



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Departamento**

**Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación**

# **PROYECTO/TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**CONFORMADO INCREMENTAL MONOPUNTO EN LÁMINA  
POLIMÉRICA MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS**

**FINITE ELEMENT MODELING OF SINGLE-POINT  
INCREMENTAL FORMING IN POLYMERIC SHEETS**

**Máster en Ingeