37
Figura 43 Evolución de deformaciones principal máxima y mínima en la sección de deformación plana para el PC 2000 rpm	38
Figura 44 Ensayo de tracción para PVC: (a) Página anterior, bajo diferentes velocidades de deformación y temperatura constante en ambiente; (b) Arriba, a 50 mm/min y varias temperaturas ambiente y (c) Abajo, a 500 mm/min y varias temperaturas ambiente	42
Figura 45 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PC sin giro de herramienta	43
Figura 46 Fractografías del ensayo SPIF de la probeta de PC sin giro de herramienta: deformación plana (arriba) y deformación biaxial (abajo)	43
Figura 47 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)	44
Figura 48 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PC con giro de herramienta a 2000 rpm	45
Figura 49 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)	46
Figura 50 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PVC sin giro de herramienta	47
Figura 51 Fractografías del ensayo SPIF de la probeta de PVC sin giro de herramienta: deformación plana (arriba) y deformación biaxial (abajo)	47
Figura 52 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)	48
Figura 53 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PCL con giro de herramienta a 2000 rpm	49
Figura 54 Fractografías del ensayo SPIF de la probeta de PCL con giro de herramienta a 2000 rpm: deformación plana (arriba) y deformación biaxial (abajo)	49
Figura 55 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)	50
Figura 56 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PVC con giro de herramienta a 2000 rpm	51
Figura 57 Fallo por twisting de la probeta de PVC con giro de herramienta a 2000 rpm	51

Figura 58 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PCL sin giro de herramienta	52
Figura 59 Fallo por grieta y twisting de la probeta de PLC sin giro de herramienta	52
Figura 60 Setup de la simulación MEF del proceso SPIF para la probeta de PC sin giro de herramienta (1)	55
Figura 61 Setup de la simulación MEF del proceso SPIF para la probeta de PC sin giro de herramienta (2)	56
Figura 62 Datos de la definición del movimiento de la herramienta.	58
Figura 63 Mecanismos de deformación en polímeros	60
Figura 64 Ley de comportamiento de un PC	61
Figura 65 Aproximación de la ley de comportamiento utilizada para modelar el PC en DEFORM 3D	63
Figura 66 Cálculo de la aproximación de la ley de comportamiento para modelar el PC en DEFORM 3D	64
Figura 67 Estimación del tiempo relativo de resolución en DEFORM 3D para la formulación MEF con matrices dispersas	65
Figura 68 Mallado de la probeta mediante diferentes ventanas de mallado en DEFORM 3D	66
Figura 69 Herramienta para crear las distintas ventanas de mallado en DEFORM 3D	66
Figura 70 Herramienta de DEFORM 3D para definir las condiciones de remallado de la probeta	67
Figura 71 Herramienta de definición y visualización de las condiciones de contorno del problema en DEFORM 3D	68
Figura 72 Herramienta para definir las condiciones de contacto entre las piezas en DEFORM 3D	69
Figura 73 Probeta de PC deformada en proceso SPIF. Etapa 80995/127000.	72

1 INTRODUCCIÓN

La industria del conformado está en continua búsqueda y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el ahorro de tiempo y costes asegurando la calidad mínima requerida en el producto.

Las tecnologías tradicionales resultan costosas debido al alto coste de equipos, punzones, y matrices que han de ser fabricados con un perfil muy parecido al de la pieza final, y debido también al tiempo de set-up de las máquinas. Por tanto, estas tecnologías sólo resultan rentables para grandes lotes de producción. Por otro lado, las tecnologías tradicionales permiten alcanzar un alto nivel de automatización renunciando, sin embargo, a la flexibilidad.

En las últimas décadas las industrias tienen que hacer frente a nuevas necesidades como la producción de lotes más pequeños y la constante demanda de procesos más flexibles. Todas estas nuevas necesidades se contraponen a las ofrecidas por las tradicionales tecnologías de fabricación por conformado y han dado lugar a la aparición de las tecnologías que utilizan el conformado incremental (Incremental Sheet Forming, ISF). El conformado incremental es un proceso tecnológico innovador en el que una lámina de metal u otro material, por ejemplo un polímero, es deformada plásticamente gracias a la progresiva acción de un punzón de pequeño tamaño cuyo movimiento es controlado por una máquina de control numérico.

El aumento de la conformabilidad de láminas metálicas por procesos de conformado incremental, particularmente en el conformado incremental mono punto (Single-Point Incremental Forming, SPIF) ha sido experimentalmente observado por muchos autores de la comunidad de conformado en los últimos años como en: Emmens et al. (2009) Jeswiet et al. (2010) o Silva et al (2011) entre otros. En dichos estudios se analizan una serie de mecanismos que afectan a la mecánica de deformación y que tienen influencia en el retraso del fallo en el ISF.

Los mecanismos mencionados, en orden de importancia, son: el efecto beneficioso de los esfuerzos de flexión y corte, las tensiones de contacto, el esfuerzo cíclico y las tensiones hidrostáticas, entre otros. De hecho, el llamado efecto de flexión, se ha señalado recientemente Emmens et al. (2011) como el parámetro dominante en la prevención de formación del cuello en el ISF antes de la fractura en materiales metálicos y que permite llegar a deformaciones muy por encima de la curva límite de conformado (forming limit curve FLC).

En los procesos de conformado de lámina metálica, se pueden esperar dos tipos de fallas: el fallo controlado por la estricción, donde todas las capas llegan a ser plásticamente inestables y el fallo

controlado por la fractura en las capas externas. En el conformado incremental el cambio entre el primero y segundo modo de fallo se presenta al disminuir el radio de la herramienta de conformado. De hecho, algunos estudios recientes permiten concluir que el modo de fallo arriba descrito claramente depende del parámetro t_0/R , la relación entre el espesor inicial de la lámina t_0 y el radio de la herramienta de conformado R , como han señalado Vallellano et al. (2010) y Stoughton et al. (2011) en el estirado con flexión (stretch-bending), y por Silva et al. (2011) en el caso del SPIF. En este sentido, Centeno et al. (2012) sugirieron también la importancia de la cuantificación de la mejora de la capacidad de conformado en ISF, debido al efecto de flexión por medio de esta relación t_0/R .

Al igual que se ha desarrollado todo un campo de estudio en el empleo de procesos SPIF para metales, ha surgido paralelamente otro en el estudio del comportamiento de los materiales poliméricos. Estos estudios demuestran que cabe la posibilidad de usar las técnicas de SPIF para procesos de conformado de láminas de polímeros como el PVC (polivinilo de cloruro), Franzen et al. (2008), con geometrías cónicas de ángulo variable. Asimismo, Le et al. (2008), ha publicado un estudio para la aplicación de SPIF en PP (polipropileno), diseñando experimentos para determinar el efecto del desplazamiento de la herramienta (step down), el tamaño de herramienta (tool size), la velocidad de avance (feed rate) y la velocidad de giro de la herramienta (spindle speed) en láminas de 3 mm de espesor. Observando fallos característicos que se repetían en los distintos materiales y que variaban en función de los parámetros de ensayo.

Así pues el estudio aquí realizado, en línea con muchos de los que se realizan en el campo de la ingeniería de fabricación, trata de mejorar el nivel de comprensión del comportamiento de materiales como el PC, PVC y PCL al deformarse mediante un proceso SPIF. Para ello, se va a realizar un análisis experimental de la conformabilidad en SPIF de láminas de PC, PVC y PCL de 2 mm de espesor, en dos condiciones de ensayo: con y sin giro de la herramienta. La conformabilidad global de cada material se ha estudiado con la técnica de patrón de círculos, utilizando una metodología similar a la utilizada últimamente en Centeno et al. (2012 b) así como con una aproximación al análisis numérico de un proceso de SPIF para la probeta de PC sin rotación de la herramienta.

1.1 Antecedentes

El grupo de investigación de Ingeniería de los Procesos de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sevilla investiga desde hace varios años una nueva línea de investigación que se abrió tras comprobar que los procesos SPIF podrían utilizarse para realizar prototipados de prótesis de materiales biocompatibles como es el caso de algunos polímeros, y en este marco se encuadra el fin último de este proyecto contribuyendo a la caracterización del comportamiento del PC, PVC y del PCL en SPIF.

1.2 Diagramas límite de conformado

La conformabilidad de una lámina es generalmente definida como la habilidad que tiene el material para deformarse hasta la forma deseada sin producirse el fallo de la pieza. Cualquier tipo de material sólo puede deformarse bajo estas condiciones hasta unos valores límites. Los diagramas límites de conformado representan estos límites.

La conformabilidad está relacionada con el estado de deformaciones (Marciniak, 2002). El estado de deformaciones es la combinación de las deformaciones principales (ver figura 1): ε_1 , ε_2 y ε_3 . La suma de éstas se asume igual a cero por la conservación de volumen. Solamente son requeridas dos de ellas para especificar el estado de deformaciones. La relación entre estas dos deformaciones es convencionalmente expresado como:

$$\varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1$$

Algunos valores de β describen situaciones que son de particular interés por ejemplo:

- $\beta = 1$, en este caso $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, la deformación es constante en todas las direcciones; este se refiere al estado equi-biaxial (equi-biaxial).
- $\beta = 0$, en este caso no hay deformación en la segunda dirección principal $\varepsilon_2 = 0$ y es llamado deformación plana (plane-strain).
- $\beta = -0.5$, este es el estado de la prueba de tensión en un material isotrópico y se denomina uniaxial (uniaxial).
- $\beta = -1$, en este caso $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0$ y consecuentemente $\varepsilon_3 = 0$; no hay cambio en el espesor. Este estado se presenta en las bridas de la embutición profunda. Este caso se denomina embutición profunda (deep-draw).

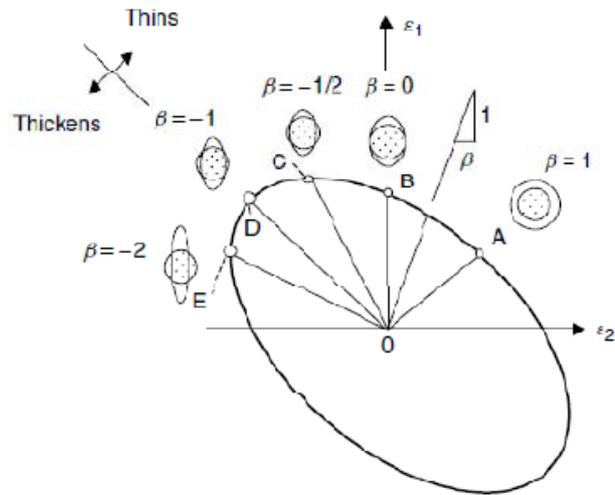


Figura 1. Diferentes estados de las deformaciones principales

Al realizar ensayos en estados diferentes de deformaciones o caminos se hace evidente que el fallo de la lámina ocurre siempre a niveles de deformaciones diferentes, creándose una curva de fallo como la mostrada en la Figura 2. En ella se ve que algunos caminos llegan antes a una curva llamada curva de estricción (Necking). En el fallo por estricción existe un adelgazamiento localizado del espesor de la lámina. Sin embargo, al tomar otros caminos se puede llegar a otra curva llamada de fractura dúctil (Fracture). El que acontezca uno u otro mecanismo de fallo dependerá del material en estudio y del camino de deformaciones al que esté sometido el mismo.

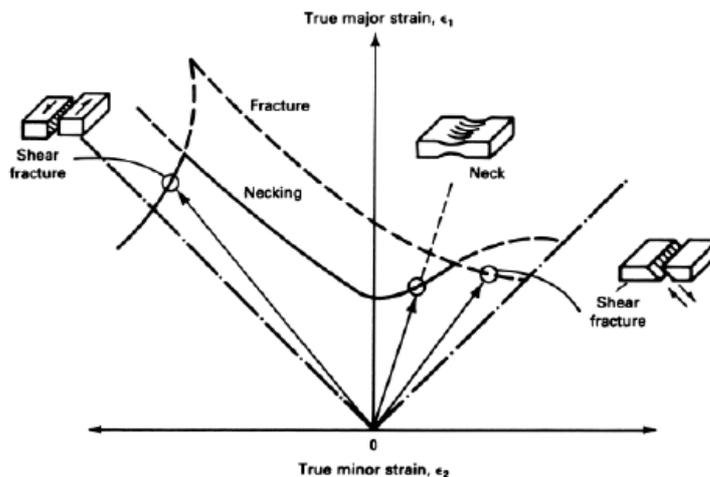


Figura 2. Curva representativa de los diferentes mecanismos de fallo.

El diagrama anterior es lo que se conoce con el nombre de diagramas límites de conformado (Forming limit diagram, FLD), desarrollados por Keeler (1965) y Goodwin (1968). Son herramientas muy útiles para la evaluación de la capacidad de conformado de láminas de un material concreto en la práctica. Se utilizan en todas las fases de la producción de un producto fabricado por conformado, incremental o no, por ejemplo, en la simulación con elementos finitos durante el diseño y para diseñar el proceso de

conformado en sí, en las pruebas con las herramientas conformadoras y en el control de la calidad durante el proceso de producción.

El FLD consiste en una gráfica que representa la deformación principal máxima ϵ_1 frente a la mínima ϵ_2 y que muestra una línea denominada Curva Límite de Conformado (Forming limit curve FLC), la cual divide los estados de deformación entre aquellos que permiten el correcto conformado de la lámina y los que producen el fallo. La FLC proporciona una medida simple de la severidad del conformado. En la práctica convencional se modifica el diseño de la matriz o punzón o el proceso de conformado hasta que las deformaciones en todos los puntos de la lámina estén dentro del margen de seguridad que proporciona la FLC.

Dependiendo del tipo de fallo se puede distinguir el inicio de la estricción localizada (FLC) y el principio de la fractura dúctil (FFL). La Figura 3, muestra la evolución típica de las FLC y FFL que se observan en los experimentos. Como puede apreciarse, la FLC normalmente presenta una curva en forma de V, decreciente en el lado de la izquierda $\beta = d\epsilon_2/d\epsilon_1 < 0$ y creciente en el lado de la derecha $\beta \geq 0$ o región de estirado biaxial). Las tendencias de la FFL dependen otra vez de la ductilidad del material. Así, para materiales con una ductilidad relativamente alta, la FFL tiende a tener una forma lineal, como se ve en al Figura 15(a). En cambio, los materiales con relativa baja ductilidad exhiben una FFL mucho más compleja, Figura 15(b). En estos casos, la FFL también muestra una forma parecida a una curva en V. ligeramente creciente en al región de estirado y acercándose a la FLC las trayectorias de deformación biaxial $\beta = 1$.

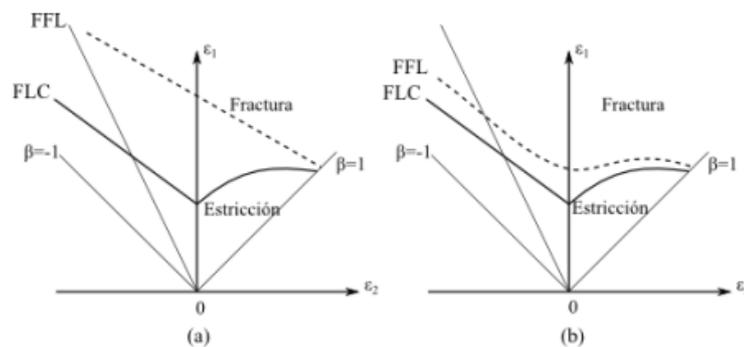


Figura 3. FLD para materiales muy dúctiles y poco dúctiles.

En la actualidad, tanto la evaluación numérica del proceso de conformado de lámina como una estimación numérica del FLD son tareas importantes en la industria de conformado de lámina. Entre otras cosas, estas tareas necesitan la utilización de un criterio adecuado de fallo que tenga en cuenta el material que está conformado y el proceso de conformado que se está utilizando.

1.3 Procesos de conformado incremental

Hoy en día existen nuevos procedimientos de conformado incremental de lámina (Incremental sheet forming ISF) mediante los cuales es posible realizar piezas fabricadas por encargo o para la fabricación de lotes de pequeñas cantidades de producción, con un ciclo muy corto entre el diseño y la fabricación. Schmoeckel (1992) predijo que con el aumento en la automatización de equipos de conformado de metal, se convertirían en procesos más flexibles. Eso ha sucedido en este caso.

La idea de conformar gradualmente una lámina con una sola herramienta de punto, fue patentado por Leszak (1967) aún antes que fuera técnicamente factible. Hoy en día, existen nuevos procesos en los que la lámina se deforma plásticamente en un punto local, permitiendo que la producción de piezas de lámina complejas sea verdaderamente flexible.

La inspiración para los nuevos procesos de conformado se encuentra generalmente en métodos de conformado tradicionales. Estos procesos convencionales están típicamente limitados en lo que se refiere a geometría alcanzable para la pieza y requieren herramientas específicas y matrices ad-hoc. Tanto el hardware como el software de CNC han alcanzado un estado de madurez que permiten el desarrollo de nuevos procesos de conformado de lámina. Los nuevos métodos de conformado dan la posibilidad de crear instalaciones de conformado flexibles, sin matrices, capaces de producir superficies de formas complejas, con la aplicación de herramientas genéricas. El objetivo final es “dar forma sin matriz”.

Se han explorado muchas variaciones de conformado incremental, incluyendo el uso de un chorro de agua, rodillos o herramientas de martilleo con vibración, pero aún así la herramienta más ampliamente utilizada es un indentador sólido semiesférico. Las dos configuraciones más comunes son: Single-Point Incremental Forming (SPIF) y Two-Point Incremental Forming (TPIF), ver Figura 4. En el SPIF una lámina sujeta alrededor de sus bordes es conformada con una sola herramienta, mientras que en TPIF se requiere de una matriz parcial o total o una segunda herramienta móvil que siga la trayectoria de la herramienta principal. En ambos casos las trayectorias de las herramientas más comunes son contornos o espirales de aumento de la profundidad, siguiendo el perfil del producto.

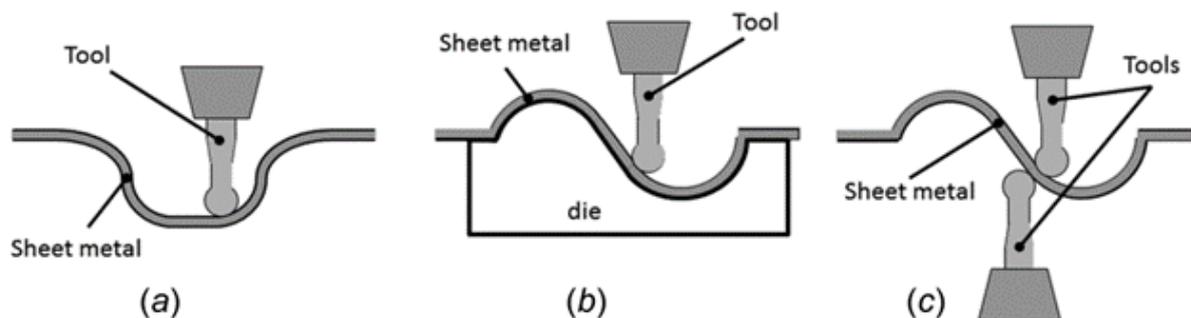


Figura 4. Configuraciones del conformado incremental: a) mono-punto, b) mono-punto con matriz completa y c) doble punto

A pesar de una extensa investigación en el ISF en la última década, el mecanismo de deformación no se conoce con la suficiente precisión. La comprensión del mecanismo de deformación es importante para permitir desarrollar modelos numéricos precisos del proceso en el control de la trayectoria y diseño de la herramienta, así como para una comprensión de los elevados límites de deformación observados en ISF en comparación con el estampado tradicional.

1.4 Conformado incremental mono punto

1.4.1 Componentes básicos

La figura 5 y la figura 6 representan los componentes básicos del proceso. La trayectoria de la herramienta se genera en un centro de mecanizado CNC y es utilizado para deformar progresivamente la mono-punto. Durante el proceso no hay ninguna matriz de apoyo que soporte la superficie posterior de la lámina.

Una característica del SPIF es cómo la herramienta se desplaza mientras deforma la lámina. Existen dos casos: (1) el husillo que contiene la herramienta se va desplazando sin rotación y (2) el husillo gira y se desplaza sobre la superficie de la lámina. El control de esta variable controla el calentamiento de la lámina durante la deformación. La herramienta tiene una forma semiesférica, que es presionada contra el material a fin de causar la deformación. La fuente más obvia de calentamiento es la fricción. A medida que la herramienta se desplaza sobre la superficie de la pieza de trabajo también esta gira con un determinado número de revoluciones por minuto.

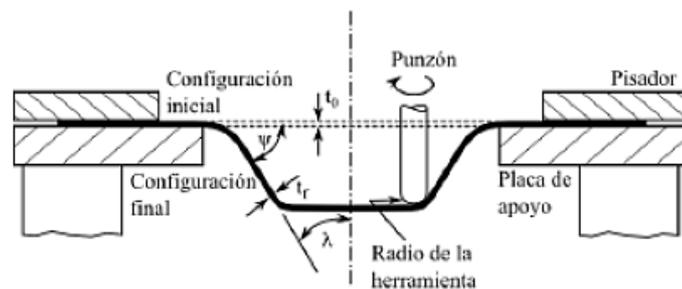


Figura 5. Configuración de un proceso de SPIF

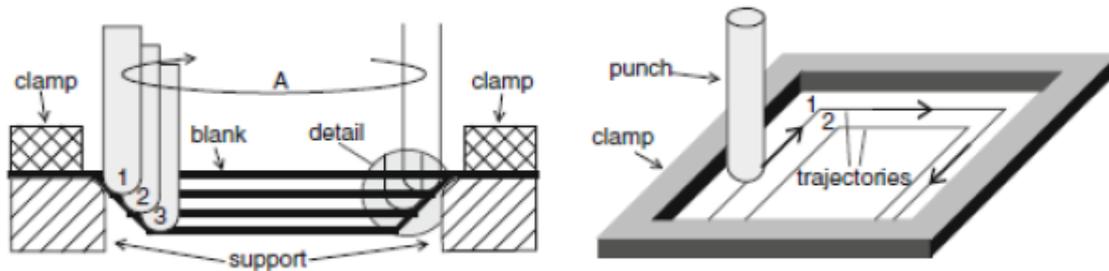


Figura 6. Trayectoria seguida por el punzón durante el proceso de conformado incremental

1.4.2 Ventajas y desventajas

Las ventajas y desventajas de SPIF son las siguientes:

- Producción de piezas directamente desde un archivo CAD.
- No hay necesidad de una matriz positiva o negativa.
- Los cambios de diseño pueden ser fácil y rápidamente realizados.
- Aumento de la capacidad de conformación material.
- Se puede realizar en una máquina convencional de CNC.
- Debido a la naturaleza incremental del proceso, las fuerzas son pequeñas.
- Dimensión de las partes sólo están limitadas por la máquina herramienta.
- Se puede lograr un buen acabado superficial.

En cuanto a las desventajas se presentan las siguientes:

- Tiempo más largo de procesamiento en comparación con la embutición profunda convencional.
- Se limita a pequeños lotes de tamaño de producción.
- La formación de ángulos rectos debe ser alcanzado por estrategias de varias fases.
- Geometría menos precisión, en particular en los radios de flexión convexa y bordes.
- Ocurre recuperación elástica, aunque se puede minimizar con el uso de algunos algoritmos de corrección.

1.4.3 La herramienta de conformado

El elemento principal es la herramienta sólida de punta hemisférica que asegura un contacto continuo en un punto de la lámina donde se deforma plásticamente el material (Figura 7). Las herramientas son diseñadas y fabricadas por los usuarios, pues aún no son parte de un surtido a disposición en el mercado. En los ángulos de pared muy empinadas puede llegar a ser necesario el uso de un vástago de herramienta menor que el diámetro del extremo esférico. El contacto entre el vástago y la lámina se evita de esta manera. Esto debe tenerse en cuenta para la generación de la trayectoria.



Figura 7. Herramienta de conformado incremental

Una vez que se establece una forma de la herramienta, con un radio específico para la cabeza semiesférica, los materiales para herramientas deben ser elegidos. En la mayoría de los casos, un acero para herramientas es adecuado para la mayoría de aplicaciones. Para reducir la fricción y para aumentar la vida útil de la herramienta, ésta puede ser recubierta o incluso ser hecha de carburo cementado. El desgaste de la herramienta se puede llegar a ser una consideración importante. Además, la lubricación ayuda a reducir el desgaste.

Una amplia gama de diámetros de herramienta se utiliza, a partir de pequeños diámetros de 6 mm hasta grandes diámetros de herramienta de 100 mm para la fabricación de piezas grandes. Estos requieren de mucha más potencia debido al ángulo de contacto mucho más grande involucrado. El diámetro usado depende del radio cóncavo más pequeño requerido en la parte. También tiene una influencia sobre la calidad de la superficie y/o el tiempo de fabricación.

1.4.4 El utillaje

Un soporte o utillaje rígido (blank holder) es necesario para sujetar los extremos de la lámina firmemente y evitar los movimientos relativos de esta (ver Figura 8).

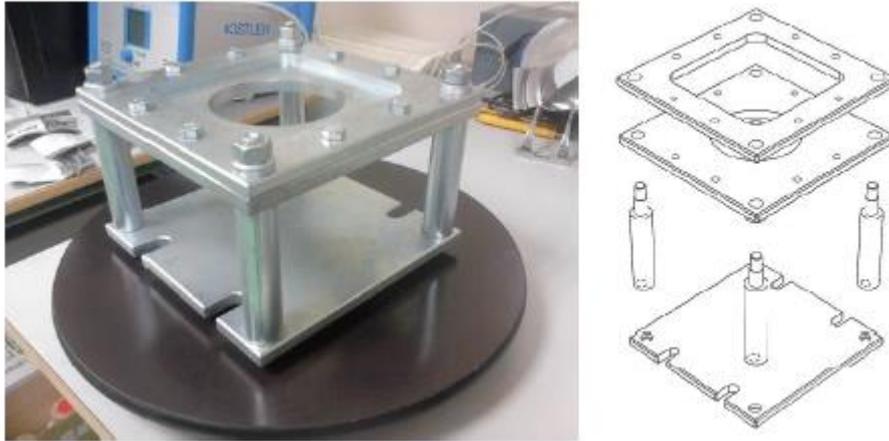


Figura 8. Utillaje de sujeción de la lámina

1.4.5 Equipos para conformado incremental

En general todas las máquinas CNC de tres ejes (Ver Figura 9) son adecuadas para llevar a cabo un proceso de SPIF. Las altas velocidades, grandes volúmenes de trabajo y suficiente rigidez son favorables. Máquinas de fresado están disponibles en diferentes diseños, que difieren en el volumen de trabajo, máxima velocidad de avance, máxima carga, rigidez y costo.



Figura 9. Máquina CNC de grandes dimensiones y carga

Hasta el momento un solo fabricante produce una máquina especialmente diseñada para este propósito (Hirt, 2004), ver Figura 10. Cuenta con altas velocidades de avance, volúmenes de trabajo de tamaño medio y está equipado con un pisador móvil controlado. Se basa en la tecnología desarrollada en Amino et al. (2002) incluyendo una patente de Aoyama et al. (2000).



Figura 10. Máquina diseñada para procesos SPIF

Otro conjunto de máquinas potencialmente utilizables están disponibles. Se están probando actualmente los robots industriales (Figura 11) que tienen un gran volumen de trabajo, controladores rápidos, baja rigidez y fuerzas máximas admisibles. Varios institutos están tratando de aplicar los robots al conformado incremental como: Schafer et al. (2004) y Meier et al. (2005). Este método de conformado está en etapa embrionaria y parece prometedor. Un caso especial de una aplicación de robots es que en lugar de una herramienta rígida que se mueve continuamente, existe la conformación incremental a golpe de martillo. En este caso, la punta de la herramienta de formación tiene un movimiento oscilante rápido que da la forma deseada a la lámina.



Figura 11. Brazo robótico para procesos SPIF

La plataforma Stewart (Stewart, 2005) ofrece infinitos grados de libertad (Figura 12). No se están utilizando, pero el potencial es grande sobre todo si se compara con las fresadoras de cinco ejes.

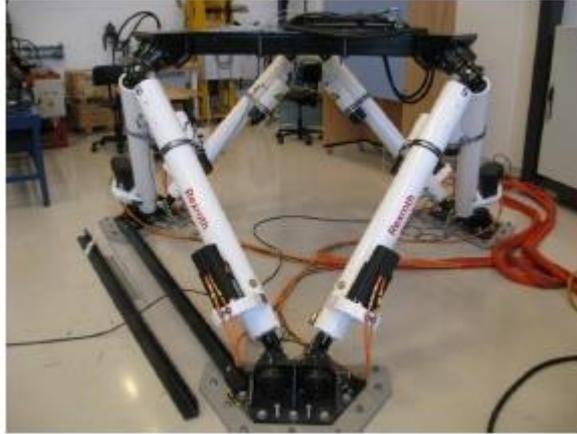


Figura 12. Plataforma Stewart

1.4.6 Conformabilidad en SPIF

Como se ha mencionado anteriormente, la conformabilidad de un material aumenta en SPIF debido a diversos factores involucrados en el proceso de tal forma que la fractura se retrasa.

Los diagramas límites de conformado, FLD, son una de las herramientas que se utilizan para decidir si un material de un espesor particular puede ser conformado por un proceso de embutición profunda. Estos diagramas han sido aplicados a la deformación incremental para mostrar dicho aumento de conformabilidad en conformados incrementales. Trabajos en diagramas límite de conformado en ISF han sido realizados en: Filice et al. (2002), Micari (2004), Hirt et al. (2003) y Young et al. (2005), cada uno de los cuales desarrolla una geometría esencialmente de forma cónica (Figura 13).

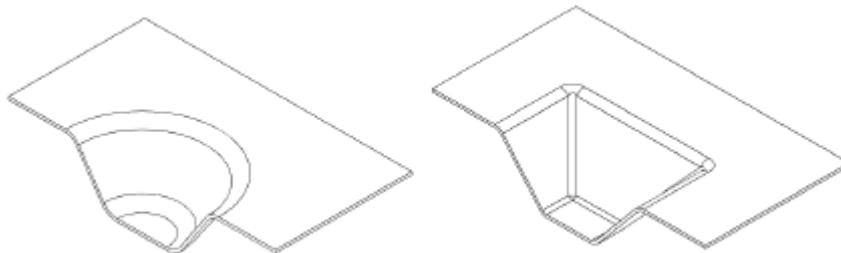


Figura 13. Formas cónicas para ensayos en SPIF

Los cuatro parámetros de interés por lo general son: espesor de la lámina (thickness), el desplazamiento vertical Δz (step-down), la velocidad de giro (spindle speed) y el diámetro de la herramienta. El step-down tiene una influencia significativa sobre la capacidad de conformado y la rugosidad de la superficie. Con el aumento de Δz la lámina se somete a condiciones de deformación más severas. Pruebas realizadas por Micari (2004) en la aleación de aluminio AA1050-O, de 1 mm de espesor, con configuración de cono muestran que la conformabilidad de la lámina disminuye como consecuencia directa del aumento de Δz (ver figura 14).

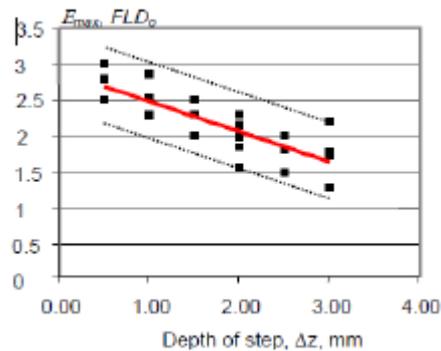


Figura 14. Puntos de fractura según paso en profundidad (Micari, 2004)

El aumento de la velocidad angular del cabezal o husillo puede hacer aumentar la capacidad de conformado. Este aumento se debe tanto a un calentamiento local de la lámina así como a una reducción positiva de efectos de fricción entre la herramienta y la lámina. Hay un aspecto negativo, y es que la herramienta de conformado se desgasta muy rápidamente en metales y en plásticos se corre el riesgo de dañar el material quemándolo si se emplean velocidades de giro muy altas, además en ocasiones los lubricantes tienden a quemarse creando así problemas de seguridad y medioambientales.

Un papel importante lo juega el diámetro de la herramienta, donde un pequeño radio concentra la zona de deformación en la lámina bajo la herramienta, mientras que un radio más grande tiende a distribuir las deformaciones sobre un área más extensa. A medida que el radio de la herramienta de conformado aumenta, el proceso se vuelve más similar al estampado tradicional, reduciendo de este modo los límites de conformabilidad.

Se ha demostrado que el espesor de la lámina (ver figura 15) tiene un efecto sobre el ángulo máximo de pared. Hirt et al. (2004) demostraron que esto es cierto para los límites de conformado. Su estudio se realizó con 3 espesores distintos manteniendo otros parámetros del experimento. Tendencias similares fueron encontrados en Kim et al. (2002).

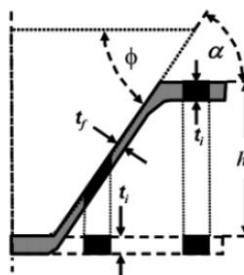


Figura 15 Influencia del espesor de la lámina en el ángulo de pared.

Donde se tiene que:

$$t_f = t_i \cdot \text{sen}(\alpha)$$

Por otro lado, para mostrar cuánto varía la conformabilidad entre un proceso convencional de stretch-bending y SPIF se van a mostrar los resultados obtenidos por Centeno et al (2004) en un estudio realizado para AISI 304:

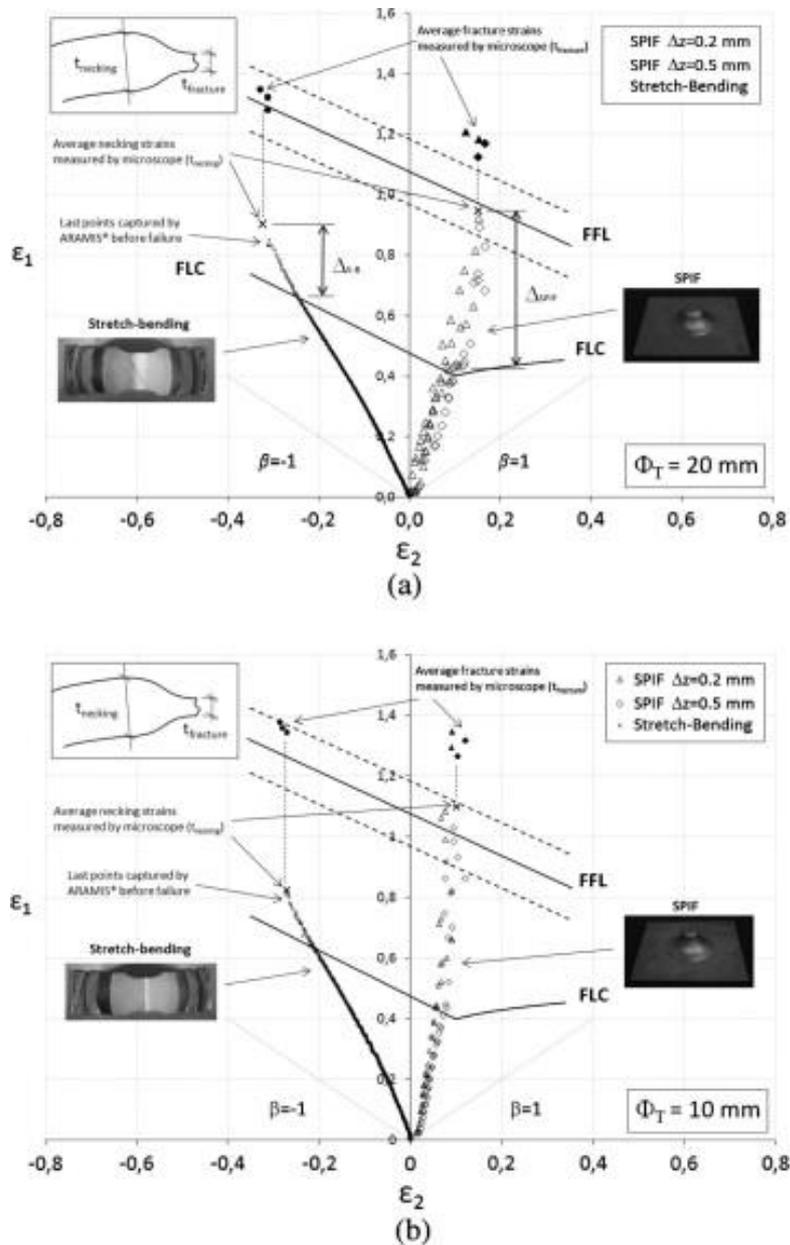


Figura 16 Conformabilidad hasta fractura en SPIF vs Stretch-Bending usando diámetro de herramienta de a) 20mm y b) 10mm (Centeno *et al.*, 2014)

Los resultados en el caso de un diámetro de herramienta de 20 mm (ver Fig. 16 a) muestran que, aunque en SPIF se consigue una deformación plástica estable muy por encima del FLC, las pruebas de flexión por estiramiento inician el fallo por estrechamiento para un nivel de deformaciones ligeramente por encima de la FLC. Puede observarse que la mejora de la conformabilidad por encima del FLC en SPIF es mucho mayor que en el stretch-bending. De hecho, el parámetro Δ , definido como el incremento porcentual de la conformabilidad por encima de la FLC, alcanza valores alrededor del 30% en flexión por estiramiento ($\Delta S-B$) mientras que en SPIF ($\Delta SPIF$) alcanza valores ligeramente superiores al 100%.

Por otro lado, para la herramienta de 10 mm de diámetro (ver Fig. 16 b), la falla en las pruebas de flexión por estiramiento se produce por un estrechamiento antes de la fractura para un nivel de deformaciones bastante por encima de la FLC, mientras que en SPIF esta diferencia es aún mayor para la herramienta de 20 mm de diámetro. Una vez más el aumento de la conformabilidad en SPIF es mucho mayor que en stretch-bending. Se obtienen valores de $\Delta S-B$ alrededor del 30% y valores de $\Delta SPIF$ hasta 150%.

Aunque los caminos de deformación no sean los mismos para SPIF y Stretch-Bending se pueden sacar conclusiones acerca de la influencia de la flexión en los diferentes procesos.

De acuerdo con estos resultados, parece razonable que la flexión local inducida por el radio de punzón, aunque desempeña un papel importante, no es el único parámetro que permite una alta deformación estable por encima del FLC en SPIF. El carácter local e incremental de la deformación y el efecto de flexión son los dos factores principales que controlan la conformabilidad en SPIF. El primero induce una zona de deformación pequeña y en movimiento, por lo que cualquier inestabilidad plástica es probable que no tenga ni tiempo ni espacio para iniciar o desarrollarse adecuadamente. Este último favorece un gradiente de deformación local a través del grosor de la lámina, retrasando el desarrollo del estrechamiento o incluso suprimiendo su formación. Otros factores que también pueden ayudar a mejorar la conformabilidad en SPIF son la relación de triaxialidad, la tensión de cizallamiento, la presión de contacto y el esfuerzo cíclico.

En los ensayos de flexión por estiramiento y SPIF el fallo se rige por estrechamiento o fractura dependiendo de la relación t_0 / R . En particular, para los diámetros de herramienta considerados aquí el estrechamiento parece ser el mecanismo de falla, especialmente para el diámetro de herramienta más alto de 20 mm que corresponde a una relación t_0 / R inferior. Sin embargo, para este material no aparece una clara tendencia hacia el fallo por fractura dúctil en ausencia de estrechamiento, contrariamente a lo observado en algunas aleaciones de aluminio deformadas por SPIF para altas relaciones t_0 / R .

Por último, es importante entender el diferente comportamiento en cuanto a la estabilidad en el proceso de deformación en el punto más crítico de la zona de deformación (punto de la superficie externa donde el material soporta los mayores esfuerzos de tracción). Como muestra la figura 17, los materiales de alta ductilidad en conformado convencional suelen comenzar a fallar con el inicio de la estricción a lo largo de una banda estrecha. El material se deforma continuamente dentro de este cuello bajo un proceso de deformación inestable, siguiendo aproximadamente un estado de deformación casi plano, hasta que se produce la fractura dúctil. Por el contrario, las láminas deformadas por SPIF (o cualquier otro proceso de formación incremental) bajo un cierto rango de parámetros de proceso sufren un esfuerzo estable alrededor de condiciones de deformación planas que parece conducir directamente a la fractura dúctil.

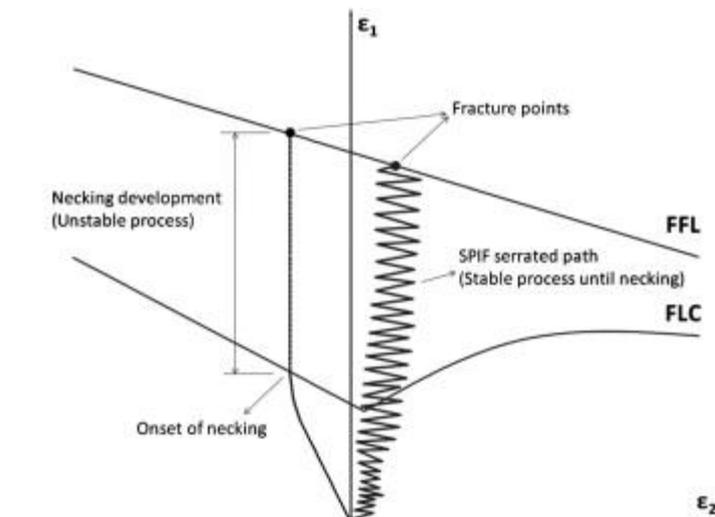


Figura 17 Estabilidad del proceso de deformación para SPIF y conformado convencional

1.5 SPIF en polímeros

El trabajo de Martins et al. [14] fue la primera publicación sobre la evaluación de la conformabilidad de materiales termoplásticos procesados mediante SPIF. FLD se emplearon para caracterizar los materiales analizados debido a la ausencia de estricción previo al fallo. Compararon 5 polímeros, mostrando que la conformabilidad del PE (polietileno) era significativamente superior a la conformabilidad de los metales, mientras que PA (poliamida) y PVC (cloruro de polivinilo) tenían una conformabilidad similar. PC (policarbonato) tenía una conformabilidad ligeramente inferior. Sólo uno de los polímeros, POM (polioximetileno), falló muy pronto y, por lo tanto, no se consideró factible para ser utilizado en SPIF.

Un trabajo similar fue realizado por Marques et al. [15] para PET (tereftalato de polietileno), PA, PVC y PC. Las pruebas experimentales se realizaron utilizando geometrías troncocónicas y piramidales. Para PC y PVC, las deformaciones en fractura coincidieron con las FFL calculadas, mientras que PET presentó mayores niveles de conformabilidad (no se observó fractura) y PA tuvo asimismo mayor conformabilidad además el fallo fue causado por arrugas en lugar de por fractura. También se señaló que la conformabilidad mejoró con el aumento del espesor de la lámina y la disminución del radio de la herramienta.

Por otro lado, con geometrías hole-flange y un proceso SPIF multietapa Silva et al (2013) se observó que el PET tiene mejor conformabilidad que el PC debido a su mayor tenacidad a la fractura y a un reordenamiento más efectivo de las cadenas de plástico durante la deformación plástica, pudiendo alcanzar mayores valores de deformación.

1.5.1 Aplicaciones biomédicas de piezas fabricadas por SPIF

Centrándose en los materiales que se han utilizado para la fabricación de prótesis craneales, los metales son los más utilizados hasta ahora principalmente debido a sus propiedades de carga. Sin embargo, las prótesis plásticas tienen algunas ventajas como la biodegradación, la ligereza o la facilitación de la fusión ósea, de modo que en la actualidad se están realizando investigaciones tanto en materiales poliméricos como metálicos (Gopakumar, 2004, Williams et al., 2015). En cuanto a las prótesis craneales fabricadas por SPIF, existen algunos intentos recientes de obtener prototipos de metal que podrían reemplazar áreas craneales (Araújo et al., 2014; Duflou et al., 2005; Göttmann et al., 2012). Con el fin de fabricar una prótesis craneal personalizada en lámina polimérica por SPIF, ver figura 18, los primeros intentos encontrados en la literatura se centran principalmente en la evaluación de la precisión de las prótesis craneales en policarbonato (Bagudanch et al., 2014) y en polímeros biocompatibles tales como policaprolactona (Bagudanch et al., 2015c).

Recientemente, el trabajo de Centeno et al. [2015] propone una metodología completa para diseñar y fabricar prótesis craneales personalizadas de polímeros utilizando la tecnología SPIF a partir de la tomografía axial computarizada de los pacientes. En la primera parte del trabajo se analiza la conformabilidad de una serie de láminas poliméricas deformadas por SPIF para determinar sus límites de conformabilidad dentro de este proceso. El material más restrictivo fue seleccionado para la fabricación de una prótesis craneal parcial. Se fabricó con éxito la prótesis craneal parcial dentro de los límites de conformado del material más restrictivo en términos de conformabilidad entre las diferentes láminas poliméricas no biocompatibles analizadas, demostrando el alto potencial de fabricación de prótesis poliméricas individualizadas mediante SPIF.

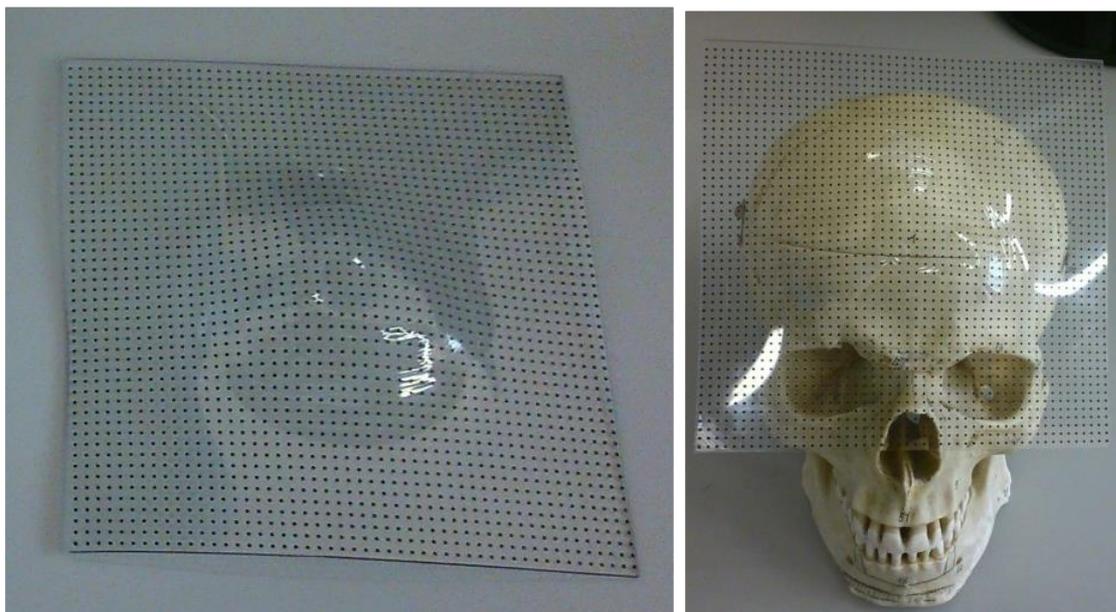


Figura 18 Prótesis de PC fabricada mediante SPIF, Centeno et al. [2015]

El proceso propuesto por Centeno et al [2015], ver figura 19, se basa en captar la geometría de aquella parte del cuerpo a reemplazar, en el caso de ejemplo, una zona del cráneo. Esta geometría se procesa mediante tomografía computarizada y se procesa con una aplicación de diseño 3D (por ejemplo, CATIA v5) y de forma paralela se elige el material adecuado para la prótesis. Posteriormente se genera la pieza 3D y se traduce su geometría a un formato aplicable a una máquina de CNC (por ejemplo, ISO code). Se fabrica la pieza y se pone a punto para ser implantada en un paciente. Así pues, el proceso definido por Centeno et al es el siguiente:

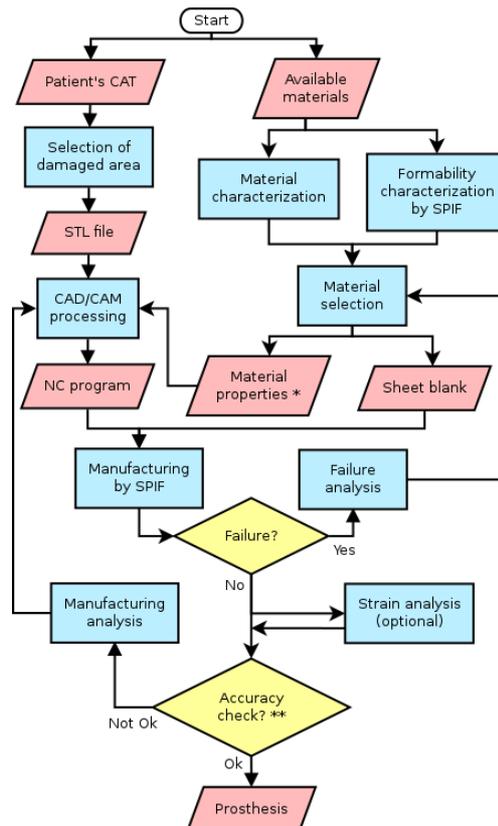


Figura 19 Proceso de desarrollo de una prótesis mediante SPIF (Centeno et al., 2015)

Es vital la correcta definición de la geometría, ver Figura 20, así como su generación mediante SPIF para que el ajuste en el paciente sea lo más preciso posible.

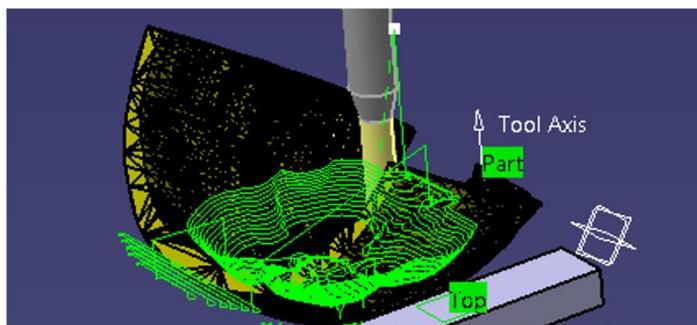


Figura 20 Generación de trayectorias en CATIA v5 (Centeno et al., 2017)

1.6 Medición de deformaciones

1.6.1 Método del patrón de círculo

El método consiste en imprimir en una lámina sin deformar de espesor t_0 un patrón de círculos de diámetro conocido d_0 . Esta impresión se realiza sobre la superficie a medir mediante grabado electroquímico en metales o serigrafía en plásticos. Al deformarse la lámina durante el proceso de conformado, los círculos se convierten en elipses y sus ejes coinciden con las direcciones de las deformaciones principales (Figura 21). Éstas entonces se calculan midiendo los valores: d_1 , d_2 y t directamente o con aplicaciones ópticas de medición que se describirán más adelante.

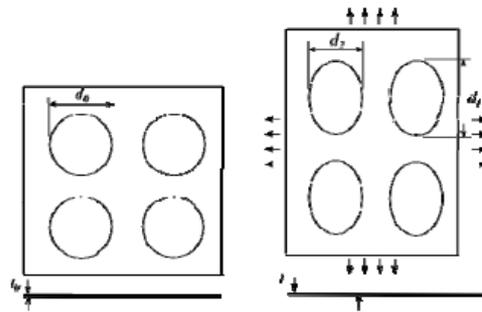


Figura 21. Patrón de círculos antes y después de la deformación

Las deformaciones principales al final del proceso son:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \quad \varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t_f}{t_i}\right)$$

Estos patrones regulares tienen las siguientes ventajas: se pueden aplicar en el laboratorio, no están limitados por el área de trabajo, y se pueden medir en el laboratorio después de haber sido deformado el material en otro lugar. Una limitación es que cualquier irregularidad en la red de círculos crea pequeños errores que se acumulan en el resultado final. Una consecuencia de ello es que la resolución es limitada, y pequeñas deformaciones son, por tanto, difíciles de medir.

Estos procedimientos proporcionan las deformaciones mayor y menor en la superficie. La deformación del espesor se puede obtener bien por medición directa del espesor, o a partir de las deformaciones de la superficie usando el criterio de volumen constante del material. Sin embargo, estas deformaciones son sólo las deformaciones principales en ausencia de cizalladura, o más concretamente, presuponen que los dos lados de la lámina no se han desplazado uno con respecto a otro.

1.6.2 Sistema ARGUS®

ARGUS® es un sistema de medición óptico de deformación en 3D sin contacto (GOM, 2013) que permite determinar los cambios en la forma de componentes de lámina metálica. Proporciona las coordenadas 3D de la superficie del componente, así como la distribución de las deformaciones principales en la superficie y la reducción del espesor del material. En el Diagrama límite de conformado, las deformaciones medidas se comparan con las características del material.

ARGUS® apoya los procesos de optimización de conformado de lámina por medio de:

- Rápida detección de áreas críticas de deformación
- Solución de problemas complejos de conformado
- Verificación de simulaciones numéricas
- Verificación de modelos de elementos finitos
- Creación de curvas de límite de conformado

El principio de funcionamiento del sistema ARGUS® se basa en la fotogrametría, también llamada teledetección. Este método permite calcular una geometría tridimensional sobre la base de un conjunto de imágenes bidimensionales. Debido a que el sistema ARGUS® trabaja en escalas de grises, las fotografías deben ser en blanco y negro. La ubicación de los puntos espaciales de un objeto se determina mediante el uso de una triangulación de haces de luz direccionales. Esto puede ser explicado por la Figura 22, donde se da una representación esquemática de los dos principios básicos de la fotogrametría.

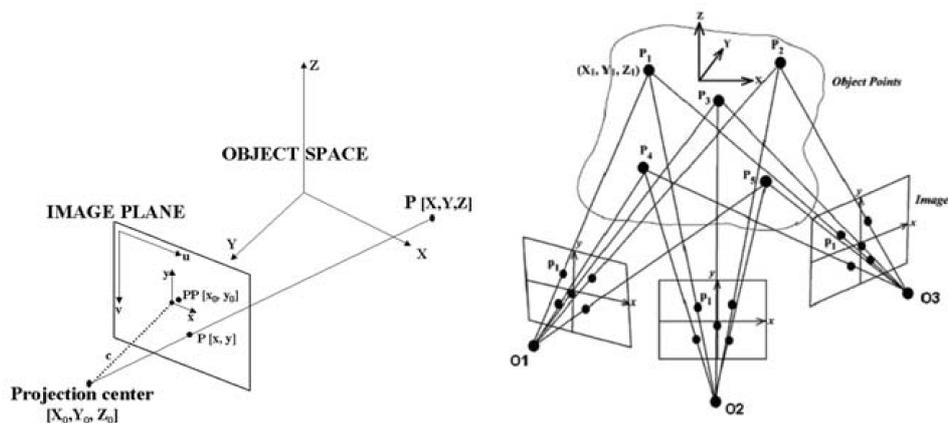


Figura 22 Principios de la fotogrametría: Principio de colinealidad (Izq.) y de triangulación (Der.)

En esta figura, el punto $P(X,Y,Z)$ está determinado por dos imágenes. Cada imagen está tomada desde una cierta posición y dirección de visualización en el espacio. Esta posición y orientación está dada por el sistema de coordenadas de la cámara $X_0Y_0Z_0$. El origen del sistema de coordenadas de la cámara corresponde al objetivo de la cámara, con el eje z perpendicular a la lente y a la superficie sensible a la

luz. La distancia entre el origen del sistema de coordenadas de la cámara y el centro de la superficie sensible a la luz debe considerarse como la longitud focal de la cámara. Con esta información es posible construir una línea que pasa por el punto PP en el plano de la imagen y el origen del sistema de coordenadas de la cámara.

Para medir las deformaciones en la superficie del objeto es necesaria una rejilla de puntos que esté claramente visible en el objeto. La malla regular de puntos debe estar marcada en la lámina sin deformar (Figura 23). Al conformar la lámina, la rejilla se deforma juntamente con ella y, por tanto, contiene la información necesaria de deformación (Figura 24). El grabado de la rejilla de puntos es un proceso electroquímico, llamado marcado electrolítico. Dos tipos de ataque químico pueden ser distinguidos: grabado negro sobre blanco o blanco sobre negro dependiendo del material metálico. Para materiales poliméricos, muchos de ellos transparentes, se suele aplicar una capa de pintura blanca sobre la cara opuesta de la lámina y se imprime luego la malla o patrón de puntos.

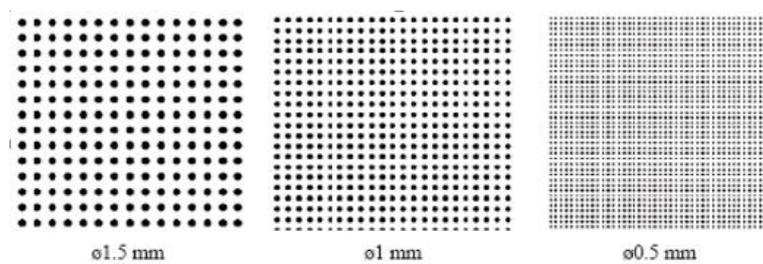


Figura 23 Patrones de puntos estandarizados

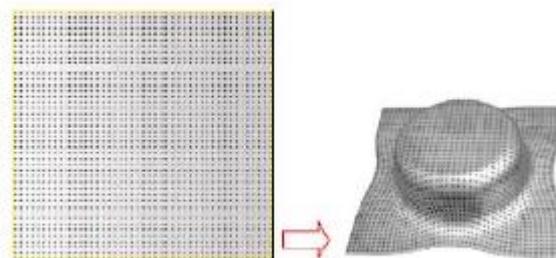


Figura 24 Lámina de aluminio con patrón en estados inicial y deformado.

El sistema ARGUS® viene con marcadores de código de barras circulares o puntos codificados, (Figura 25). Estos marcadores están colocados en la región de interés y son necesarios para el cálculo de la posición de la cámara con respecto al objeto para cada imagen. La posición de la cámara se determina con precisión por el centro de cada marcador, mientras que los segmentos de círculo alrededor del centro permiten que el software asigne un identificador único para el marcador.

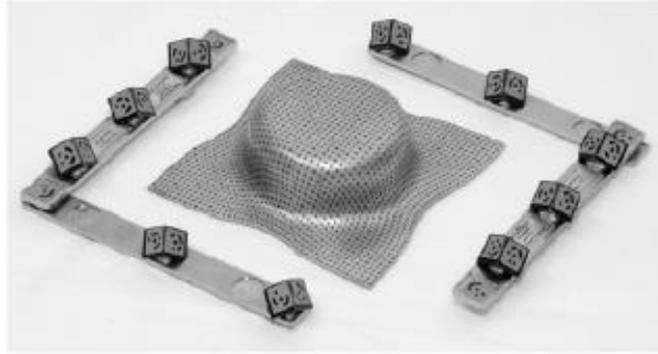


Figura 25 Puntos codificados de referencia espacial

A fin de calcular la deformación, el estado no deformado, se compara con el estado deformado (Figura 26). Por defecto, ARGUS® supone un patrón inicial exactamente regular, que está en un plano y en que la distancia entre puntos es conocida. Esto se conoce etapa de referencia virtual (virtual reference stage). El software es también capaz de analizar varios estados de deformación estática (etapas) dentro de un proyecto en el que se puede ajustar cada etapa de deformación como deformación de referencia en cualquier momento.

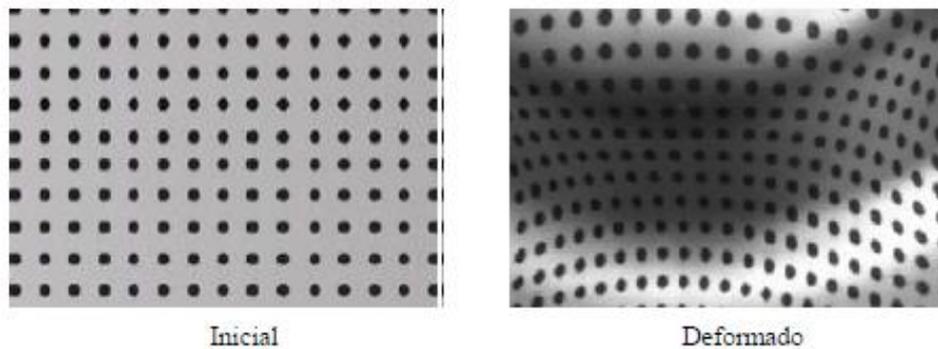


Figura 26 Patrón de puntos antes y después de la deformación.

Para permitir un completo campo de visión de las deformaciones, el programa cambia al modo de rejilla (grid) o una superficie de cuadrícula que está formada por los centros de los puntos reconocidos. Cada punto de intersección de las líneas de la cuadrícula representa un punto de medición 3D. A partir de las coordenadas 3D de los puntos del objeto, se calculan los resultados actuales de la conformación y grosor de la lámina teniendo en cuenta la geometría de la pieza y los principios de la teoría de la elasticidad. Estos cálculos también pueden realizarse para la línea central de la lámina en caso de que sea necesario aplicarlos a láminas de mayor grosor y radios de menor tamaño.

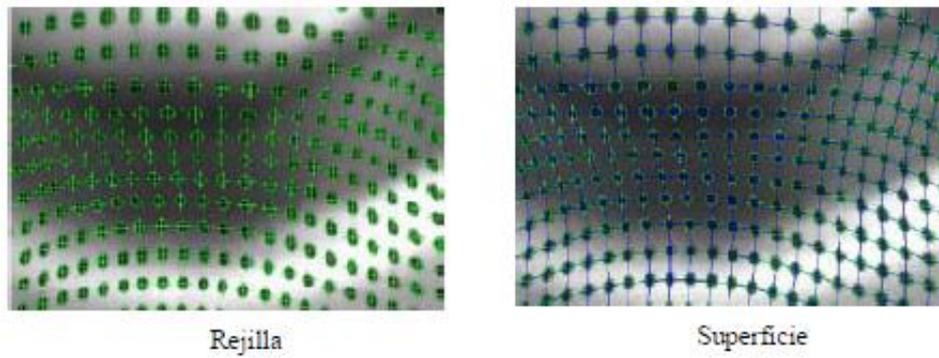


Figura 27 Modo de visualización

En primer lugar, las deformaciones se representan mediante colores en una malla 3D de hasta un millón de puntos, ver figura 27. Unas etiquetas ayudan a visualizar puntos concretos de la superficie de la pieza con sus valores de medición correspondientes, ver figura 28.

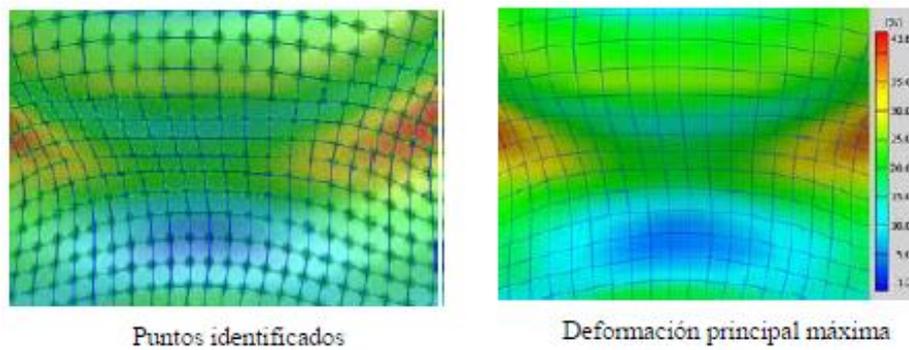


Figura 28 Visualización de resultados

A partir de la conformación pueden crearse diagramas de límite de conformado (FLD) en los que curvas de límite de conformado (FLC) importadas permiten la evaluación del comportamiento durante el conformado.

1.7 Objetivos del proyecto

El objetivo general de este proyecto fin de carrera ha sido analizar experimentalmente las deformaciones límites en láminas de policarbonato (en adelante, PC), policloruro de vinilo (en adelante, PVC) y policaprolactona (en adelante, PCL) de 2 mm de espesor alcanzando una geometría de pirámide truncada y siendo deformadas mediante conformado incremental lámina para punzón libre y para punzón con giro a 2000 rpm; así como realizar una primera aproximación a la simulación de un proceso SPIF para una lámina de PC de 2 mm de espesor con giro libre de la herramienta.

Los objetivos específicos del proyecto se enumeran a continuación de manera cronológica:

1. Obtener el diagrama límite de conformado, en inglés Forming Limit Diagram (FLD) para las láminas de PC, PVC y PCL realizando para ello medidas sobre las deformaciones alcanzadas en las láminas deformadas mediante SPIF.
2. Analizar los parámetros más relevantes del proceso y describir aquellos fenómenos característicos que puedan producirse en la deformación de las probetas.

Analizar los problemas asociados al análisis numérico de la probeta de PC conformada mediante SPIF sin giro de herramienta y establecer posibles soluciones para estudios posteriores.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se va a exponer la metodología empleada para crear los diagramas límite de conformado conocidos como FLDs para los tres materiales en estudio, policarbonato, policloruro de vinilo y policaprolactona, para las distintas condiciones de ensayo, con giro de herramienta a 2000 rpm y sin giro de la misma. Para ello se van a emplear técnicas de fotogrametría y el software ARGUS que proporcionará la información de deformaciones principales en las probetas y, por otro lado, usando un microscopio y con técnicas de fractografía se calcularán las deformaciones alcanzadas en la fractura para aquellas probetas que presentan fallo en modo de fractura.

2.1 Metodología

En la presente sección se va a describir el proceso seguido para el desarrollo de los distintos ensayos a los que han sido sometidos las seis probetas. Este proceso ha sido el mismo para ambas probetas (SPIF con y sin rotación de la herramienta) de cada material (PC, PVC y PCL).

Dicho trabajo se ha dividido en dos partes principales, en primer lugar, se procede a la recogida y tratamiento de imágenes mediante ARGUS de una serie de probetas deformadas por SPIF y, en segundo lugar, la determinación de las deformaciones principales en fractura mediante la realización de fractografías para ciertas secciones de dichas probetas.

El proceso de trabajo se podría resumir entonces en: captura de imágenes, procesamiento de imágenes en ARGUS, obtención de FLDs, corte y preparación de las secciones significativas de la probeta, realización de fractografías y medición microscópica de las reducciones de espesor en las fractografías, cálculo de reducciones medias de espesor, fusión de datos de deformaciones de ARGUS con los resultados de las fractografías, creación del FLD con la FFL (curva límite de fractura) incluida.

2.2 Geometría de la probeta

La geometría de inicial de referencia de las probetas es la misma para todas. Se ha empleado una lámina cuadrada de 150x150 mm con 2 mm de espesor nominal. Dos de ellas han sido fabricadas con PC y otras dos PVC comercial y, por otro lado, las otras dos, concretamente las de PCL, fueron fabricadas por el Laboratorio de Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Girona.

A dicha geometría inicial se aplica un proceso SPIF que va deformando la probeta hasta que se alcanza el fallo de la misma. Fallo que puede manifestarse de diferentes formas que se estudiarán a posteriori.

2.3 Parámetros de ensayo.

Es importante a su vez definir los parámetros con los que el ensayo ha sido realizado. Tanto los parámetros cinemáticos (trayectorias y velocidades).

La serie de ensayos SPIF en todas las probetas fueron efectuados en una máquina de fresado de tres ejes Kondia® HS1000 equipado con control numérico Fidia® así como un dinamómetro Kistler® 9257B utilizado para medir las fuerzas de conformado durante el proceso. La adquisición de datos se realizó con una tarjeta DaqBoard® 505 y el software DaqView® 9.0.0. Este trabajo forma parte de un proyecto realizado en las instalaciones del GREP de la Universidad de Girona por Garcia Romeu et Al (2015).

En la figura 29 de abajo se observa la configuración experimental para los ensayos de SPIF que incluyen

un prensachapas (clamping plate), una matriz de apoyo (backing plate) con un agujero circular de 75 mm de diámetro, cuatro soportes (supports) y una lámina de protección de la mesa (bottom plate).

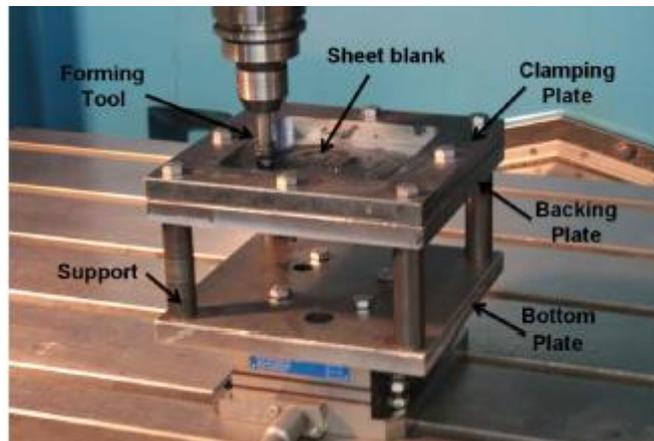


Figura 29 Setup de ensayo SPIF

En cuanto a la cinemática del ensayo cabe decir que el área de trabajo efectivo proporcionado por la configuración ha sido de 120x120 mm y la geometría proporcionada a la máquina de CNC fue un tronco pirámide truncada de generatriz circular (aristas redondeadas) con los siguientes parámetros:

- Diámetro inicial del tronco piramidal = 105 mm
- Ángulo inicial de entrada = 45°
- Radio generatriz = 80 mm
- Diámetro de herramienta = 10 mm
- Paso vertical (Step down) = 0.5 mm
- Velocidad de avance = 2250 mm/min
- Rotación de la herramienta = 0 rpm (ensayo sin rotación)
- Rotación de la herramienta = 2000 rpm (ensayos con rotación)
- Sentido de movimiento de etapa = alternado
- Lubricante líquido

Tabla 1 Parámetros de ensayo

Ensayo	D_h (mm)	Δz (mm/ciclo)	Spindle Speed (rpm)
PC_1	10	0.5	0
PC_2	10	0.5	2500
PVC_1	10	0.5	0
PVC_2	10	0.5	2500
PCL_1	10	0.5	0
PCL_2	10	0.5	2500

2.4 Captura de imágenes.

La captura de imágenes para su proceso en ARGUS es una parte esencial en el desarrollo experimental. Se debe prestar especial atención a los detalles que ahora serán comentados para evitar consumir un tiempo excesivo tratando conseguir la calidad de imagen requerida por ARGUS para su correcto funcionamiento.

El procedimiento de captura se ha realizado con una cámara NIKON D300S instalada en un trípode para evitar vibraciones. El enfoque se fijó a unos 300 mm aproximadamente desde la lente hasta la superficie de la probeta. Como se ha comentado anteriormente las capturas son realizadas a una probeta y al juego de escalas que proporciona ARGUS, en este caso las de tipo Negro sobre Blanco (coded marks), montadas en un plato giratorio. Es muy importante prestar atención a que las escalas no se muevan con respecto a la probeta durante el proceso de captura, de lo contrario las tomas quedarían invalidadas (por pérdida de referencia que induce errores en el procesamiento de ARGUS).

Los parámetros más importantes a la hora de capturar las imágenes de probetas fabricadas con polímeros son la luz, la distancia, el enfoque, el contraste y el número de imágenes tomadas.

Para conseguir una imagen óptima se ha de contar con una luz difusa que no provoque reflejos o sombras excesivas en la probeta. La imagen ha de ser tomada a una distancia prudencial, esto es, la adecuada para enmarcar toda la pieza y los juegos de escalas. El enfoque preciso para que los puntos (elipses al deformarse) queden correctamente definidos, para ello es recomendable comprobar las imágenes al realizarse. El contraste justo para que el fondo blanco que da a la probeta la imprimación de pintura sea lo suficientemente blanco sin dejar zonas grises donde, después en ARGUS, se confundan las elipses. Y, finalmente, un número de imágenes adecuado para una buena triangulación al procesar (es decir, que al menos tres imágenes consecutivas se capture la elipse de forma nítida). Como orientación para el número de tomas podría tomarse la empleada en el presente trabajo, tres series de 8 fotos a elevaciones de 20°, 45° y 80° (ver figura 30).

A continuación, se van a mostrar todas las probetas con su correspondiente identificación:

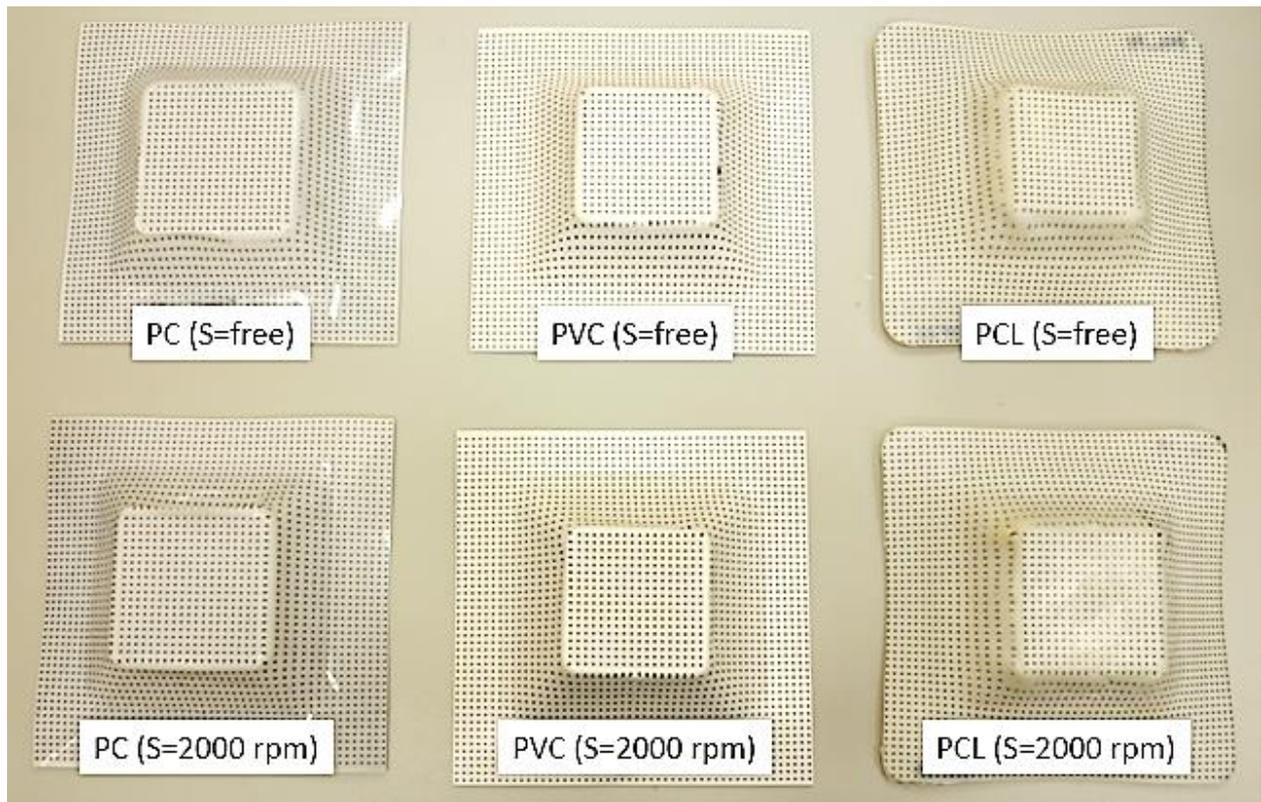


Figura 30 Identificación inicial de probetas

En lo relativo a la posición de la probeta con respecto a los coded points, ver figura 32, que ARGUS reconoce y emplea en su análisis se observa la posición empleada en la figura 31 que evita movimientos relativos entre los elementos en el desarrollo de las tomas fotográficas.

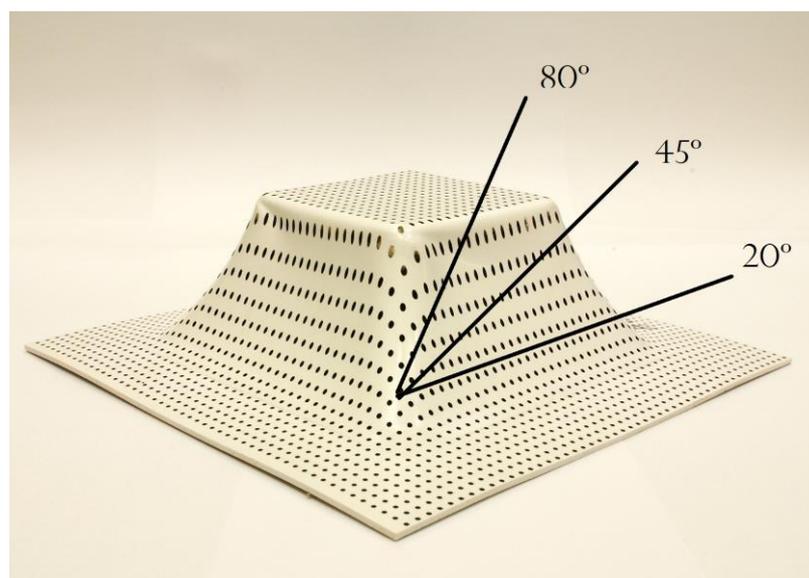


Figura 31 Orientación de las series de capturas de imágenes.

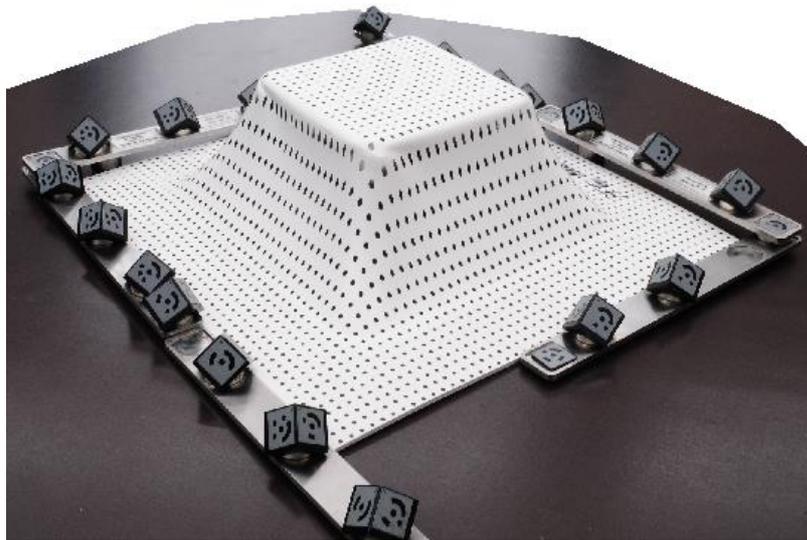


Figura 32 Posición de la probeta con respecto a los coded points

2.5 Procesamiento de imágenes mediante ARGUS

Como se ha explicado en apartados anteriores, el sistema ARGUS procesa las imágenes tomadas de la probeta y mediante técnicas de análisis de imagen es capaz de identificar la posición de las elipses en el espacio tridimensional. Una vez reconocidas las elipses de forma automática, es posible que algunas de ellas no se hayan detectado automáticamente, por lo que al tratar de mallar la probeta y crear la estructura mallada que define a la probeta deformada en 3D se generen distintas mallas que no son coincidentes.

Para evitar lo anterior se recomienda que, por un lado, los puntos estén bien definidos en la probeta pudiendo ser necesario corregir pequeñas imperfecciones de forma muy cuidadosa con un rotulador permanente (en caso de trabajar con polímeros) y por otro lado si el problema persiste con las imágenes ya analizadas, definir los puntos en la aplicación en aquellos que, aunque a simple vista aparece la elipse, ARGUS no los ha detectado. Con estas dos correcciones al mallar la probeta es muy probable que genere varias mallas superpuestas y coincidentes en las zonas colindantes entre ellas, posteriormente se fusionan en una sola malla y queda completamente definida la geometría deformada de la probeta que permite el análisis de deformaciones con respecto a la geometría de lámina plana inicial. En la figura 33 se observa como desde distinta perspectiva ARGUS detecta unos puntos y otros no, al fusionar la malla se genera una única que contiene toda la información de deformaciones de la probeta.

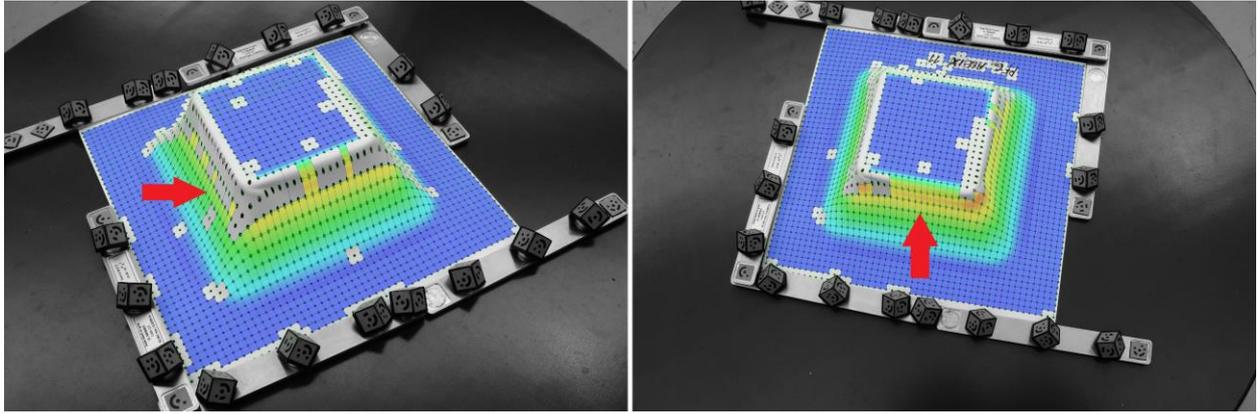


Figura 33 Dos tomas distintas de una misma probeta. (Flecha señala a la cara equivalente en ambas fotos)

Cabe decir a su vez que es posible que ARGUS interpole zonas donde las deformaciones han sido muy altas, zonas donde probablemente el material haya fallado con rotura y, efectivamente, ARGUS estaría interpolando deformaciones en una zona donde no existe material. Este efecto ha de tenerse en cuenta para evitar inducir errores en el FLD.

Con la información contenida en la superficie generada, las deformaciones de la lámina generadas por el ensayo SPIF pueden ser obtenidas. Esto es, las deformaciones principales máximas y mínimas en toda la probeta y en puntos característicos como son aquellos cercanos a la fractura donde se producirán las máximas deformaciones. ARGUS proporciona distintas escalas para visualizar la información de las distintas variables resultado eligiendo así la que más se ajuste al análisis que se realice o facilite su comprensión.

Finalmente, la probeta virtual generada contiene toda la información de deformaciones y demás resultados que ARGUS puede proporcionar. Como ejemplo en la figura 34 se muestran las deformaciones principales máximas en toda la geometría de la probeta de PC sin rotación de herramienta.

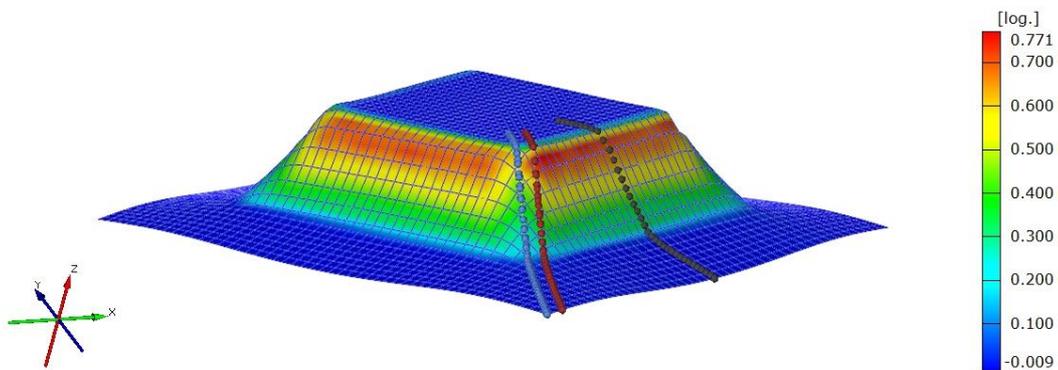


Figura 34 Resultado de deformaciones principales máximas a lo largo de la geometría de la probeta de PC sin rotación de herramienta.

2.6 Generación de FLDs

Una vez creada la malla 3D que define a la probeta deformada se pueden realizar diferentes secciones en la superficie generada por la malla para visualizar la información de deformaciones que contiene. Pueden generarse a su vez gráficos de FLD que muestren las deformaciones principales máximas y mínimas para todos los puntos de la malla y, también, otro tipo de gráficos que muestran la evolución de las deformaciones principales máximas (o mínimas). A su vez se pueden extraer los datos de deformaciones en forma de archivo de texto y con estos datos es posible realizar un análisis más personalizado de los resultados creando gráficos específicos volcando la información desde el archivo de texto a formato Excel.

Más concretamente, en este estudio se han realizado tres secciones para cada probeta (ver Figura 33 del apartado anterior). Una en la zona de deformación plana, otra en la zona de deformación equibiaxial y otra en la zona de deformación cuasi equibiaxial.

La información de la deformación principal máxima, y mínima, a lo largo de cada sección se puede representar como se indica en la Figura 35. El punto máximo corresponde al valor en la fractura. Este valor es significativo debido a que el método en sí es directo y que depende del tamaño del patrón de círculos (Marciniak et al 2002).

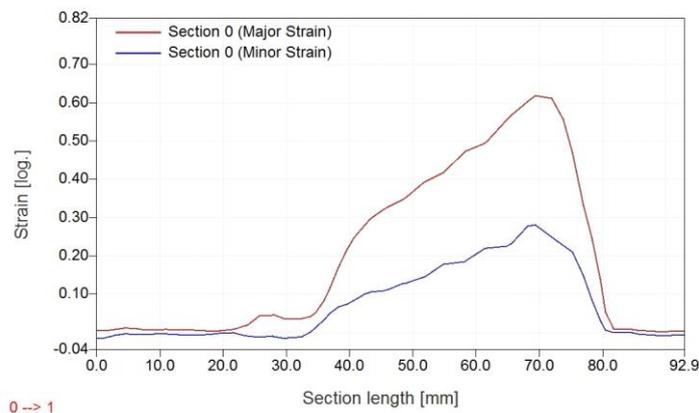


Figura 35 Evolución de las deformaciones principales máxima y mínima en la sección que pasa por la zona de deformación biaxial para el PC 2000 rpm

Al representar las deformaciones principales de las tres secciones, se obtiene su evolución hasta sus valores máximos. La Figura 36 representa las deformaciones principales máxima y mínima dentro del espacio de deformaciones en el plano de la lámina para el caso PC 2000 rpm. Se observa la línea azul que es la evolución de deformaciones en la zona de deformación biaxial, la roja en deformación cuasi biaxial y la gris en deformación plana.

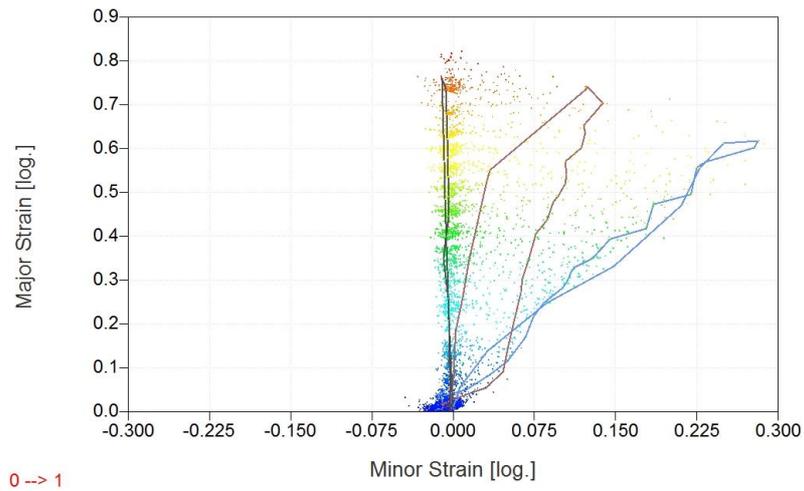


Figura 36 FLD generado por ARGUS con evolución de las deformaciones en las tres secciones realizadas en la probeta.

Por último, como se mencionada al comenzar este apartado, los datos de ARGUS de FLD se trasladan a formato Excel para genera un gráfico FLD personalizado que quedaría de forma provisional, a falta de los datos de fractografías que ahora serán descritos, de la siguiente forma en la figura 37:

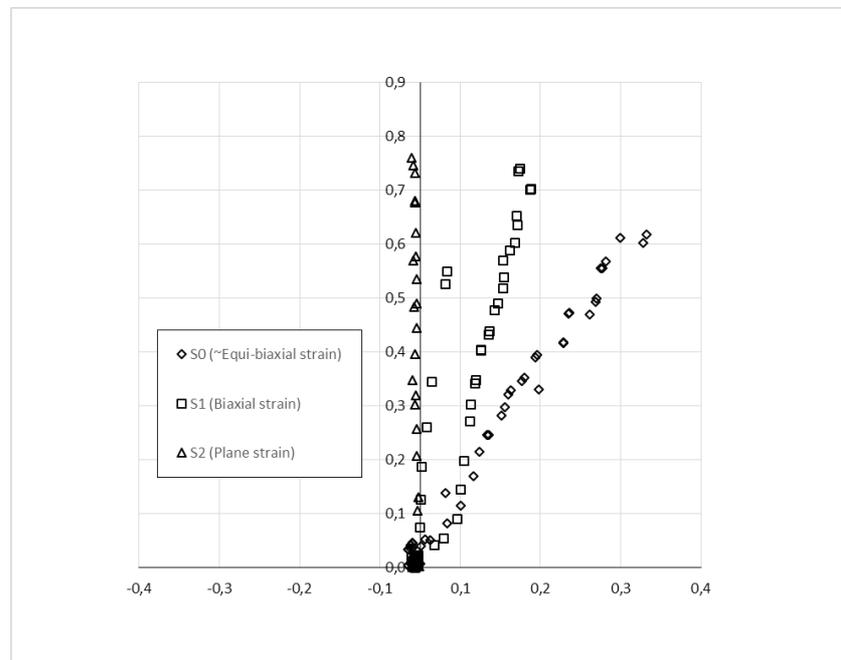


Figura 37 FLD de PC 2000 rpm creado a partir de los datos de ARGUS

2.7 Determinación de deformaciones en fractura.

Una vez se ha obtenido la distribución de deformaciones principales máxima y mínima a lo largo de la geometría de la probeta se procede a determinar las deformaciones alcanzadas en la fractura, es decir, los puntos de la curva de fractura (aka FFL) en el FLD.

El procedimiento se basa en medir la reducción de espesor t_f en la zona de fractura mediante un microscopio calibrado con el que poder medir de forma electrónica las imágenes tomadas por éste, denominadas fractografías.

Se tomarán dos imágenes, una para cada borde de la fractura en cada zona (deformación plana y deformación equibiaxial) a x40 (40 aumentos) y se medirá la reducción de espesor en tres puntos diferentes próximos al borde (hay variaciones de centésima de mm por lo que así se consigue más exactitud). Excepto para la probeta de PLC que como se verá posteriormente no rompe físicamente con una grieta considerable, por lo que se ha medido el espesor en la zona más crítica (dos medidas en lugar de las tres de antes) que corresponde al espesor en el momento de la fractura. Asimismo para cada imagen anterior se ha tomado otra a x10 (10 aumentos) para facilitar la comprensión de la zona de medidas en las probetas en los resultados de apartados posteriores de este documento.

Se ha de proceder con mucho cuidado a la hora de cortar las probetas y su posterior lijado. Siempre se debe dejar un poco de material para que los lijados sucesivos desde lijas con granos gruesos hasta las de granos más finos se llegue justo a la zona de medición deseada. Al ser un plástico el material de estudio las cadenas de polímeros pueden quedar en los bordes de la zona de corte ya que el rozamiento de la lija y el material hace que la pared de la probeta en la zona de fractura flecte de forma casi imperceptible dejando así una fractografía con diferentes zonas de lijado, bordes recanteados u otros efectos indeseables.

La deformación logarítmica se calcula con respecto al espesor inicial de la forma siguiente:

$$\varepsilon_{3f} = \ln \frac{t_f}{t_0}$$

De forma general, puede considerarse que la deformación principal mínima en el plano de la lámina es prácticamente nula tras la estricción, se estima que este valor es aproximadamente el que corresponde a la fractura, esto es, $\varepsilon_{2f} = \varepsilon_{2n}$ (ver figura 38). En este caso, no se considera la obtención del FLC, la deformación principal mínima será la última registrada por ARGUS para el punto en el que se inicia el fallo.

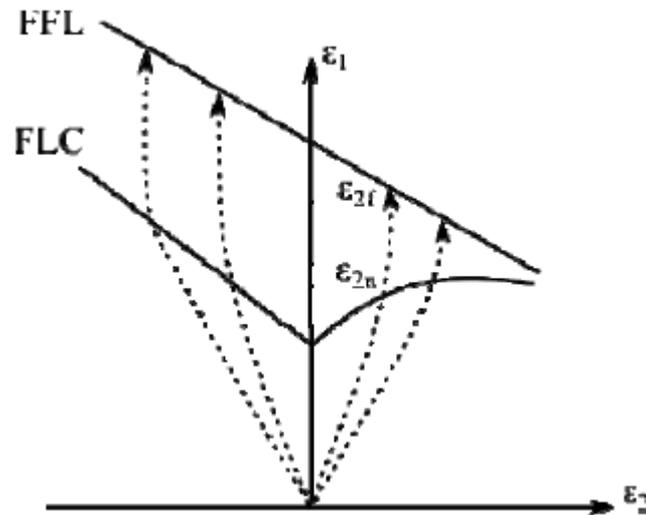


Figura 38 Aproximación de deformaciones principales mínimas para los puntos de fractura.

Finalmente, teniendo en cuenta la conservación de volumen en el proceso de deformación del material para cualquier estado de deformaciones se tiene que:

$$\varepsilon_{1f} = -\varepsilon_{2n} - \varepsilon_{3f}$$

En el presente trabajo sólo se han realizado fractografías para 4 probetas: para las dos probetas de PC (figura 39) con y sin rotación de herramienta, para la de PCL con rotación de herramienta (figura 40) y para la de PVC sin rotación de herramienta. Esto es así porque en el momento en que se produce el fallo en las otras dos probetas no se genera grieta sino otro tipo de fallo que se determinará en apartados posteriores de este documento.

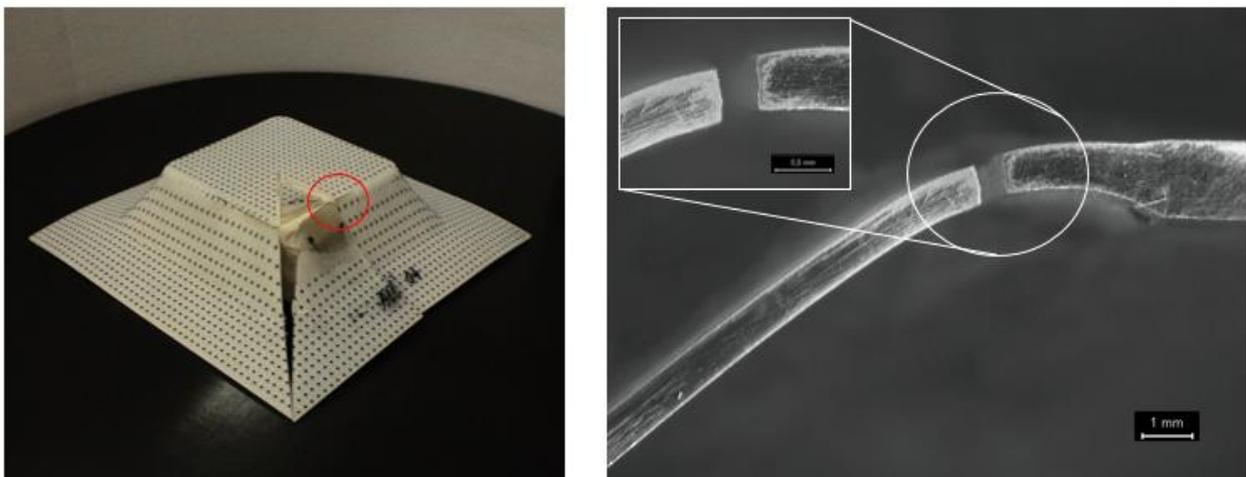


Figura 39 Fractografías de la probeta de PC sin giro de herramienta para la zona de deformación plana

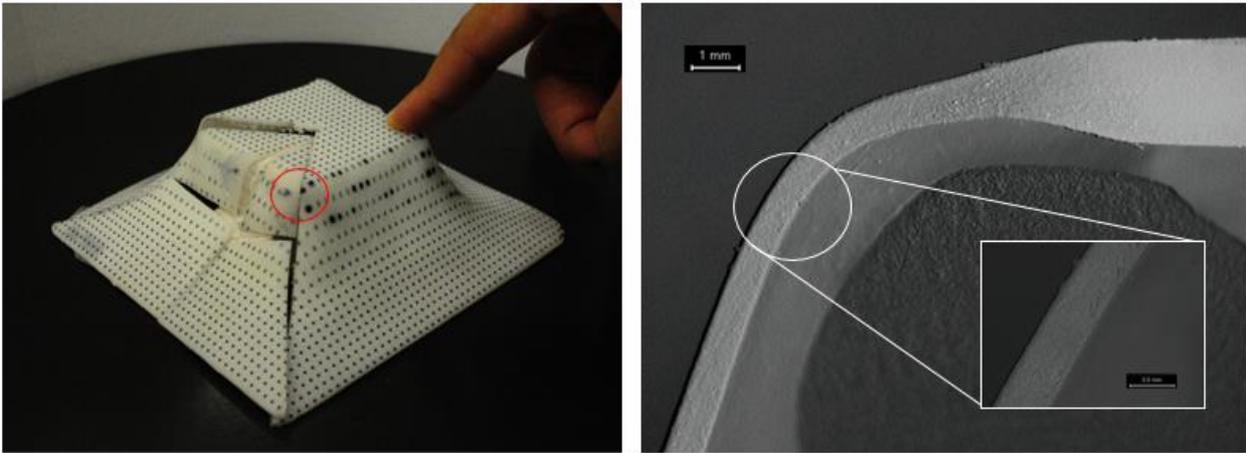


Figura 40 Fractografías de la probeta de PCL 2000 rpm para la zona de deformación biaxial

2.8 Curvas de fractura.

Una vez se han obtenido las deformaciones a las que se produce la fractura y se han integrado en el FLD previamente generado con los datos extraídos del análisis en ARGUS, se decide estimar cuales son las deformaciones de los puntos intermedios en los que se produce la fractura. Esto es, se conoce la fractura en deformación plana y en deformación equibiaxial pero no en todos aquellos puntos intermedios. Con tal fin se decide crear una recta de ajuste lineal entre las dos zonas.

Con estos resultados integrados en el FLD, ver figura 41, se completa toda la información que se puede extraer con los ensayos realizados en lo relativo a dicho diagrama, es decir, puede conocerse el comportamiento del material en la zona de deformación equibiaxial hasta deformación plana (desde $\beta = 1$ hasta $\beta = 0$).

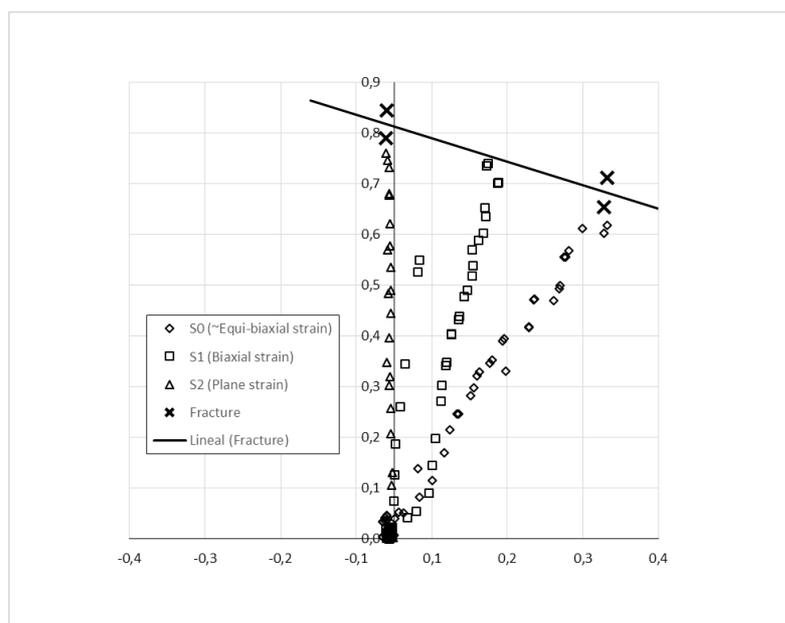


Figura 41 FLD de PC 2000 rpm con los datos de fractura (puntos y recta de ajuste)

2.9 Análisis de estados de deformación mediante secciones.

Para finalizar el desarrollo experimental detallado se va a comentar una herramienta muy útil que proporciona el software de ARGUS para analizar los resultados de deformación de la probeta. Aunque ya se han utilizado anteriormente secciones para extraer sus datos y tratarlos en Excel, en el software ARGUS hay distintos modos de visualizar la información de las secciones para facilitar su comprensión.

Como se ha mencionado anteriormente en el documento es posible visualizar la evolución de deformaciones principales máximas (mínimas) y otras variables a lo largo de la sección. Con esta gráfica, el FLD y conociendo la geometría deformada de la probeta con sus distintas zonas de diferente estado de deformación se pueden construir los resultados con el fin de analizar los parámetros más importantes que han podido intervenir en el proceso de deformación SPIF.

Se van a mostrar las evoluciones de deformación principal máxima en dos zonas distintas de la probeta con el objetivo de mostrar la utilidad de realizar secciones en el estudio de las deformaciones. La figura 42 muestra las evoluciones de la deformación principal máxima (en color rojo) y mínima (en color azul) a lo largo de la sección realizada en la probeta de PC 2000 rpm que pasa por la zona de deformación biaxial. Símil para la figura 43 pero por la zona de deformación plana, observándose que la deformación principal mínima se mantiene constante y prácticamente nula.

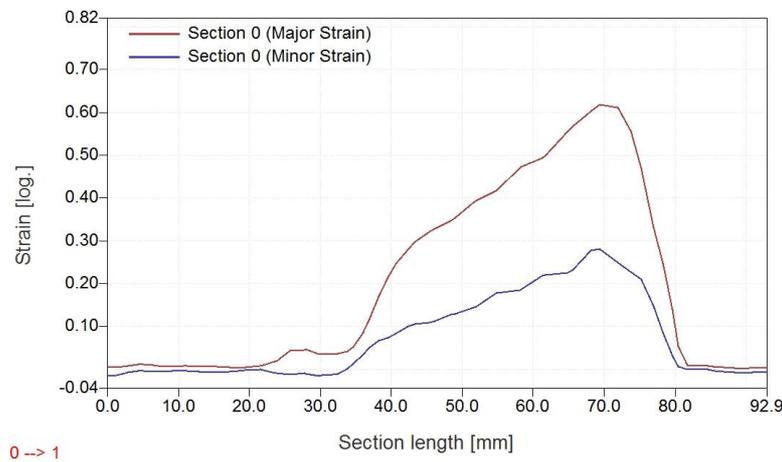


Figura 42 Evolución de deformaciones principal máxima y mínima en la sección de deformación biaxial para el PC 2000 rpm

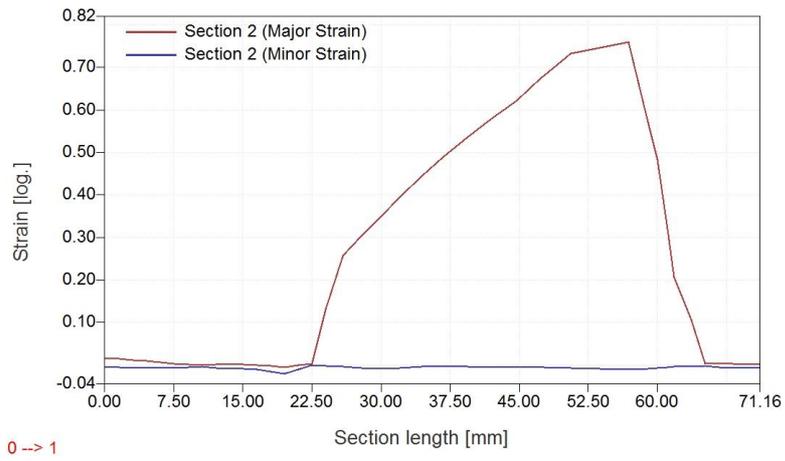


Figura 43 Evolución de deformaciones principal máxima y mínima en la sección de deformación plana para el PC 2000 rpm

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se van a mostrar todos los resultados obtenidos en el proceso de desarrollo experimental. Por un lado, los FLDs donde se analizarán las deformaciones alcanzadas en la fractura por los distintos materiales ensayados así como la evolución de las deformaciones a lo largo de las secciones características en las distintas probetas (PC sin giro de herramienta y con giro de herramienta a 2000 rpm, PVC sin giro de herramienta y PCL con giro de herramienta a 2000 rpm). Por otro lado, se analizarán los FLDs y modos de fallo de las dos probetas (PVC con giro de herramienta a 2000 rpm y PCL sin giro de herramienta) que no han alcanzado la fractura. Finalmente y de forma complementaria al análisis cuantitativo anterior, se analizarán cualitativamente las fracturas en las distintas fractografías realizadas a las probetas (PC 2000 rpm, PC sin giro de herramienta, PVC sin giro de herramienta y PCL 2000 rpm).

3.1 Análisis de resultados en FLDs

Los resultados han demostrado que la velocidad del husillo es el factor con mayor influencia en los resultados relativos a la fuerza de conformado, la temperatura máxima, la rugosidad superficial y la profundidad máxima alcanzada.

De forma general, la Tabla 2 resume los resultados de los ensayos en cuanto a profundidad máxima alcanzada, el ángulo máximo, si ocurrió el fallo y la temperatura máxima obtenida en cada caso.

Tabla 2 Resultados de ensayos

Material	Rotación de herramienta (S, rpm)	Profundidad de la probeta (mm)	Ángulo máximo de probeta (°)	¿Fallo?	Temperatura (°C)
PVC	Free	42.5	89.5	Sí, grieta	41.23
	2000	43	90	Twisting	53.96
PC	Free	29	79.8	Sí, grieta	47.37
	2000	32.5	82.5	Sí, grieta	70.56
PCL	Free	43	90	Pequeñas grietas y leve twisting	36.58
	2000	43	90	Pequeñas grietas	54.18

En la Tabla 3 se muestran las principales propiedades de los tres materiales ensayados.

Tabla 3 Características de los materiales ensayados

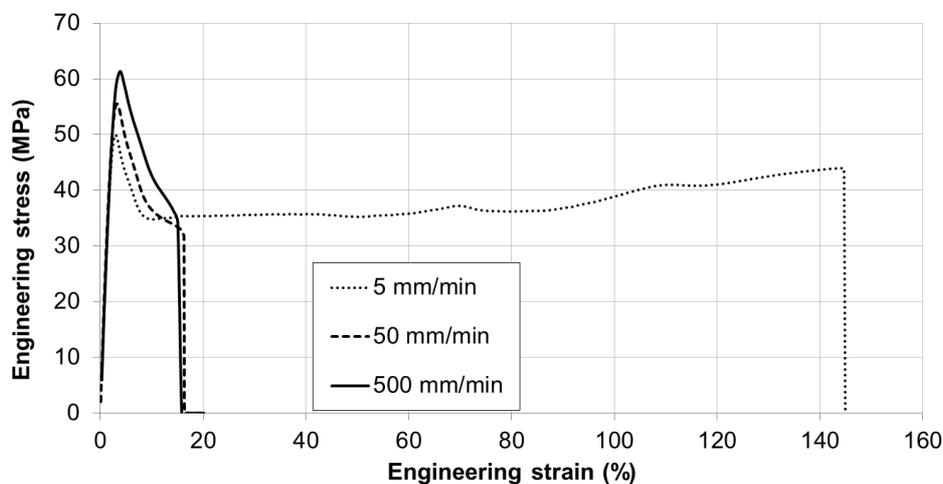
Material	E (MPa)	S _y (MPa)	e _y (%)
PVC	2696	55.52	3.20
PC	2344	64.32	5.87
PCL	n/a	15.20	12.20

Por otro lado, en la Tabla 4 se ha agregado toda la información obtenida, tanto de las fractografías como de los FLD medidos con ARGUS, de las distintas probetas. Se puede observar que las mayores deformaciones se producen para la probeta de PVC, donde la rotación de herramienta aumenta la deformación en torno a un 10%. De la misma forma, en el PC se observa el mismo efecto de la rotación de herramienta pero en este caso las deformaciones son menores que en el PVC (un 20% aproximadamente). El PCL presenta un nivel de deformaciones mayor en la probeta ensayada sin rotación de herramienta, lo cual podría explicarse debido a la temperatura que se alcanza cercana a la temperatura de transición vítrea del material que podría inducir al fallo por twisting o quemado de meros antes de alcanzar deformaciones más altas.

Tabla 4 Deformaciones principales obtenidas (fractografías y FLD Argus)

Probeta	Rotación de la herramienta (rpm)	Deformación Fractura (ϵ_1, ϵ_2)		Deformación máxima en FLD (ϵ_1, ϵ_2)	
		DP	DB	DP	DB
PC	Free	(0.75, 0.00)	(0.67, 0.22)	-	-
	2000	(0.84, 0.00)	(0.71, 0.28)	-	-
PVC	Free	(0.91, -0.01)	(0.86, 0.27)	-	-
	2000	-	-	(1.04, -0.01)	(0.86, 0.30)
PCL	Free	-	-	(0.91, 0.05)	(0.80, 0.26)
	2000	(0.88, 0.05)	(0.80, 0.30)	-	-

La Figura 44 ilustra la respuesta del material de PVC cuando se somete a una carga uniaxial simple a diferentes velocidades y temperaturas de ensayo. Como se puede ver, estas pruebas experimentales muestran que para velocidades de ensayo más altas, la tensión de fluencia y el módulo de Young aumentan mientras que el valor de deformación en la fractura del material se reduce, es decir, la conformabilidad es inferior. Por lo tanto, aumentar las velocidades de avance durante la fabricación de una pieza en SPIF disminuiría la conformabilidad de la lámina. Con el fin de explorar el peor escenario con el que fabricar una pieza de los materiales estudiados mediante SPIF y evaluar la capacidad de esta metodología, se estableció una velocidad de avance de 2250 mm/min en todos los ensayos SPIF descritos a continuación. Además, cuando la temperatura de ensayo aumenta, el módulo de Young y el límite de elasticidad disminuyen su valor. Este comportamiento dependiente de la velocidad de deformación y de la temperatura es muy común para los materiales termoplásticos. Se ha obtenido un comportamiento similar al del PVC, en sentido cuantitativo, en el caso de PC y PCL.



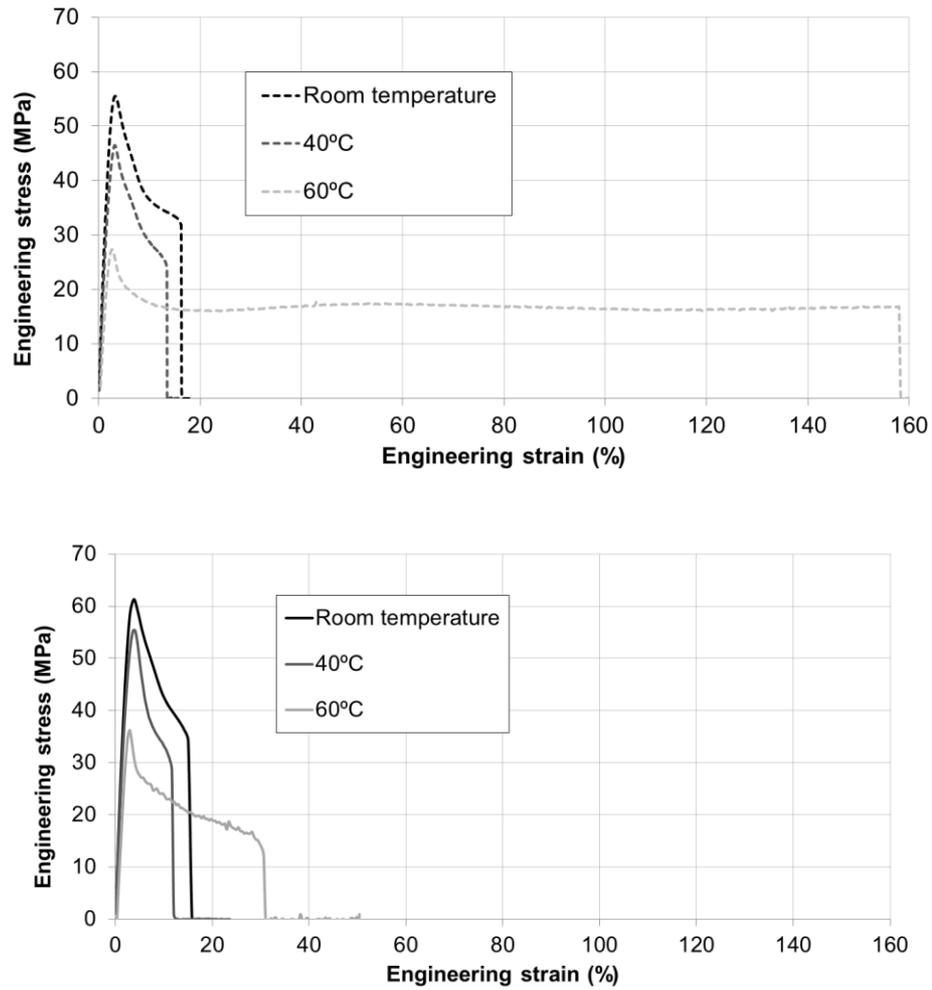


Figura 44 Ensayo de tracción para PVC: (a) Página anterior, bajo diferentes velocidades de deformación y temperatura constante en ambiente; (b) Arriba, a 50 mm/min y varias temperaturas ambiente y (c) Abajo, a 500 mm/min y varias temperaturas ambiente

3.1.1 Ensayos SPIF cuyo fallo genera fractura

3.1.1.1 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PC sin giro de herramienta

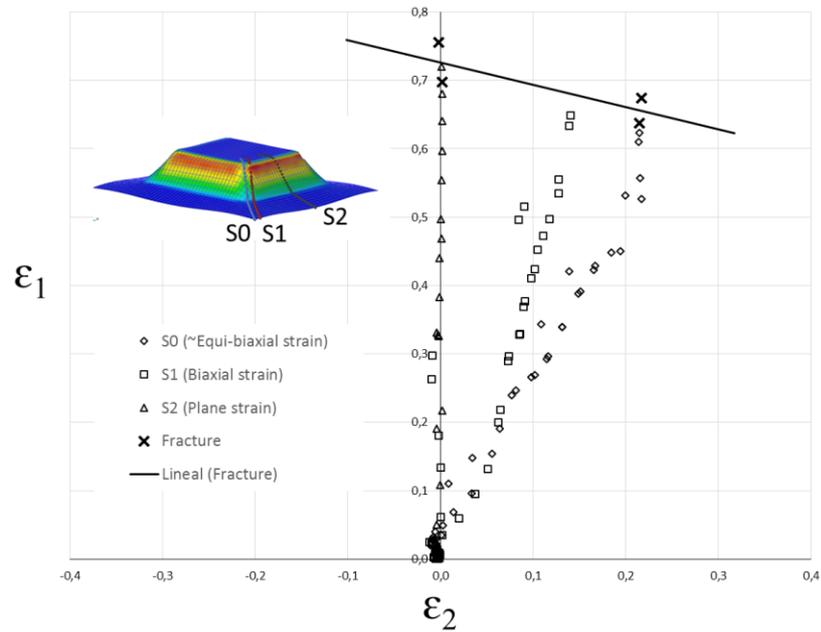


Figura 45 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PC sin giro de herramienta

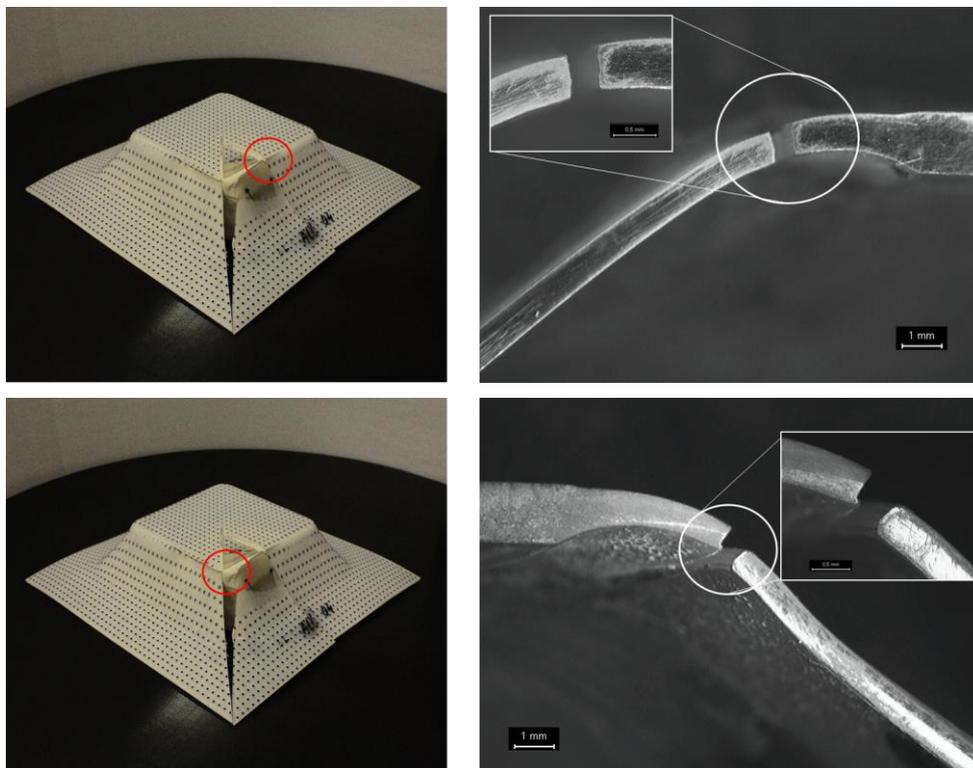


Figura 46 Fractografías del ensayo SPIF de la probeta de PC sin giro de herramienta: deformación plana (arriba) y deformación biaxial (abajo)

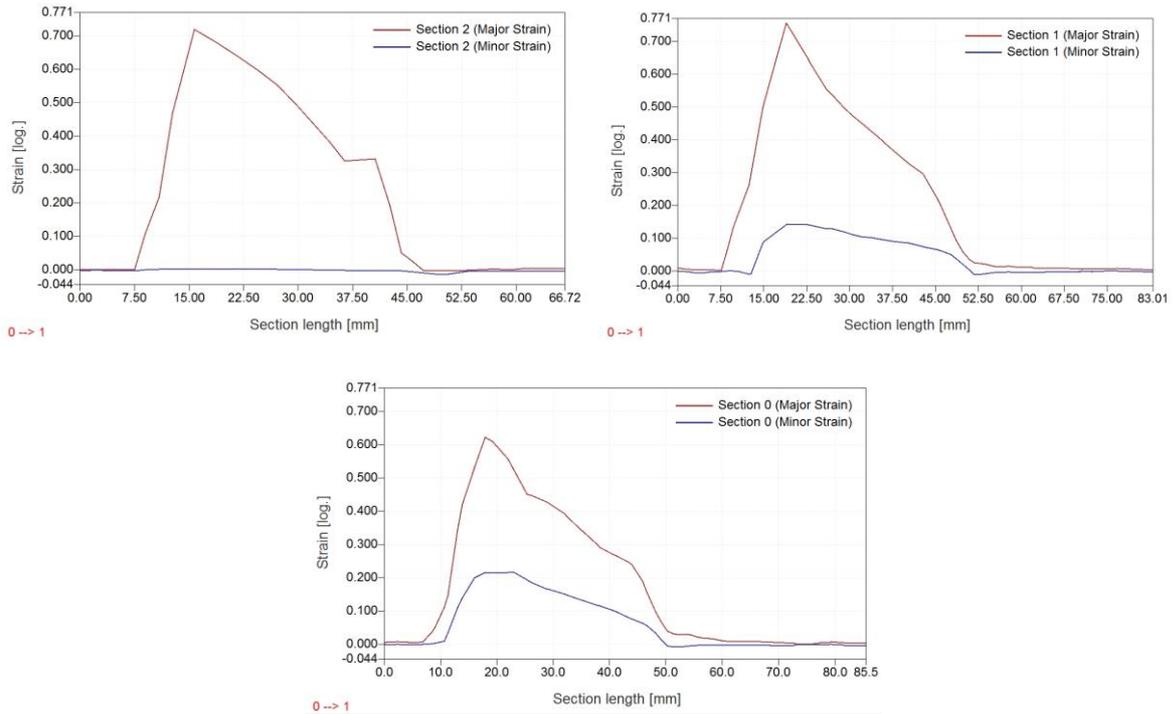


Figura 47 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)

Se puede observar para la probeta de PC sin giro de herramienta que las deformaciones que se alcanzan en la rotura son del orden de 0.75 en deformación plana y del orden de 0.65 para deformación biaxial. Se ha comprobado que son del orden de las obtenidas en otros estudios para el mismo material y bajo condiciones similares. Ver figura 45.

En este caso, el material ha fallado por fractura localizada en la zona donde se encuentran las mayores deformaciones, la arista de la base superior de la pirámide truncada como se observa en la figura 46. La figura 47 muestra la evolución de las deformaciones para las distintas secciones y, efectivamente, se comprueba que el mayor nivel de las mismas se da en la zona del borde donde además se produce la indentación de la herramienta, como puede comprobarse en las fractografías.

3.1.1.2 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PC con giro de herramienta a 2000 rpm

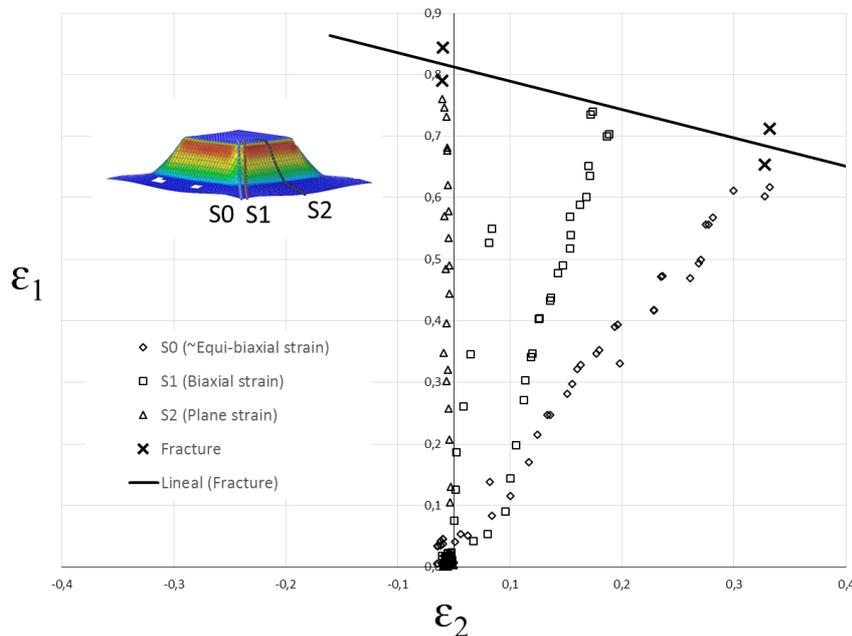


Figura 48 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PC con giro de herramienta a 2000 rpm

En el caso de la probeta de PC con giro de herramienta a 2000 rpm se observa un comportamiento similar a la de la probeta de PC sin giro de herramienta pero en este caso el nivel de deformación en la rotura es mayor en torno a un 10%, alcanzando así valores de 0.83 en la zona de deformación plana y de 0.7 en la de deformación biaxial. Ver figura 48.

Al igual que antes la rotura se produce por fractura generando una grieta a lo largo del borde de la pirámide como en el caso anterior.

En este caso, la rotación de herramienta hace que la temperatura de la zona de contacto con la misma sea mayor produciendo así mayores deformaciones para una misma fuerza aplicada. Con una diferencia de unos 20-25 °C más entre el proceso SPIF con giro de herramienta con respecto al mismo proceso sin giro.

Además como muestra la figura 49, la evolución de las tensiones en las diferentes secciones creadas en las zonas de deformación plana, equibiaxial y cuasi equibiaxial muestran que, aunque se producen niveles mayores de deformación, la evolución de las mismas es análoga a las que se producen en la probeta sin giro de herramienta.

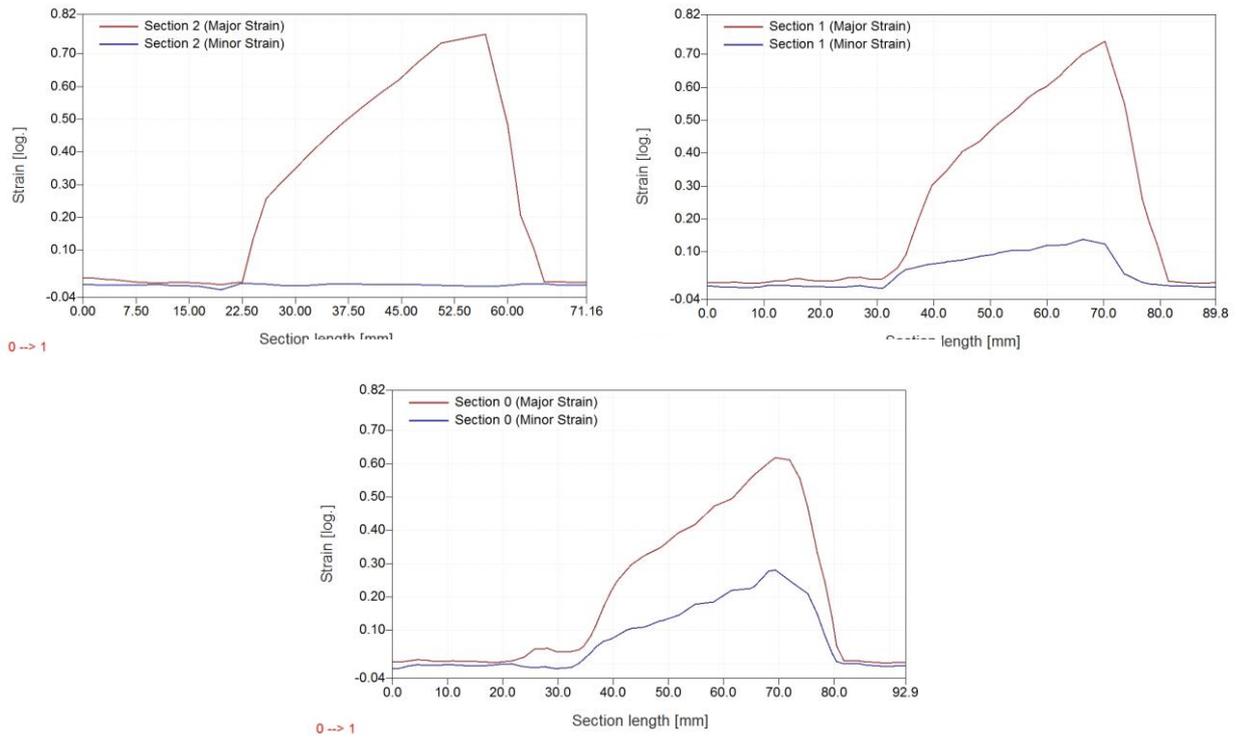


Figura 49 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)

3.1.1.3 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PVC sin giro de herramienta

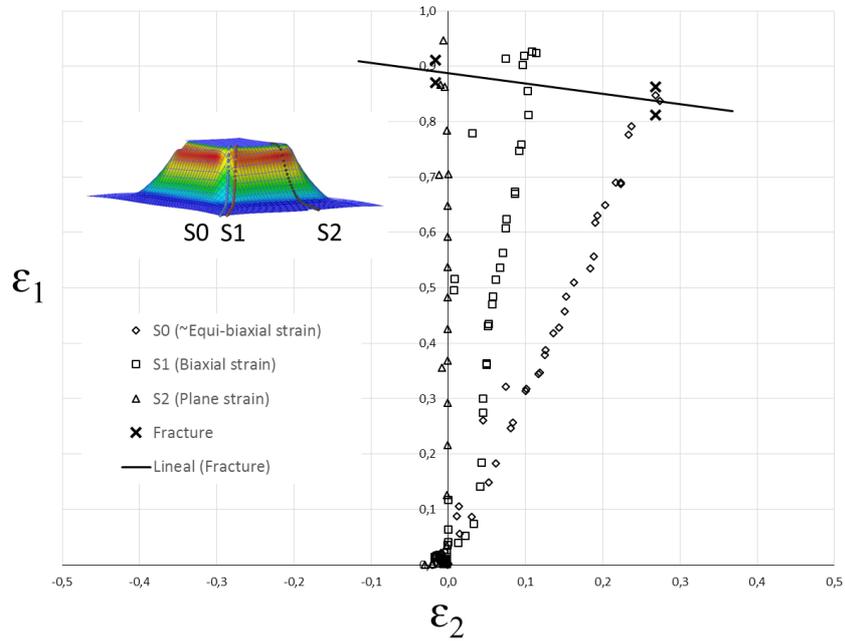


Figura 50 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PVC sin giro de herramienta

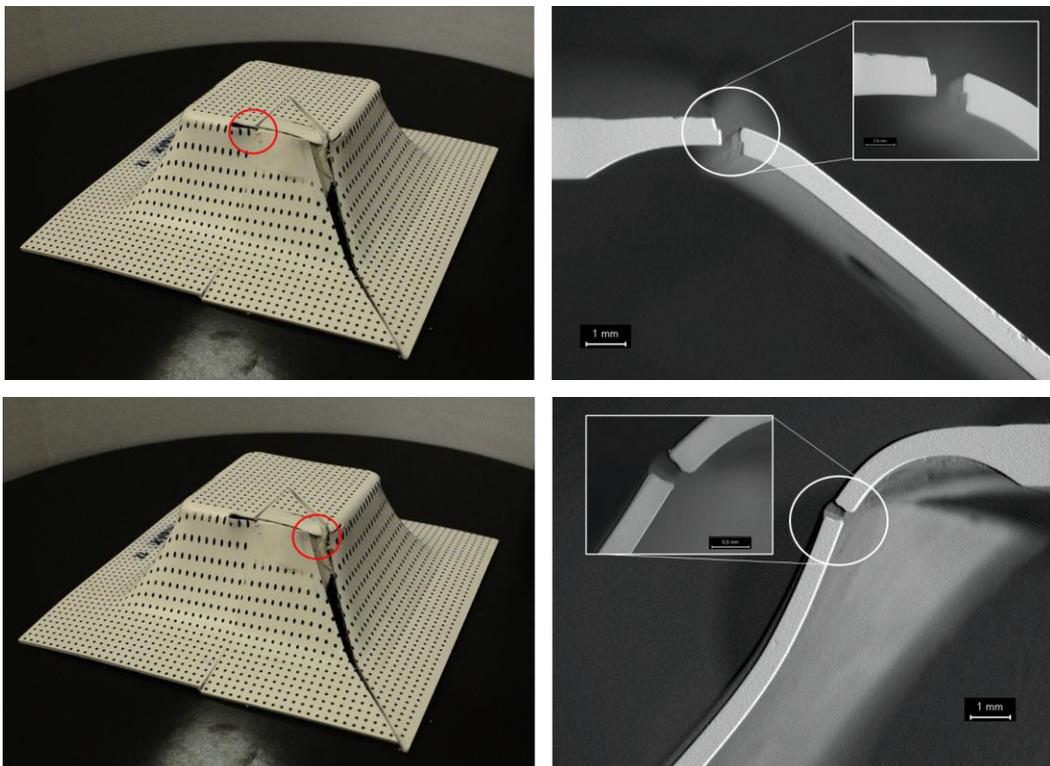


Figura 51 Fractografías del ensayo SPIF de la probeta de PVC sin giro de herramienta: deformación plana (arriba) y deformación biaxial (abajo)

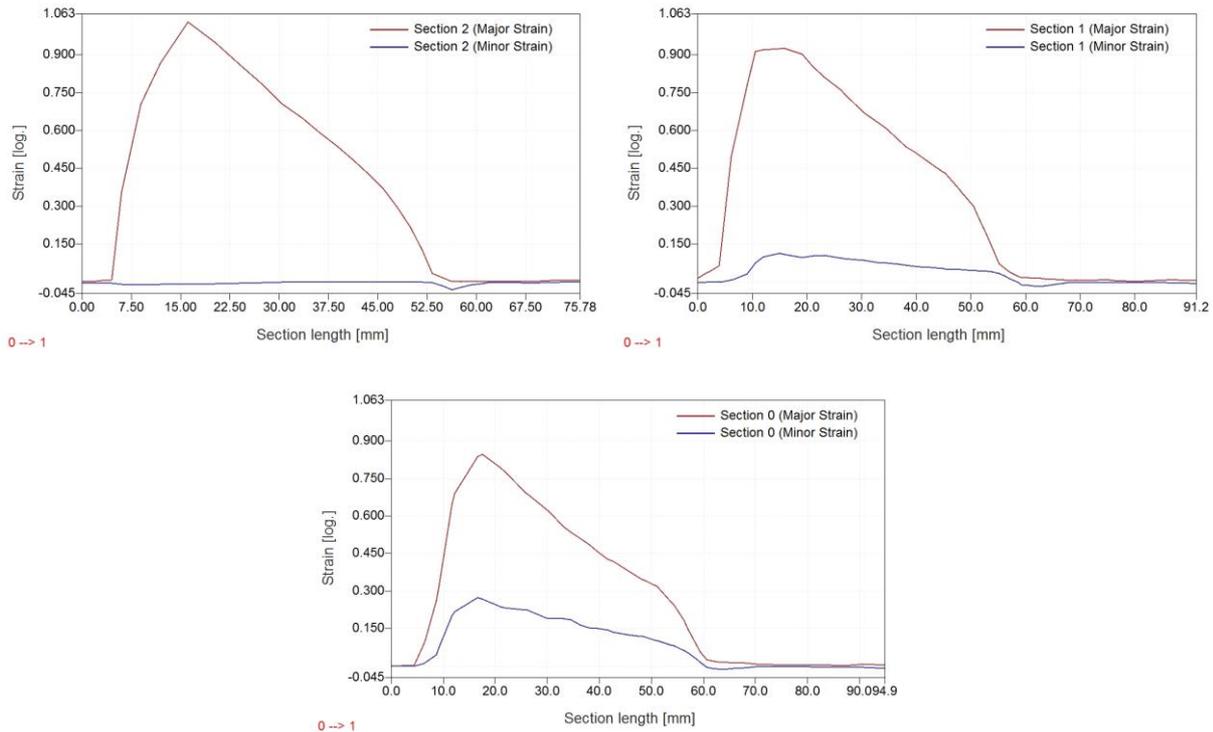


Figura 52 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)

En la probeta de PVC sin giro de herramienta se alcanzan deformaciones fractura de 0.9 en la zona de deformación plana y de 0.85 en la zona de deformación equibiaxial. Aunque en comparación con el caso de PC el comportamiento es muy similar en este caso las deformaciones son mayores en torno a un 10%, comparando entre sí a las probetas de ambos materiales generadas con giro de herramienta. Ver figura 50.

Al igual que en PC en este caso de PVC sin giro de herramienta la probeta ha fallado por fractura, ver figura 51, es decir, se ha generado una grieta en la zona de deformaciones principales más altas, que coinciden efectivamente con la zona central de la arista de la base superior de la pirámide truncada. Cabe decir también, que el efecto de la indentación de la herramienta en la zona de fractura es considerable y que en el borde de la grieta se produce un leve efecto de recrecido, donde el espesor de la pared en la zona del borde de la fractura es mayor que el espesor de la pared de la probeta en la zona próxima al borde de grieta, esto puede ser causado por las deformaciones elásticas residuales que persisten tras la fractura del material.

Finalmente, cabe decir que las temperaturas alcanzadas en el proceso de conformado del PVC son levemente inferiores que las del PC, aunque en el caso de giro de herramienta son considerablemente inferiores con aproximadamente un 25% menos.

3.1.1.4 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PCL con giro de herramienta a 2000 rpm

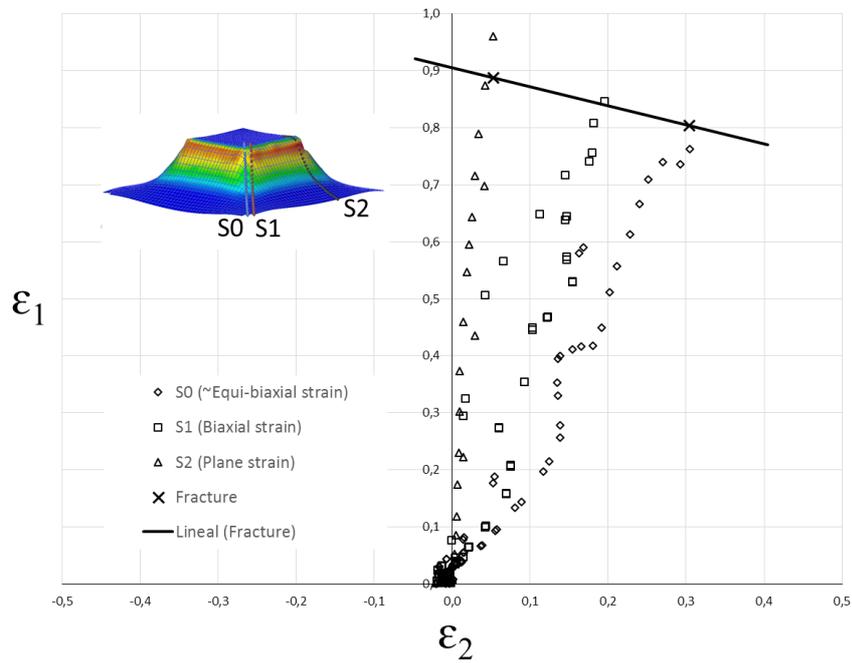


Figura 53 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PCL con giro de herramienta a 2000 rpm

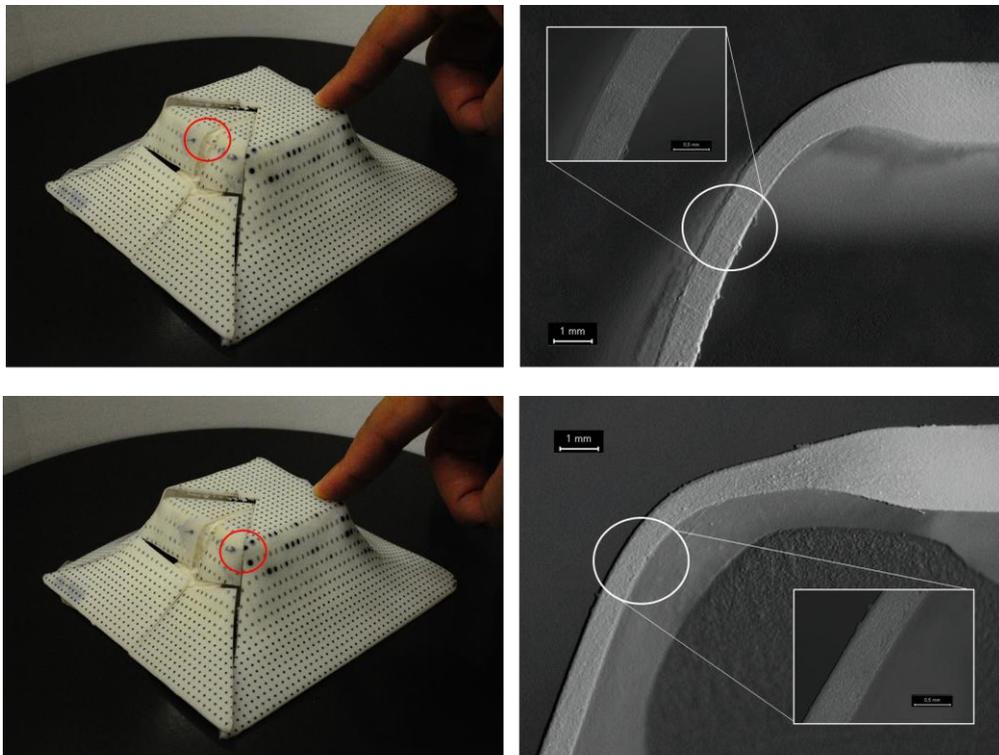


Figura 54 Fractografías del ensayo SPIF de la probeta de PCL con giro de herramienta a 2000 rpm: deformación plana (arriba) y deformación biaxial (abajo)

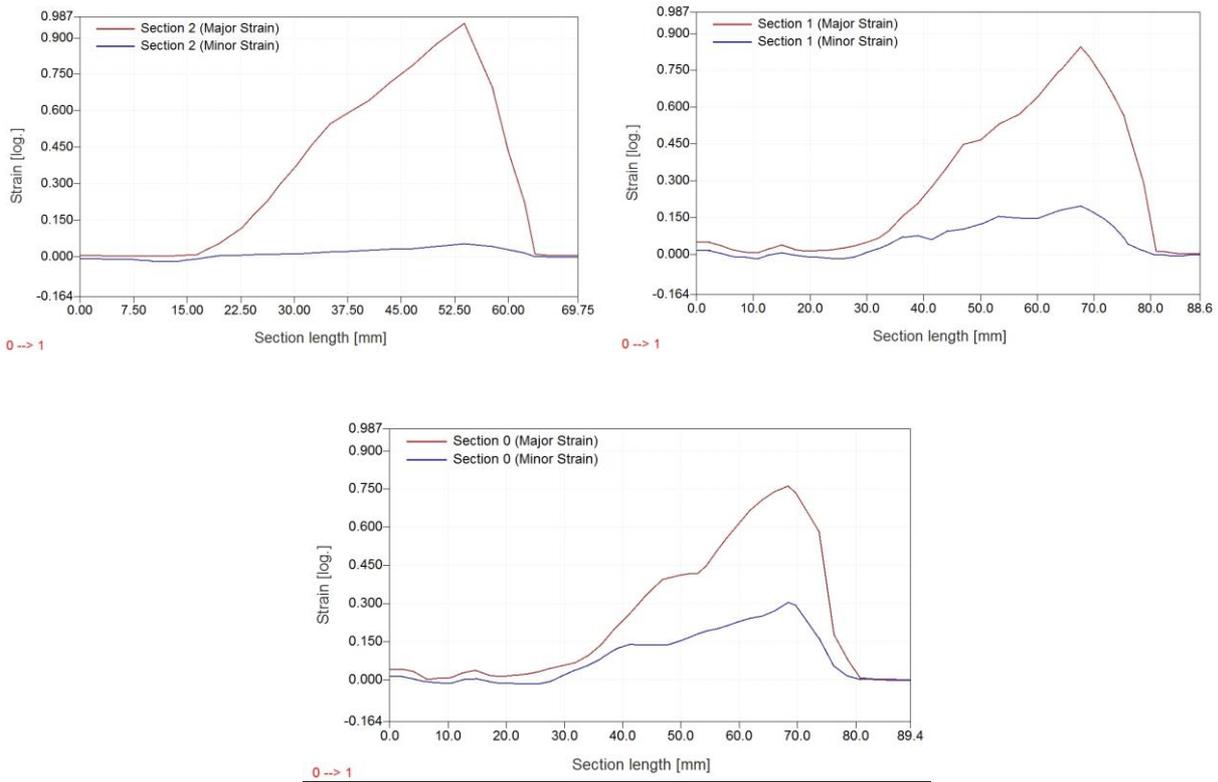


Figura 55 Evolución de las deformaciones principales en en las secciones: DP (arriba izquierda), Cuasi DB (arriba derecha) y DB (abajo)

En la probeta de PCL con giro de herramienta pueden observarse deformaciones de hasta 0.9 en la rotura para la zona más crítica que concretamente es la zona de deformación plana. Por otro lado, las deformaciones alcanzadas en la zona de deformación biaxial alcanzan 0.8. Esto es, aproximadamente un 10% superior si es comparada con las probetas de PC y PVC, ambas con giro de herramienta. Ver figura 53.

Aunque en este caso la probeta no ha fallado con una grieta de gran dimensión como en los casos anteriores, ver figura 54, con el fin de poner medir el nivel de deformación en el que se produce el fallo (microgrietas), se ha decidido realizar una fractografía en las zonas más características para extrapolar la FFL del material. Esto es, se han medido las deformaciones en la zona de deformación plana y en la zona de de deformación biaxial. Obteniendo los resultados anteriores.

En la probeta de PCL, es posible que la generación de microgrietas en el fallo se deba a que los meros que forman la placa son más grandes que en PC y PVC presentando así obstáculos en el crecimiento de la grieta. Además, la mayor sensibilidad a la temperatura de este material (con un punto de fusión en torno a los 60 °C) puede provocar que el material sea más propenso a un fallo por fusiones puntuales de meros en el material que a un fallo por fractura dúctil. En el proceso SPIF se llegó a medir 54 °C, por lo que pueden haberse alcanzado incluso los 60 °C de forma puntual, fundiendo así el material y modificando su estructura lo cual puede influir a su vez en posteriores pasadas de la herramienta.

3.1.2 Ensayos SPIF cuyo fallo no genera fractura

3.1.2.1 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PVC con giro de herramienta a 2000 rpm

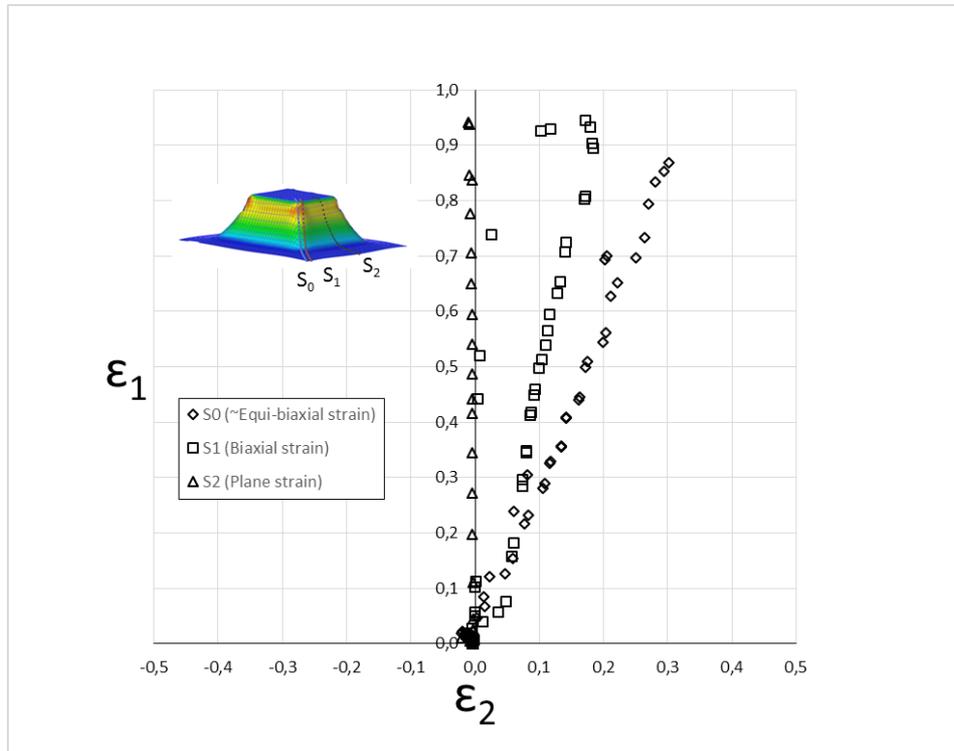


Figura 56 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PVC con giro de herramienta a 2000 rpm

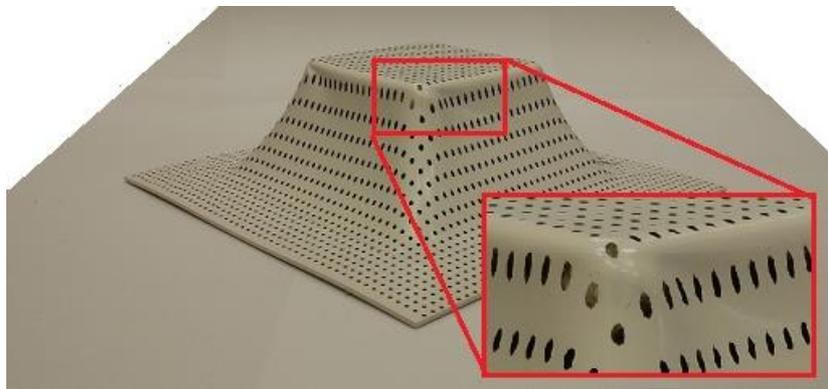


Figura 57 Fallo por twisting de la probeta de PVC con giro de herramienta a 2000 rpm

En el caso de la probeta de PVC con giro de herramienta el fallo en lugar de fractura dútil con grieta resultó en twisting. El nivel de deformaciones alcanzado (a pesar de no haberse realizado fractografía) alcanza 0.95 en deformación plana y 0.85 en deformación biaxial para las secciones medidas en ARGUS. Ver figura 56. La temperatura de transición vítrea de un PVC se encuentra en torno a los 80 °C y la temperatura medida en el proceso SPIF alcanza los 70 °C lo cual pudo provocar el fallo de material por twisting en lugar de fractura dútil. Es posible que la proximidad a la temperatura de transición vítrea durante el proceso SPIF produzca un descenso del módulo elástico del material suficiente como para provocar deformaciones plásticas en aquellas zonas donde hay mayor concentración de deformaciones, en este caso en la pared lateral de la probeta. Ver figura 57.

3.1.2.2 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PCL sin giro de herramienta

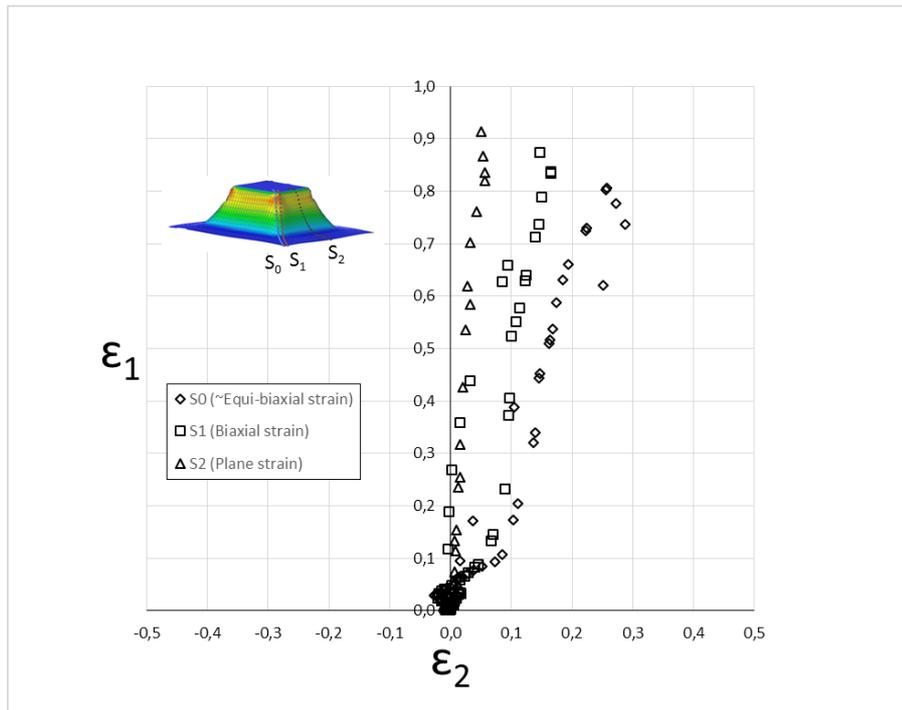


Figura 58 FLD del ensayo SPIF de la probeta de PCL sin giro de herramienta

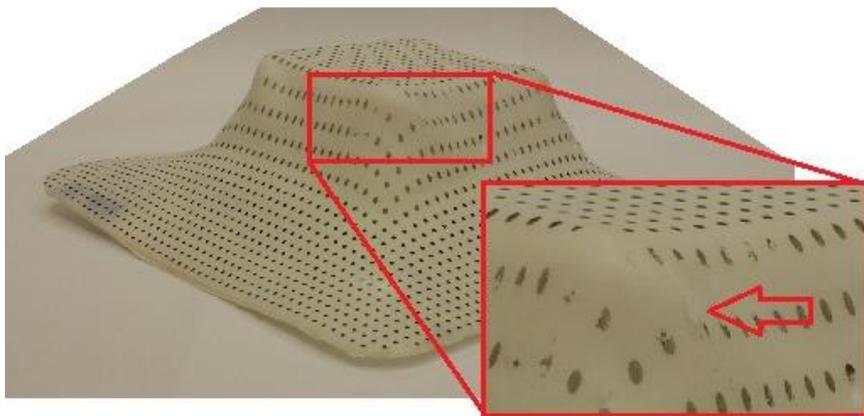


Figura 59 Fallo por grieta y twisting de la probeta de PLC sin giro de herramienta

Como se ha comentado brevemente para la probeta de PCL con giro de herramienta, la microestructura del PCL con el que se ha fabricado la placa y la baja temperatura de transición vítrea parecen ser las causas de que el fallo en estas probetas no genere grandes grietas sino que se produce en zonas concentradas donde el material parece haberse quemado. No obstante, la diferencia de temperatura alcanzada en esta probeta durante el proceso SPIF (36 °C) dista mucho de los 54 °C alcanzados en la probeta con giro de herramienta por lo que la influencia de la temperatura es menor. Ver figura 58.

Por otro lado, cabe decir que los efectos del fallo por twisting son ligeramente más apreciables que en la probeta deformada con giro de herramienta. Ver figura 59.

4 APROXIMACIÓN A LA SIMULACIÓN MEF DE UN PROCESO SPIF

En el presente capítulo se va a desarrollar el trabajo realizado en cuanto a la aproximación a la simulación mediante el método de elementos finitos de procesos SPIF en DEFORM 3D.

En primer lugar, se hará una breve introducción a la simulación explicando brevemente las bases de funcionamiento de la herramienta DEFORM 3D y su aplicabilidad a procesos de conformado incremental como es el caso de SPIF. Posteriormente, se describirán los parámetros más relevantes de la simulación, la forma de introducir la geometría y el movimiento de la herramienta. Además, se comentará uno de los principales problemas encontrados a la hora de simular polímeros: adaptar la ley de comportamiento haciendo posible una simulación con un compromiso óptimo entre exactitud y tiempo. Por otro lado, se darán indicaciones de cómo se ha realizado la malla de elementos finitos. No pretende ser un manual de instrucción de la herramienta sino un repositorio de los detalles más significativos a la hora de simular un proceso SPIF de un polímero.

Otro de los puntos más destacables en cuanto a futuros trabajos de simulación de procesos de conformado de polímeros será la descripción de los diferentes problemas encontrados en el planteamiento del problema en DEFORM 3D. Dichos problemas serán recogidos en el presente documento en tanto que el autor de este trabajo se ha ido encontrando con ellos en el proceso.

Finalmente, se indicarán las posibles vías de trabajo para la simulación de polímeros de cara a futuros trabajos.

4.1 Introducción a la simulación de un proceso de conformado de conformado en DEFORM 3D

El software comercial DEFORM 3D es una herramienta que permite analizar la deformación de materiales, tratamientos térmicos, mecanizado y procesos de unión mecánica en forma de simulación evitando así un alto coste de tiempo y dinero en el desarrollo de experimentos reales. Este ahorro de tiempo y coste viene acompañado de una mejora en el conocimientos de los procesos ya que prácticamente todos los parámetros involucrados son modificables y se puede medir su influencia por lo que la flexibilidad del análisis de diferentes diseños es muy alta.

DEFORM 3D es un programa cuyo análisis se basa en el Método de los Elementos Finitos bajo condiciones de alta deformación. El hecho de que los procesos para los que se utiliza este software sean de alta deformación tiene implicaciones en el propio modelo matemático así como en el cálculo empleado para su resolución.

Al igual que otros paquetes de *software* de cálculo se divide en tres módulos: preprocesador, motor de análisis y el posprocesador. En el primero se modela el problema, el segundo realiza los cálculos de la simulación y el tercero permite el análisis de los resultados.

El proceso de simulación de un ensayo de SPIF podría resumirse en las siguientes tareas:

1. Definición del proceso de conformado
 - 1.1 Definición de la geometría inicial de la probeta, el punzón y el prensachapa.
 - 1.2 Definición del tipo de material de cada pieza (probeta, punzón y prensachapa)
 - 1.3 Definición del mallado MEF de la probeta.
 - 1.4 Posicionado de la probeta, herramienta y prensachapa.
 - 1.5 Definición de las condiciones de contorno y de contacto entre las piezas.
 - 1.6 Definición del movimiento de la herramienta.
 - 1.7 Definición de la ley de comportamiento del material de la probeta.
 - 1.8 Definición de los parámetros de la simulación (Time step, tipo de iteración, etc.)
2. Carga de los datos para la simulación (generación de database) y lanzamiento de la misma.
3. Seguimiento de la simulación. (Volver al punto 1 en caso de efectos indeseables en una etapa del proceso: roturas prematuras del material, deformaciones incongruentes con la realidad, etc.)
4. Análisis de los resultados en el posprocesador.

El tipo de simulación empleado en este tipo de conformado en frío ha sido langrangiana incremental cuyas soluciones para cada etapa se calculan mediante una iteración por el método de Newton-Raphson y donde la formulación FEM en el solver está formada por una matriz dispersa. Mediante el M^o de Newton Raphson se consigue convergencia en el cálculo de una forma más rápida, sin embargo, tiene la

desventaja de que el aseguramiento de dicha convergencia es más crítico bajo ciertas condiciones. El planteamiento anterior permite el manejo de un gran número de elementos con un coste computacional razonable y un uso de memoria optimizado. Con todo bajo ciertas condiciones, que suceden frecuentemente, el tiempo de convergencia y el número de iteraciones, por tanto, es muy elevado haciendo la simulación muy ineficiente. Se necesita ir revisando la simulación frecuentemente para modificar los parámetros necesarios y que el proceso de simulación continúe.

4.2 Geometría del problema

Una vez se ha generado el directorio donde se guardarán todos los archivos de la simulación, se abre el preprocesador y se comienza a modelar el problema de estudio. Como siempre se generan los elementos que interactúan en el proceso. En primer lugar, la probeta que mediante el módulo de modelado que ofrece DEFORM 3D llamado “Geo Primitive...” se crea una lámina de 150x150x2 mm (“Workpiece”). Al ser una pieza tan simple dicho módulo permite modelarla con los parámetros que ofrece, al igual que a la herramienta o punzón. El punzón se modelará como una esfera perfecta de radio 5 mm. Al ser una pieza curva, “Geo Primitive...” realiza una discretización de su superficie, cuanto más fina sea la discretización, más fidelidad tendrá el modelo del punzón con respecto a la realidad. En el presente análisis el punzón (con denominación “Top Die”) de 10 mm de diámetro constaba de 82080 polígonos en su superficie, por lo que presenta una buena aproximación con respecto a una esfera perfecta.

Finalmente, aunque en los últimos intentos de simulación no intervino, el prensachapa (“Bottom Die”) se ha definido en CATIA V5, como un marco de 150x150x10 mm con un interior de 120x120x10 mm y cuyas esquinas interiores tienen un radio de 10 mm. Ver figura 60 y figura 61. Al importar la geometría desde CATIA V5 a DEFORM 3D se emplea el formato .STL que discretiza la superficie de la pieza en triángulos que modifican su tamaño conforme a los requerimientos de curvatura del modelo. La tolerancia geométrica para los modelos en .STL se ha definido en DEFORM 3D con el valor de 1e-5 mm.

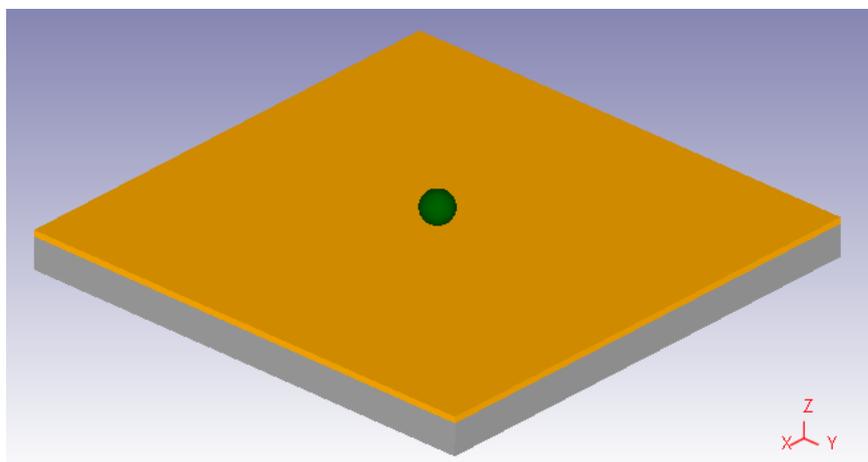


Figura 60 Setup de la simulación MEF del proceso SPIF para la probeta de PC sin giro de herramienta (1)

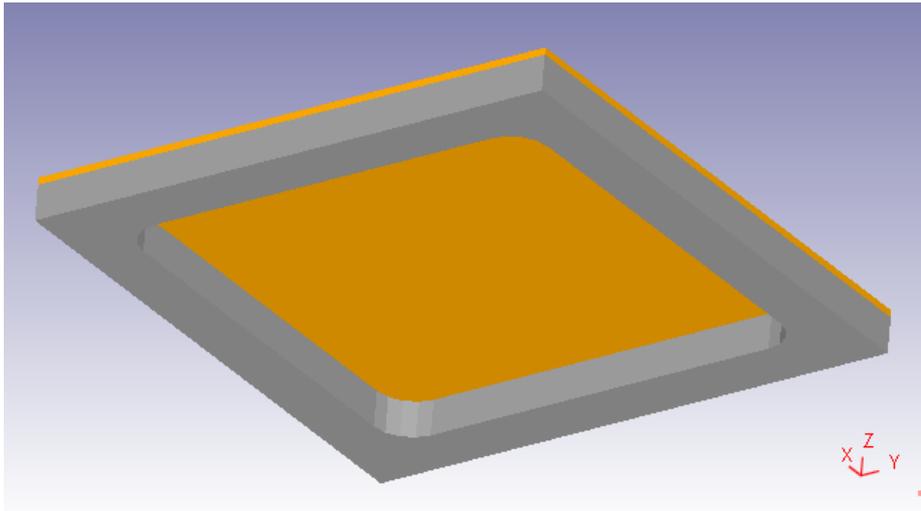


Figura 61 Setup de la simulación MEF del proceso SPIF para la probeta de PC sin giro de herramienta (2)

4.3 Parámetros de la simulación

Tras introducir la geometría del ensayo, es necesario introducir parámetros que complementan a lo anterior. Esto es, el tipo de material del que están constituidos los elementos del ensayo y la temperatura a la que se realiza. Estos parámetros son definidos tal que el punzón y el prensachapa se consideran elementos infinitamente rígidos y la pieza posee comportamiento elastoplástico, el cual se definirá en el apartado 5.5. Además, la temperatura de ensayo se ha considerado 20°C que se aproxima de forma razonable a las condiciones de laboratorio. Cabe decir que salvo variaciones drásticas de esta temperatura, el material, en este caso un polímero no verá afectado su comportamiento (el módulo de Young E podría disminuir al aumentar la temperatura).

Por otro lado, en cuanto a los parámetros de control la simulación se han establecido varios “time step” que han definido las etapas de cálculo en las sucesivas simulaciones de prueba hasta llegar al más adecuado. Como se verá en el siguiente apartado, la trayectoria se ha definido en cuatro dimensiones, es decir, para cada instante de tiempo el punzón ocupará una posición concreta. La trayectoria se ha discretizado para poder introducirla como dato en DEFORM 3D. A partir de dicha trayectoria la simulación es controlada en tiempo de forma que cada time step se realice una iteración de cálculo. Se comenzaron las simulaciones con time step de 0.05 s aproximadamente y por motivos que se mostrarán en el apartado 5.8.4 se bajó a un time step de 0.005 s. Lo anterior aumenta el tiempo de simulación ya que se realizan muchas más iteraciones para una misma trayectoria. Si se divide el tiempo total que tarda la herramienta en recorrer la trayectoria entre el time step obtenemos el número total de etapas de la simulación “number of steps”, que es de 127000 steps aproximadamente. Interesa que el tiempo de simulación sea el menor posible para que el análisis converja a una solución aproximada con una

exactitud aceptable. Por tanto, la elección de dicho time step como parámetro de control debe ser una solución de compromiso.

4.4 Movimiento de la herramienta

El movimiento de la herramienta ha sido generado mediante código PYTHON modificando las variables iniciales del mismo de forma que contengan la información del problema en estudio. Una vez modificado el código se ejecuta y se genera la información de la trayectoria en cuanto a las posiciones en 3D. Con la información de la trayectoria y la velocidad de avance del punzón que es la misma que en los ensayos experimentales (2250 mm/min) es posible estimar el instante de tiempo en el que el punzón estará en cada una de las posiciones de las trayectorias con el siguiente cálculo realizado en una hoja Excel auxiliar donde se recogerá la matriz de datos de posiciones (mm) – tiempo (s):

$$t_i = t_{i-1} + \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}}{2250/60} \text{ [s]}$$

Cabe decir que el final del movimiento de la herramienta no viene determinado en sí por el tiempo de simulación, sino que como éste se calcula a partir de la geometría lo que define el final de la simulación aquí expuesta es la condición inicial impuesta al ejecutar el código PYTHON que genera la trayectoria. Es decir, en el código empleado los ángulos iniciales y finales así como los diámetros generatriz y lado.

Una vez generada la matriz en Excel con los datos se importan a DEFORM 3D en el módulo “Movement”, donde el movimiento será de “Translation” y vendrá definido por “Function of time”. Ver figura 62.

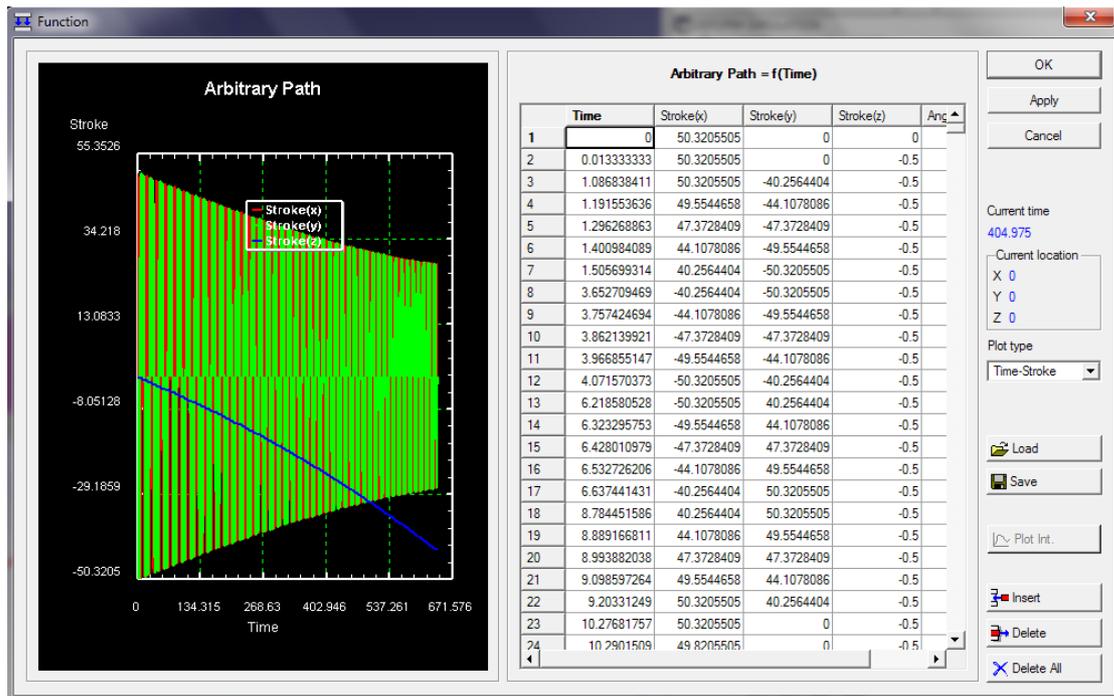


Figura 62 Datos de la definición del movimiento de la herramienta.

Es importante repasar que la trayectoria cargada concuerde con la que el punzón realiza gracias a la máquina de CNC, para ello se puede visualizar el movimiento de forma previa con la opción “Preview object movement”, dejando dos o tres “steps” y acelerando la visualización para comprobar efectivamente que es el movimiento adecuado.

Otro de los parámetros importantes del movimiento es la velocidad de rotación de la herramienta que para este caso de estudio es 0 rpm, es decir, se trata de un ensayo donde la herramienta no presenta giro con respecto a su eje y así viene por defecto en DEFORM 3D.

Errores frecuentes en la generación de la trayectoria pueden ser la no elección de los parámetros correctos (y sus unidades: mm, mm/min, °, etc.) en el código o la correcta actualización de la velocidad de avance (en las unidades adecuadas, en este caso, mm/s) en el Excel para calcular la matriz de posición y tiempo.

4.5 Ley de comportamiento

La definición del comportamiento del material con el que la probeta de la simulación se ha fabricado es de vital importancia y tiene fuertes implicaciones en la viabilidad y eficiencia de la simulación. Por el motivo anterior se expondrá en este apartado con razonable profundidad el comportamiento de un polímero y, en concreto, el del PC con el fin de que pueda servir de base para la comprensión del comportamiento de esta simulación y las de otros estudios que puedan derivar del presente trabajo.

La simulación se ha realizado con una probeta de policarbonato (PC). Se decidió en primera instancia realizar la simulación de la probeta de PC sin giro de herramienta ya que presentaba una menor deformación de la probeta en cuanto a la profundidad alcanzada por la misma en el fallo. Esto acortaría el tiempo de simulación con respecto a la probeta ensayada con giro de herramienta que presenta mayor profundidad y como a priori el objetivo era realizar una primera comparación entre un ensayo SPIF real y una simulación de SPIF se tomó como una decisión adecuada.

El PC es un material duro y tenaz comparado con otros polímeros, con un mecanismo de deformación relativamente complejo debido a la microestructura del material y a las distintas fuerzas de cohesión del material que intervienen en el mismo (enlaces covalentes y de Van der Waals). Además, la caracterización plástica de los polímeros, a diferencia de los metales, muestra que el punto de fluencia es muy sensible a las condiciones experimentales (velocidad de deformación, temperatura y presión hidrostática).

En general, el comportamiento de todas las clases de polímeros es hookeano antes del punto de fluencia. La deformación recuperable reversible antes del punto de fluencia, en el intervalo llamado elástico, es fundamentalmente el resultado de la flexión y alargamiento de los enlaces covalentes de la cadena principal del polímero. Esta parte de la curva de tensión-deformación puede también comprender el desenrollamiento recuperable de algunas cadenas del polímero. Después del punto de fluencia, el mecanismo predominante es el deslizamiento irreversible de las cadenas de polímero.

En la figura 63 se muestran los mecanismos de deformación de los materiales poliméricos, los cuales se pueden clasificar en tres grupos: estiramiento de enlaces (enlaces covalentes), alineación de cadenas y deslizamiento de cadenas (enlaces de Van der Waals). Dichos mecanismos en las estructuras poliméricas determinan el tipo de deformación: elástica y/o plástica.

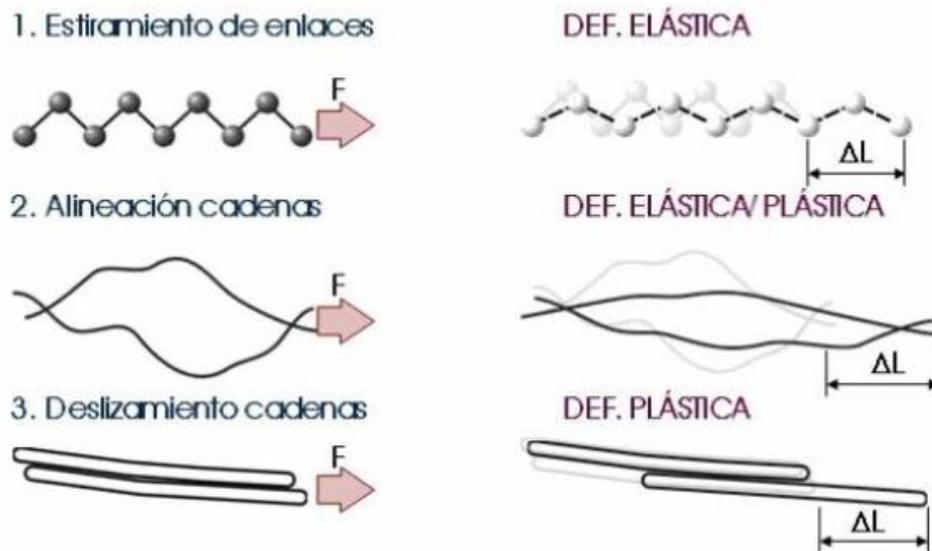


Figura 63 Mecanismos de deformación en polímeros

Es interesante explicar de forma más exhaustiva las diferentes etapas del ensayo de tracción del PC para comprender mejor el comportamiento plástico del PC. Su comportamiento puede dividirse en varias etapas según los niveles de deformación alcanzados:

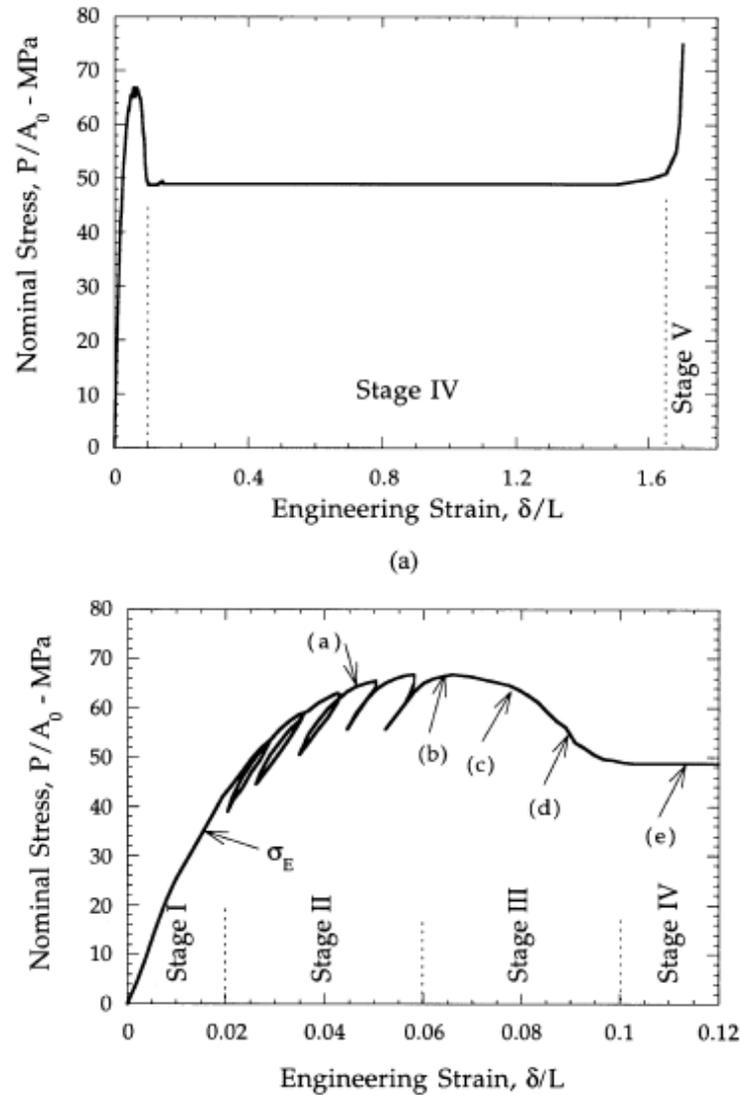


Figura 64 Ley de comportamiento de un PC

En la Etapa 1 de la deformación, ver figura 64, se observa comportamiento lineal y la deformación es macroscópicamente homogénea. Si se realiza un proceso de descarga se observa que la recuperación es elástica e instantánea. El nivel de tensiones a partir del cual aparecen bucles al descargar está marcado con σ_e .

En la Etapa 2, más allá de σ_e las curvas de carga y descarga presentan un comportamiento distinto en el bucle ya que al descargar completamente aparecen deformaciones plásticas que se producen a nivel molecular en el material. Asimismo comienzan a aparecer bandas de deformaciones micrométricas cuya densidad aumenta conforme aumenta la carga y esto acaba provocando una reducción de la rigidez. Esta etapa constituye una región viscoelástica en la que al final aparece una localización macroscópica de dichas microdeformaciones y que denota una carga máxima desde la cual se describirá la siguiente etapa.

En la Etapa 3, que comienza con el pico de carga, se forma una única banda de deformación macroscópica a lo largo de la sección de la probeta producida por una coalescencia de todas las bandas microscópicas. Desde este punto los campos de tensiones y deformaciones son no homogéneos y la curva tensión-deformación no puede ser interpretada como constitutiva de comportamiento del material. Se trata del inicio de la fractura en la sección de la probeta.

En la Etapa 4, la elongación continúa aumentando a una carga aproximadamente constante propagando la estricción a lo largo de toda la probeta. Esto es debido a que tras romper enlaces moleculares secundarios en las etapas anteriores las cadenas de polímeros se van reorientando alineándose con la carga hasta propagarse esta alineación en toda la longitud de la probeta.

En la Etapa 5, una vez se ha propagado a toda la longitud, esto hace que los enlaces que ahora soportan más carga sean los enlaces covalentes de las cadenas de polímeros lo cual hace que para seguir aumentando la elongación, la carga aumente, el material se endurece por deformación. La deformación que aquí se produce es homogénea. Finalmente, el material sufre la rotura total.

Atendiendo ahora al caso de la simulación, la ley de comportamiento del material se ha modelado atendiendo al ensayo de tracción realizado en las instalaciones del GREP de la Universidad de Girona. Con los del ensayo de tracción se han realizado los cálculos necesarios para eliminar la componente elástica y generar la curva de comportamiento plástico experimental que será posteriormente aproximada por distintos métodos, los datos obtenidos del ensayo de tracción del PC son ϵ_{eng} y σ_{eng} y los cálculos realizados son:

$$\epsilon_{eng}^p = \epsilon_{eng} - \frac{\epsilon_{eng}}{\sigma_y}$$

$$\epsilon_{true}^p = \ln(1 + \epsilon_{eng}^p)$$

$$\sigma_{true}^p = \sigma_{eng}^p \cdot (1 + \epsilon_{eng}^p)$$

Las aproximaciones al comportamiento plástico del material que se han utilizado son las leyes de comportamiento plástico con endurecimiento siguientes: ley de Voce, la ley de Swift y una ley mixta Voce-Swift. Además, por motivos explicados en el apartado 5.8.3 se ha realizado una simplificación de la ley de comportamiento escogida para aproximar la de nuestro material con una interpolación lineal en tres puntos característicos de la ley de comportamiento mixta Voce-Swift, los tres puntos vienen marcados por:

El primer punto o inicio de la zona plástica se ha considerado en el valor proporcionado en los datos del ensayo de tracción del material, donde se ha determinado que el límite elástico del material se encuentra a un nivel de tensión de 66.45 MPa:

$$\varepsilon_p = 0 ; \sigma_y = 66.45 \text{ Mpa}$$

El segundo punto se ha considerado como el valor de la σ_p para el valor de ε_p para el cual el ensayo de tracción del material provoca la rotura final:

$$\varepsilon_p = 0.45 ; \sigma_y = 84.00 \text{ Mpa}$$

El último punto se ha acotado para una deformación plástica lo suficientemente grande como para que comprenda deformaciones iguales o superiores a las que se encontraron en el desarrollo experimental del PC, con ello se ha decidido, como último punto de la interpolación lineal, ver figura 65 y figura 66:

$$\varepsilon_p = 1.70 ; \sigma_y = 103.63 \text{ Mpa}$$

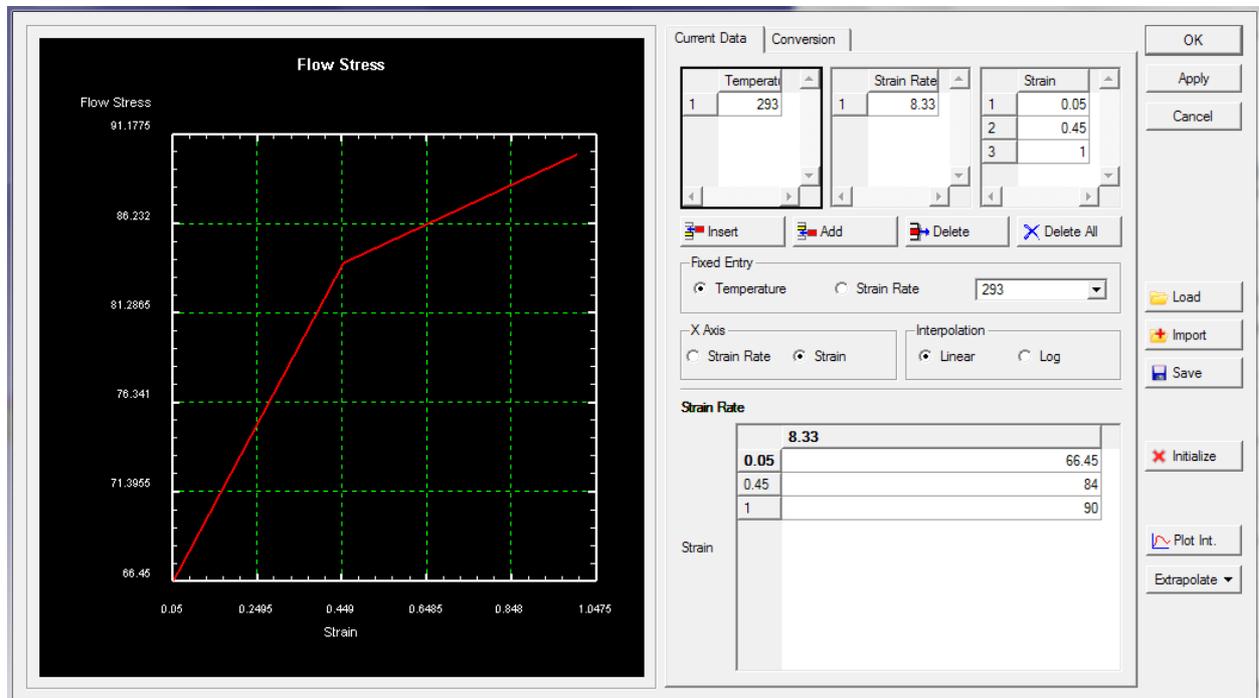


Figura 65 Aproximación de la ley de comportamiento utilizada para modelar el PC en DEFORM 3D

Las curvas de las leyes con las cuales se ha aproximado la ley de comportamiento plástica del PC tienen la siguiente forma:

$$\text{Ley de Voce: } \sigma_{eq}^p = A + B \cdot e^{C \cdot \varepsilon_{eq}^p} = 90 - 72 \cdot e^{-40 \cdot \varepsilon_{eq}^p}$$

$$\text{Ley de Swift: } \sigma_{eq}^p = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_{eq}^p)^n = 100 \cdot \varepsilon_{eq}^{p\ 0.3} \text{ donde } \varepsilon_0 \approx 0$$

$$\text{Ley Mixta: } \sigma_{eq}^p = \alpha \cdot \sigma_{eq}^{p\ Swift} + (1 - \alpha) \cdot \sigma_{eq}^{p\ Voce}$$

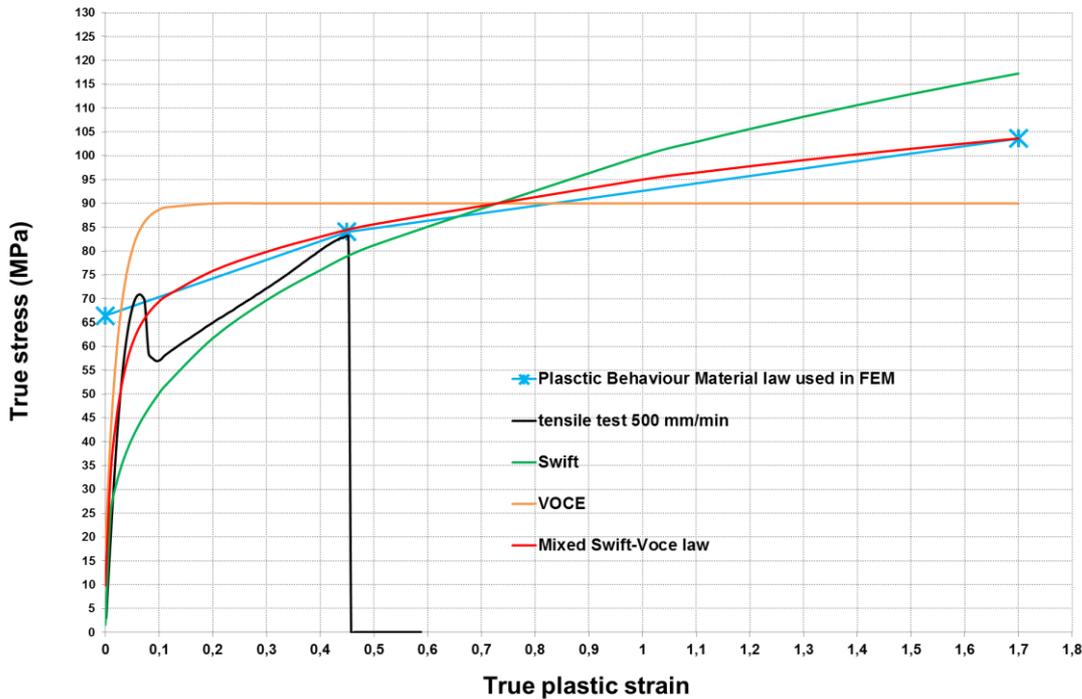


Figura 66 Cálculo de la aproximación de la ley de comportamiento para modelar el PC en DEFORM 3D

4.6 Mallado MEF

Al igual que la ley de comportamiento determina fuertemente la viabilidad de la resolución del problema en cuestión, la elección de una malla de elementos finitos adecuada, en cuanto al número de elementos, su tamaño y la distribución de estos, es crítica para que el tiempo de simulación no sea excesivamente elevado y para que la solución de la simulación sea lo más fiel posible a la realidad del proceso SPIF, ya que al fin y al cabo la discretización por elementos finitos no es más que una aproximación para cálculo estructural de una geometría concreta. En la figura 65 se puede observar como crece el tiempo de simulación con respecto al número de elementos para el caso de matriz dispersa en la formulación (“sparse solver”), ver figura 67.

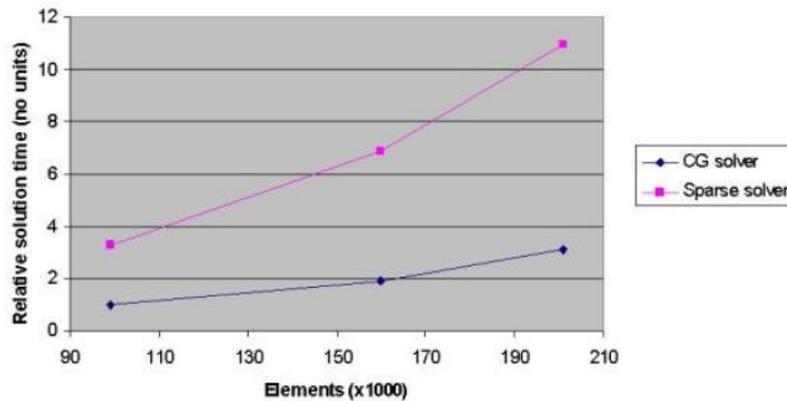


Figura 67 Estimación del tiempo relativo de resolución en DEFORM 3D para la formulación MEF con matrices dispersas

Debido a la geometría del problema y la configuración del mismo, desde un principio se ha escogido un mallado diferente para diferentes zonas de la probeta. Conociendo los resultados experimentales, donde las deformaciones son mayores en algunas zonas, se puede elegir un mallado por ventanas con la herramienta proporcionada por DEFORM 3D llamada “Mesh Windows”. Se han delimitado cuatro zonas con mallado diferente: una para la zona exterior en contacto con el prensachapa, otra interior donde por la geometría final de la probeta no hay deformaciones, otra para la zona de altas deformaciones que coincide con el borde del prensachapa y la pared de la pirámide y, finalmente, otra para la zona de contacto herramienta-probeta. Esta distribución es posible construirla con tres ventanas de mallado: la ventana para la zona de contacto probeta-herramienta (tamaños de elemento de 0.7 mm y móvil solidaria con la herramienta), la ventana para la zona con altas deformaciones interior de la probeta (símil 2.5 mm y fija) y la ventana que delimita la zona en contacto con el prensachapa y zona central de la probeta donde las deformaciones son bajas (símil 6 mm y fija). Es importante a su vez definir el orden de prioridad para dichas ventanas en DEFORM 3D ya que en el proceso de mallado inicial el refinamiento debe ir de mayor a menor tamaño de elemento. Por otro lado, es importante tener activada la opción de “Finer internal mesh” para que el algoritmo de mallado realice un mallado más fino en el espesor de la probeta que al ser de 2 mm no tiene tendrían el contener elementos de 2.5 o 6 mm a lo largo de su espesor, esta opción refina el mallado aumentando el número de elementos y reduciendo su tamaño a la misma vez.

Como se decía, esto último aumentará considerablemente el número de elementos de la malla pero evitará problemas de cálculo y definirá más fielmente las deformaciones en el espesor. En las siguientes figuras 68 y 69 puede observarse las diferentes zonas de mallado así como los parámetros marcados en el programa DEFORM 3D:

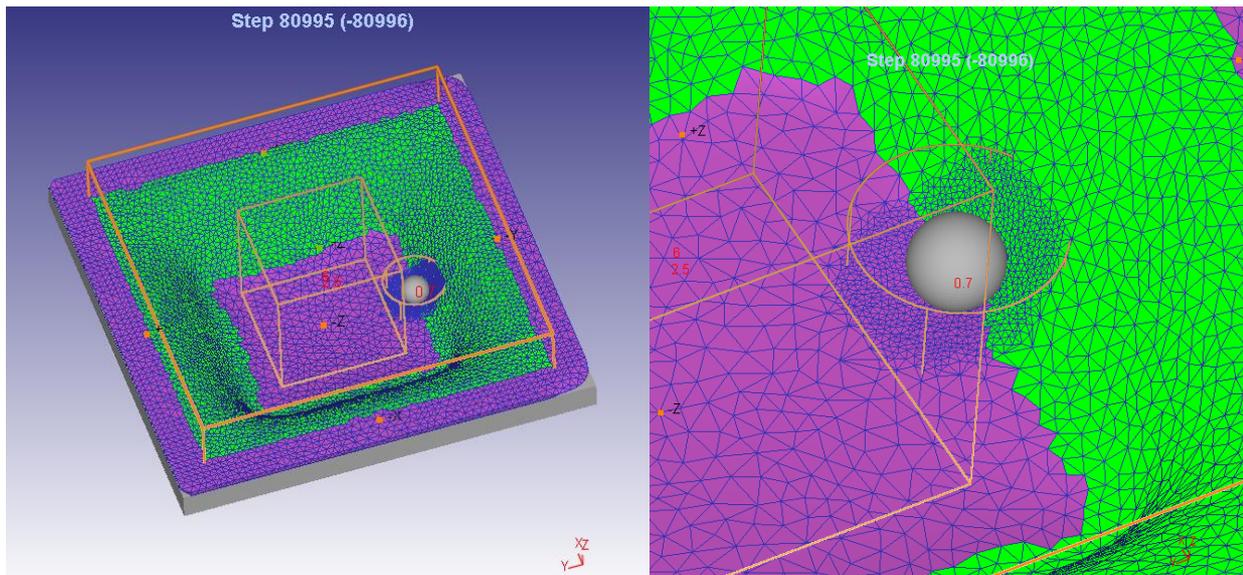


Figura 68 Mallado de la probeta mediante diferentes ventanas de mallado en DEFORM 3D

Las opciones de mallado quedarían en DEFORM 3D marcadas como se muestra en la Figura 69:

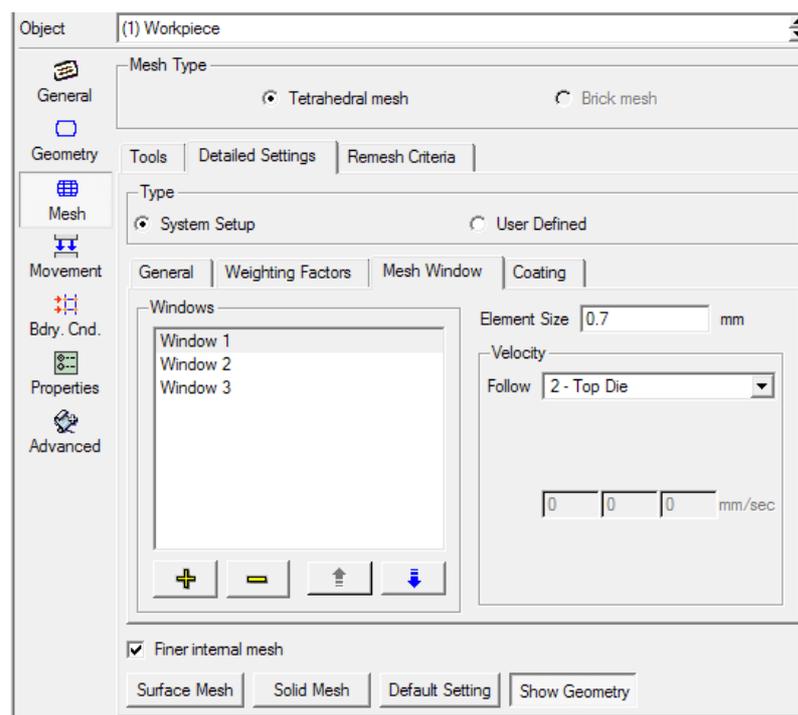


Figura 69 Herramienta para crear las distintas ventanas de mallado en DEFORM 3D

Se ha elegido dicha captura de las opciones de DEFORM 3D para mostrar que la ventana 1 con tamaño de elemento de 0.7 se mueve solidaria a la herramienta “Top die”, como se ha comentado anteriormente esta ventana refina el mallado en la zona de contacto probeta-herramienta, si ésta última se mueve, la zona de mallado refinado también deberá hacerlo de forma coordinada cada time step. Por tanto, con todo

lo anterior se determina una malla de elementos finitos con diferentes zonas de refinamiento, una de ellas móvil de forma solidaria a la herramienta. El modelado de un problema SPIF donde las deformaciones son muy altas es un problema donde la malla debe recalcularse cada cierto periodo dentro de la simulación, esto es, hay que remallar de forma acorde a las deformaciones que se van produciendo. “Remesh criteria”, es la herramienta de DEFORM 3D donde los parámetros de remallado son definidos. En esta simulación se ha elegido un remallado local donde cada incremento de 0.1 s de tiempo del proceso en simulación se realiza un remallado (el remallado también se lanza de forma automática si antes de ese incremento de 0.1s el jacobiano de la malla en cálculo se vuelve negativo). Además, dicho remallado es controlable, en este caso, se ha optado por un remallado local (en lugar de global, donde cada elemento de la “vieja” malla es reemplazado por el de la nueva malla) cuya interpolación se realiza para cada elemento y toma como criterio una media de sus elementos contiguos, no es necesario que toda la malla se redefina ahorrando coste computacional. Ver figura 70.

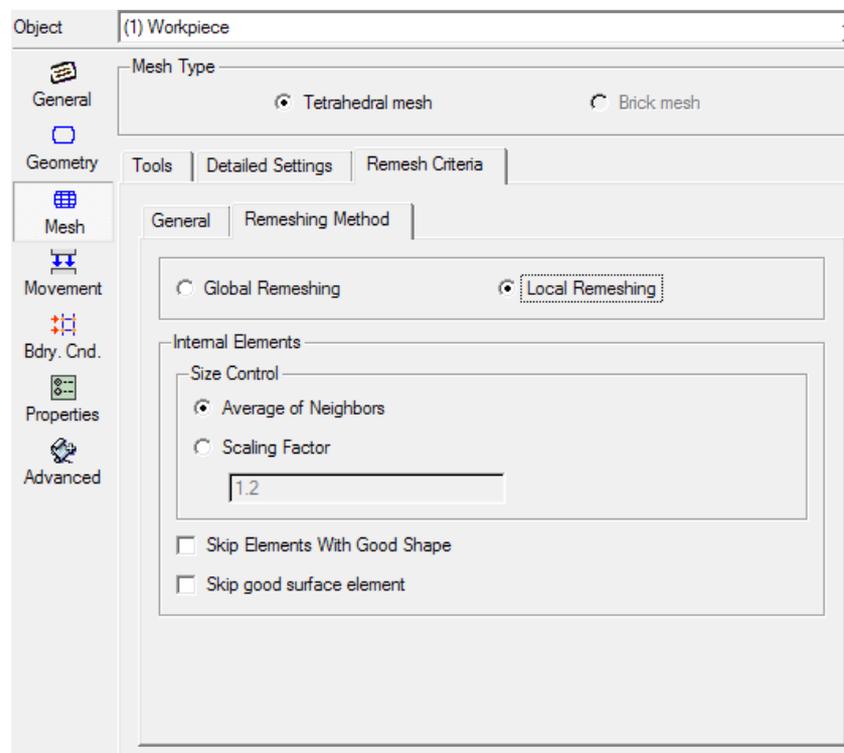


Figura 70 Herramienta de DEFORM 3D para definir las condiciones de remallado de la probeta

Con todo lo anterior se tiene determinada la malla de elementos finitos y su evolución a lo largo de la simulación. En los sucesivos chequeos del proceso de simulación puede ser necesario cambiar algún parámetro para optimizarla tanto en tiempo de cálculo como en los posibles errores de mallado que puedan generarse.

4.7 Condiciones de contorno del problema.

Una vez definida la malla de elementos finitos, se pasa a definir las condiciones de contorno del problema. Por un lado se especifican las restricciones de movimientos de la probeta y posteriormente las condiciones de contacto entre las distintas piezas.

En primer lugar, con respecto a las restricciones de movimiento de la probeta se ha considerado que la zona en contacto con el prensachapa no tiene movimiento en la dirección perpendicular al espesor (eje Z en DEFORM 3D) y que puede deslizarse en las direcciones paralelas a la superficie del prensachapa (ejes X e Y en DEFORM 3D), para ello se han fijado los nodos de la malla de elementos finitos de tal forma que se impone condición de velocidad en dirección Z igual a cero a todos los puntos dentro de la zona y condición de velocidad en dirección X, Y y Z igual a cero a todos los puntos de la malla que se encuentran en el borde de la lámina. Ver figura 71.

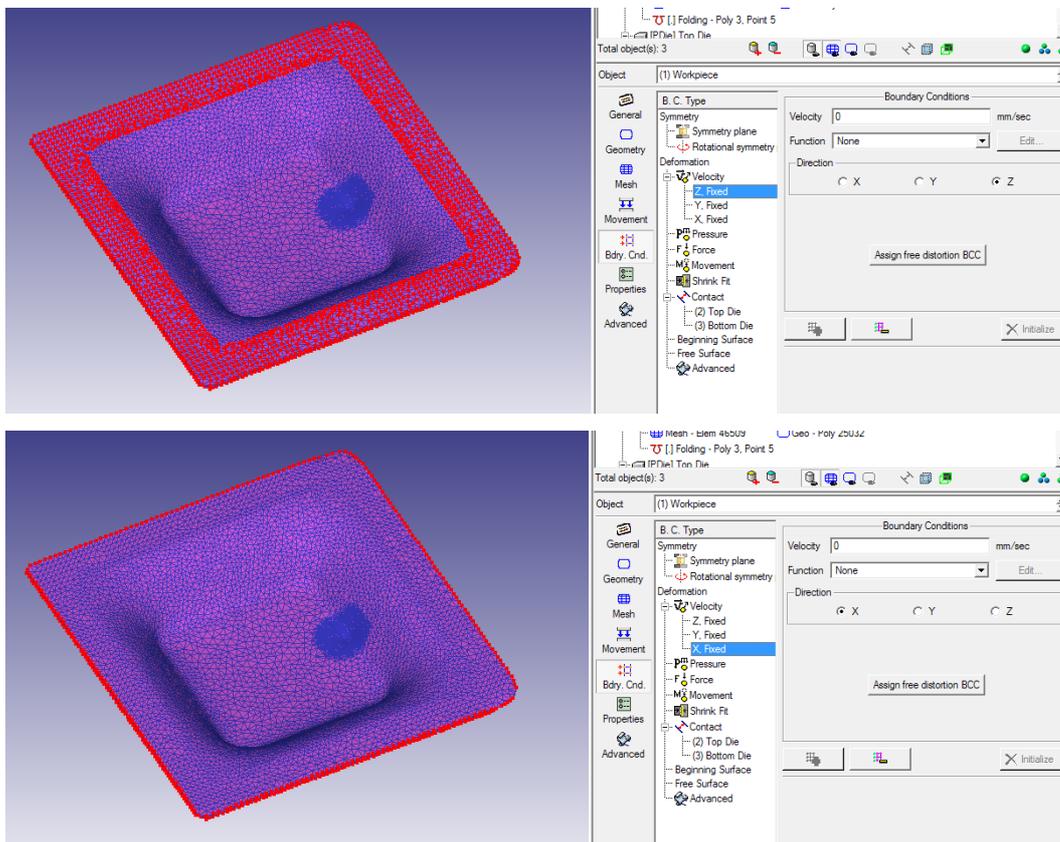


Figura 71 Herramienta de definición y visualización de las condiciones de contorno del problema en DEFORM 3D

Por otra parte, se establece el contacto entre la herramienta y la lámina y entre la lámina y el prensachapa. Ver figura 72. Para las condiciones de contacto se ha determinado un coeficiente de rozamiento de Coulomb de valor 0.01. Un valor razonable ya que el proceso SPIF se ha realizado en condiciones de lubricación.

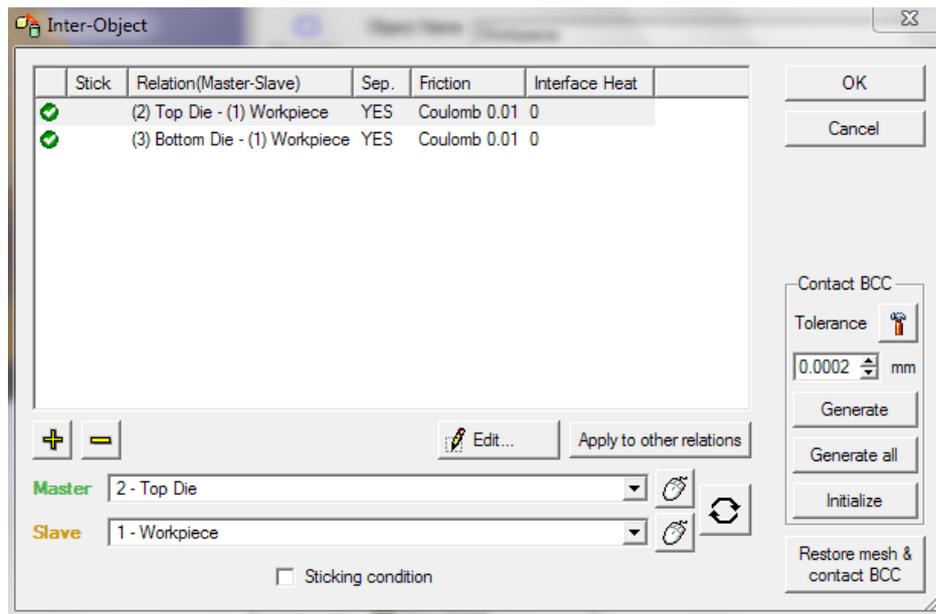


Figura 72 Herramienta para definir las condiciones de contacto entre las piezas en DEFORM 3D

4.8 Problemática asociada a un proceso de simulación

En los apartados anteriores se ha ido desgranando las decisiones y puntos importantes dentro del modelado de un proceso SPIF para una probeta de PC sin rotación de la herramienta y con la configuración de ensayo empleada en el estudio experimental. No obstante, para llegar a decidir algunos de los parámetros anteriores ha sido necesario un proceso de mejora continua en el modelado mediante ensayo-error. La simulación mediante elementos finitos de un proceso SPIF de polímeros no se había aplicado antes en el ámbito del Departamento de Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Sevilla, y una primera aproximación a ello es el objeto de este capítulo del proyecto. Los principales problemas encontrados serán descritos en los siguientes puntos.

4.8.1 Posicionamiento de elementos en la simulación

Uno de los primeros problemas encontrados era el del posicionamiento de las diferentes piezas de la simulación, debido al cual, los movimientos introducidos posteriormente a la herramienta cuya interacción con la probeta iban provocando la deformación generaban un mensaje de error al lanzar el análisis. Esto es debido a que el movimiento de la herramienta y la posición inicial de la herramienta con respecto a la probeta en el eje de coordenadas de DEFORM 3D eran incompatibles. En consecuencia al lanzar la simulación se producía una colisión indeseada que provocaba flujos de tensiones muy altos, es decir, deformaciones imposibles. Por ejemplo, debido a dichas posiciones incorrectas al iniciarse el movimiento de la herramienta este atravesaba la pieza lo que generaba dicho flujo de tensiones incongruente con la realidad y se mostraba en forma de mensaje de error.

La solución al problema es coordinar la posición de las piezas con la trayectoria cargada a la herramienta. En el problema de simulación de una lámina mediante SPIF, lo más sencillo es colocar la superficie de la lámina en contacto con la herramienta a cota $Z = 0$ de tal forma que al cargar la trayectoria de la herramienta la posición inicial de la misma se encuentre a dicha cota $Z = 0$. En DEFORM 3D mediante las herramientas de posicionado de “interference” y “offset” puede asignarse las posiciones adecuadas. Primero se posiciona la probeta con el “offset” adecuado, en este caso con un offset $Z = -2$, y posteriormente se hace un “interference” de la herramienta tomando como referencia a la probeta por la cara adecuada. Así el contacto herramienta-probeta se encuentra a cota $Z = 0$ y en la cara adecuada de la probeta.

4.8.2 Mallado de la lámina

Los principales problemas encontrados con respecto al mallado han sido básicamente tres: deformaciones la malla de la probeta en la zona de contacto con la herramienta, un mallado inadecuado que una vez la simulación se lanza genera deformaciones incongruentes con la realidad y un mallado que por sus características hace la simulación inviable en tiempo.

En primer lugar, a veces ocurre que en el proceso de generar la malla, tras delimitar las diferentes ventanas de mallado, los tamaños de elemento, el tipo de remallado y el mallado superficial, al generar la malla tridimensional que define finalmente la geometría a estudiar en las zonas de contacto entre herramienta y probeta y/o entre probeta y prensachapa la malla se deforma y crea una geometría que difiere mucho de la del problema. Esto es debido a que en la definición del problema hay tareas que se realizan antes del mallado (posicionado con “interference”, condiciones de contacto, etc) que pueden influir en la generación de la malla final ya que los parámetros de la geometría (que contienen tolerancias en su definición) puede hacer que las piezas interfieran y que al generarse la malla se induzcan errores en la misma creando elementos que la distorsionan por completa en la zona en cuestión. La solución a este problema es realizar el modelado del problema con un orden tal que el mallado de la lámina sea previo al posicionado de las piezas, así se realiza sin contacto alguno entre las mismas.

En segundo lugar, en algún momento de la simulación es posible que algún elemento de la zona de influencia de la herramienta, es decir, aquella que en ese instante esté sufriendo deformaciones debido al paso de la misma, sufra una deformación de arrastre y ciertos elementos se deformen de forma excesiva en direcciones incongruentes con la realidad (de forma perpendicular a la superficie de contacto herramienta-probeta). Esto ocurre bien porque la definición de la geometría de la herramienta, en este caso esférica, no es lo suficientemente fina y algún polígono de la superficie de la herramienta intersecta a un elemento de la lámina desgarrándolo de la superficie y tirando del elemento hacia fuera de la misma.

Otra posibilidad es que en la zona en cuestión los elementos influidos por la posición de la herramienta en ese instante se deformen en exceso en la dirección perpendicular a la superficie de la probeta y que los sucesivos remallados no corrijan esa deformación incongruente por lo que en el siguiente paso de la herramienta dichos elementos colisionen con la misma y sean arrastrados. Las posibles soluciones a este defecto son, en primer lugar, volver a etapas anteriores en la simulación y volver a lanzarla para que en los nuevos cálculos se autocorrija el problema, en segundo lugar, refinar la herramienta para que esté definida por polígonos más pequeño que definan mejor el contacto herramienta-probeta y, por último una modificación en los parámetros de mallado de la zona donde se produce el error (por ejemplo, del mallado de la zona de influencia de la herramienta) que corrija dicho defecto.

Por último, es un error muy común al comenzar un estudio de simulación el tratar de realizar un mallado excesivamente fino. Con el coste en tiempo de simulación y de memoria que ello conlleva. Por tanto, es muy probable que al lanzar las primeras simulaciones se encuentre que para un número de etapas alto (127000 aprox. en este caso para un time step de 0.005 s) los tiempos de resolución de cada etapa rondan los 15 o 20 segundos con lo cual una simulación completa, suponiendo que no genere ningún tipo de error, puede durar un mes aproximadamente. Es algo que para un estudio como el aquí expuesto puede ser demasiado alto, sobre todo porque en general la simulación necesita relanzarse varias veces mientras se desarrolla debido a que surgen problemas de remallado o de deformaciones excesivas. Por tanto, se recomienda comenzar con tamaños de elemento grandes (en este problema: 6 mm en elementos del mallado superficial en la zona de baja o nula deformación, 3 a 4 mm en elementos del mallado superficial de la zona de deformación y de 1 a 1.5 mm de mallado superficial móvil de la zona de influencia de la herramienta) e ir bajando el tamaño en caso necesario de mayor definición de la malla, siempre vigilando que el tiempo de simulación no se eleve demasiado.

4.8.3 Ley de comportamiento del material

La ley de comportamiento del material es probablemente una de las decisiones más importantes ha tomar dentro del proceso de modelado de un ensayo SPIF en polímeros. Como se ha comentado en el apartado 4.6, los polímeros tienen un comportamiento más complejo que los metales. Debido a su microestructura, el comportamiento ante fuerzas externas depende mucho de las condiciones en las que se realiza el ensayo y del nivel de deformaciones plásticas en que se encuentre el material.

El principal problema es que tratar de simular una probeta con una ley de comportamiento similar a la obtenida para el PC en el ensayo de tracción genera importantes problemas de convergencia en el cálculo. Por un lado, se tiene la parte elástica, definida con los parámetros obtenidos del ensayo de tracción del PC y por otro lado la parte plástica, la cual hay que decidir si modelarla mediante la introducción de parámetros a una ley de comportamiento predefinida en DEFORM 3D (es decir, realizar un ajuste) o bien introducir una ley de comportamiento definida por puntos donde la deformación plástica y la tensión del

material son conocidos. En este estudio se decidió esto último para que aproximar el comportamiento experimental y poder así comparar más fielmente el ensayo SPIF real con su simulación para el PC concreto de dicho ensayo. Para ello, en un principio se eligieron 20 puntos representativos de la curva de comportamiento en el ensayo de tracción y mediante interpolación lineal se generó la ley de comportamiento en DEFORM 3D. Una curva de comportamiento prácticamente igual a la real del material.

Debido a los problemas de convergencia que el pico de tensión donde se encuentra el punto de fluencia del material generaba en el cálculo se decidió simplificar la ley de comportamiento a una lineal definida por tres puntos, eliminando así la brusca caída de tensión que inducía los problemas de convergencia. El efecto producido por la caída de tensión en dicho punto en el motor de análisis para un incremento de deformación infinitesimal era el de disminuir radicalmente la resistencia del material. Por tanto, se recomienda para futuros estudios introducir leyes de comportamiento cuyas variaciones de tensión sean lo suficientemente suaves para evitar este efecto pero que sigan ajustándose a la realidad del material en cuando a la resistencia que ofrecen a un nivel de deformaciones plásticas determinado.

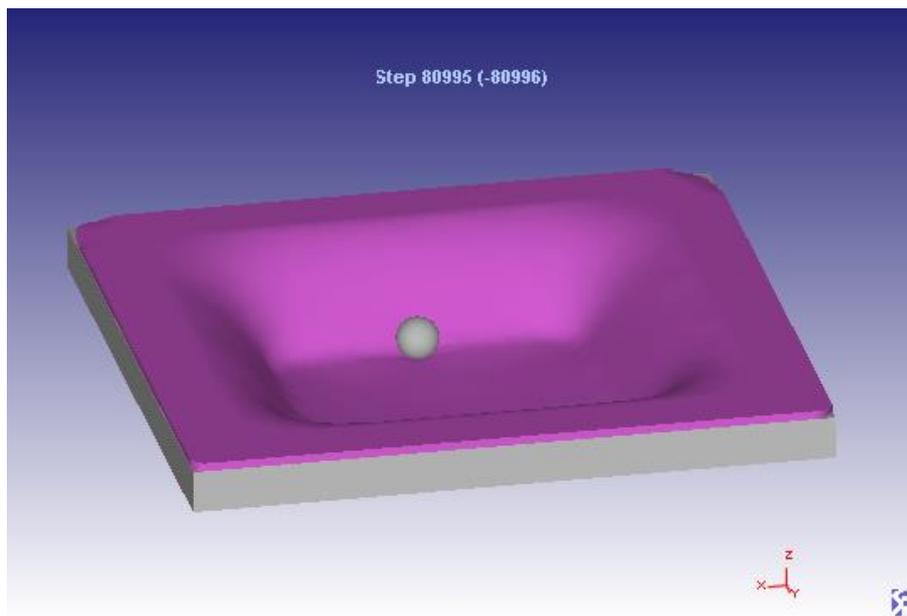


Figura 73 Probeta de PC deformada en proceso SPIF. Etapa 80995/127000.

4.8.4 Time step de simulación

Una primera aproximación para el time step empleado en la simulación puede ser de 0.01 s. Tras sucesivos errores de convergencia, se decidió disminuir dicho time step (a la vez que se simplificaba la ley de comportamiento del PC) por lo que no se puede determinar el efecto directo de la modificación de este parámetro en el análisis realizado. No obstante, seleccionar un time step adecuado es importante en

tanto que si este es demasiado grande puede aumentar la inexactitud de una solución mientras que si es demasiado pequeño provoca grandes tiempos de resolución. Algunas guías para elegir el time step adecuado pueden ser que el desplazamiento máximo para cualquier nodo de la malla no debe exceder $1/3$ de la longitud de la arista de un elemento de la zona de influencia de la herramienta para una etapa de simulación. En zonas de alta deformación localizada puede reducirse incluso a $1/10$. Además, cuanto más fina sea la malla menores step time serán necesarios por lo que si el mallado se redefine es recomendable revisar el time step. Con lo anterior se previene la excesiva distorsión de la malla en una etapa de simulación si los problemas persisten puede probarse con el siguiente método:

- a) Usando la herramienta de medir, medir uno de los elementos más pequeños de la lámina (tras generar la malla).
- b) Estimar la velocidad máxima de deformación en cualquier zona de la probeta (en este caso, la velocidad de la herramienta es el equivalente a dicha velocidad).
- c) Dividir el resultado de a entre el de b y tomar $1/3$ de dicho valor como time step. Es una estimación general para casos donde una precisión muy alta no sea crítica.

4.9 Posibles vías de trabajo para simular procesos de conformado incremental

Teniendo en cuenta el know-how acumulado en el desarrollo de la simulación para la probeta de PC las posibles vías de desarrollo de futuras simulaciones de procesos SPIF para polímeros pueden agruparse en el estudio de tres campos: el mallado de la probeta según las distintas geometrías, el empleo de diferentes condiciones para el motor de análisis de la simulación y el ajuste de la ley de comportamiento del material.

En primer lugar, se debe avanzar en el desarrollo de la malla de elementos finitos. Sería muy útil realizar un estudio para diferentes materiales asignando a los diferentes niveles de deformación cuales son los tamaños de elementos óptimos para obtener unos resultados que se ajusten a sus niveles de deformación reales haciendo a la vez la simulación viable en tiempo de resolución.

En segundo lugar, para evitar los problemas de convergencia al inicio de la simulación pueden adoptarse diferentes condiciones de funcionamiento del motor de análisis, es decir, modificar el solver para ajustar el tipo de cálculo a las diferentes fases de la simulación.

Por último, es necesario realizar un estudio más exhaustivo de la ley de comportamiento de materiales poliméricos. Debido a la complejidad de la ley de comportamiento los problemas de convergencia que inducen en el cálculo de la simulación se debe avanzar hacia una mejor definición de la misma pa que con un ajuste adecuado al comportamiento real dichos problemas de convergencia sean solventados. En este

sentido puede realizarse un análisis de las diferentes leyes de comportamiento plástico para adecuarlas a los diferentes polímeros en estudio.

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

En este estudio se ha realizado un análisis de las deformaciones límite y de los modos de fallos de probetas de lámina polimérica deformadas mediante conformado incremental mono-punto en geometrías de pirámide cuadrangular truncada. Los materiales considerados fueron policarbonato transparente, policloruro de vinilo así como lámina biocompatible de policaprolactona. Las condiciones de ensayo para cada material incluyeron condiciones de giro de herramienta a 2000 rpm y giro libre de herramienta. En este contexto se ha conseguido caracterizar las deformaciones límites de cada material en dichas condiciones haciendo uso de diagramas límite de conformado, evaluándose los niveles de deformación admisibles así como el tipo de fallo en cada caso. Las conclusiones particulares del proyecto se enuncian a continuación:

- Las deformaciones límite obtenidas experimentalmente para los materiales no biocompatibles analizados (PVC y PC) están en consonancia con estudios anteriores. En dichos materiales existe un efecto favorable del giro de la herramienta que provoca un aumento de la temperatura y de la conformabilidad del material mediante SPIF.
- El fallo del material en el caso de PC se produce por fractura.
- En el caso del PVC, se produce fractura en el caso de giro de la herramienta libre mientras que con giro de herramienta el fallo se produce por *twisting*.
- Se han caracterizado por primera vez los límites de conformado en SPIF para un material biocompatible (PCL), resultando el tipo de fallo del material en ambos casos de estudio (con y sin velocidad de giro de la herramienta) la degradación del polímero con pequeñas grietas así como leves deformaciones por *twisting* en el caso de cabezal de herramienta libre.

Por último, se ha realizado una aproximación a la simulación mediante elementos finitos en el software DEFORM 3D (“R”) del proceso de SPIF sobre material polimérico (PC) en condiciones de ensayo sin giro de herramienta, habiéndose evaluado los problemas que se presentan y que se concentran principalmente en dos ámbitos. Por un lado, problemas específicos del modelado geométrico y del material, como es la definición de la ley de comportamiento del material, la elección de una malla de elementos finitos que recoja la información suficiente del proceso de conformado, la adecuada definición de las condiciones de contorno y el correcto posicionado de las diferentes piezas involucradas en el proceso. Por otro lado, problemas asociados al proceso de simulación, como es el ajuste del time step de simulación para conseguir una buena relación fidelidad *versus* tiempo de simulación.

5.2 Desarrollos futuros

Como posibles líneas de desarrollos futuros al presente proyecto se plantean las siguientes:

- En primer lugar, con el fin de caracterizar de forma más precisa el comportamiento durante SPIF del material biocompatible PCL sería interesante realizar más ensayos con probetas fabricadas en dicho material y diferentes geometrías. Una evaluación más precisa del fallo y de la temperatura durante la deformación podría ayudar a comprender mejor la mecánica de dicho fallo, ya que la temperatura parece tener una influencia significativa en el proceso de fallo en este, así como en otros materiales poliméricos.

- Por otro lado, es recomendable la realización de más ensayos con probetas de PVC para determinar la influencia del giro de herramienta y la temperatura en el fallo de la probeta. Se ha detectado en el presente trabajo que al deformar con giro de herramienta el fallo se produce por *twisting* en lugar de por fractura como en el caso sin giro de herramienta.

- Con el fin de poder comparar entre materiales poliméricos con temperaturas de transición vítrea relativamente bajas sería recomendable realizar una comparación entre distintos polímeros. Los posibles distintos niveles de deformación en el fallo que se puedan alcanzar podrían indicar nuevos caminos en el desarrollo de prótesis.

- Finalmente, la realización de simulaciones que puedan validarse con ensayos reales de SPIF de probetas de diferentes polímeros pueden ampliar el campo de estudio de dichos procesos así como agilizar el desarrollo de nuevas técnicas de control de las variables de un proceso SPIF (por ejemplo, la variación y selección de la velocidad de giro de la herramienta según la zona en la que esté posicionada ya que los niveles de deformación varían dependiendo de dicha posición).

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Atkins A.G. (1996), "Fracture in forming", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 56, pp. 609-618.
- [2] Araújo R., Teixeira P., Montanari L., Reis A., Silva M.B. and Martins P.A.F. (2014), "Single point incremental forming of a facial implant", *Prosthetics and Orthotics International*, Vol. 38 No. 5, pp. 369-378.
- [3] Bagudanch I., García-Romeu M.L., Centeno G., Elías-Zúñiga A. and Ciurana J. (2015a), "Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 219, pp. 221-229.
- [4] Bagudanch I., Centeno G., Vallellano C. and García-Romeu M.L. (2017), "Revisiting formability and failure of polymeric sheets deformed by Single Point Incremental Forming", *J*, Vol. 144, pp. 366-377.
- [5] C. Bouffioux, P. Pouteau, L. Duchêne, H. Vanhove, J.R. Duflou, A.M. Habraken (2010), "Material data identification to model the SPIF", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, pp. 979-982.
- [6] Centeno G., Bagudanch I., Martínez-Donaire A.J., García-Romeu M.L. and Vallellano C. (2014), "Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming", *Materials & Design*, Vol. 63, pp. 20-29.
- [7] Duflou J.R., Lauwers B., Verbert J., Gelaude F. and Tunckol Y. (2005), "Medical application of single point incremental forming: Cranial plate manufacturing", *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping*, pp. 161-166.
- [8] G. Centeno, D. Morales-Palma, B. Gonzalez-Perez-Somarriba, I. Bagudanch, J.J. Egea-Guerrero, L.M. Gonzalez-Perez, M.L. García-Romeu, C. Vallellano. (2014), "A Functional Methodology on the Manufacturing of Customized Polymeric Cranial Prostheses from CAT using SPIF", *Materials & Design*.
- [9] Goodwin, G., (1968). "Application of strain analysis to sheet forming problems in the press shop". *MET ITAL*, Aug, 60(8), pp. 767-774.
- [10] Gopakumar S. (2004), "RP in medicine: a case study in cranial reconstructive surgery", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10 No. 3, pp. 207-211.
- [11] Emmens W.C. and Van den Boogaard A.H. (2009), "An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3688-3695.
- [12] V. Franzen, L. Kwiatkowski, J. Neves, P. A. F. Martins, A. E. Tekkaya (2008), "On the Capability of

Single Point Incremental Forming for Manufacturing Polymer Sheet Parts”, Conference Paper.

[13] Hirt, G., (2004). “Tools and Equipment used in Incremental Forming”. *Incremental Forming Workshop, University of Saarbrücken*, June 9. p.27.

[14] Hirt, G., Bambach, M. & Chouvalova, I., (2003). *Process Limits and Material Behaviour in Incremental Sheet Forming with CNC-Tools*. Madrid.

[15] Jewies, J., et al. (2010). “Asymmetry Single Point Incremental Forming of Sheet Metal”.

[16] Khan M.S., Coenen F., Dixon C., El-Salhi S., Penalva M. and Rivero A. (2014), “An intelligent process model: predicting springback in single point incremental forming”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76 No. 9-12, pp. 2071-2082.

[17] Keeler, S., (1965). “Determination of forming limits in automotive stampings”. *SHEET METAL IND*, Sep, 42(461), pp. 683-691.

[18] Kim, Y. & Park, J., (2002). “Effect of process parameters of formability in incremental forming of sheet metal”. *Journal of Materials and Processing technology*, Volumen 130-131, pp. 42-46.

[19] J. Lu, K. Ravi-Chandar (1997), “Inelastic deformation and localization in polycarbonate under tension”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, pp. 391-425.

[20] Le et al., V.S. Le, A. Ghiotti, G. Lucchetta (2008), “Preliminary studies on single point incremental forming for thermoplastic materials”, *Proceedings of the 11th ESAFORM Conference on Material Forming (2008)*

[21] Leszak, E., (1967). *Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming*. Patent No. US3342051A1.

[22] Marciniak, Z., Duncan, J. & Hu, S., (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*. London Butterworth-Heinemann.

[23] Martins P.A.F., Kwiatkowski L., Franzen V., Tekkaya A.E. and Kleiner M. (2009), “Single point incremental forming of polymers”, *CIRP Annals*, Vol. 58 No. 1, pp. 229-232.

- [24] Micari, F & Ambrogio, G., (2004). *A common shape for conducting Incremental Forming Tests*.
- [25] Schafer, T. & Schraft, R. D., (2004). "Incremental sheet forming by industrial robots using a hammering tool". *AFPR Association Francais de Prototypag Rapid, 10th European Forum on Rapid Prototyping*, 14 Sep.
- [26] Schmoeckel, D., (1992). Developments in Automation, Flexibilization and Control of Forming Machinery. *Annals of CIRPM*, Volume 40/2, p. 615.
- [27] Silva M.B., Nielsen P.S, Bay N. and Martins P.A.F. (2011), "Failure mechanisms in single point incremental forming of metals", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 56, pp. 893-903.
- [28] Stewart, D., (2005). "A Platform with Six Degrees of Freedom". *UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings*, 180 (15).
- [29] Stoughton, T. & Yoon, J., (2011). "A new approach for failure criterion for sheet metals". *International Journal of Plasticity*, vol 27, pp. 440-459.
- [30] Tania A. F Marques (2010), "Single Point Incremental Forming of Polymers"
- [31] Vallellano, C., Morales, D., Martínez, A. & García-Lomas, F., (2010). "On the use of Concav-side Rule and Critical Distance Methods to predict the influence of Bending on Sheet-metal Formability". *International Journal of Material Forming*, Issue 27, pp. 1167-1170.
- [32] Williams L.R., Fan K.F. and Bentley R.P. (2015), "Custom-made titanium cranioplasty: early and late complications of 151 cranioplasties and review of the literature". ", *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, Vol. 44, pp. 599-608.
- [33] Young, D. & Jewies, J., (2005). "Forming Limit Diagrams for Single Point Incremental Forming of Aluminium IMECHE part B". *Journal of Engineering Manufacture*, Volume 219 part B, pp. 1-6.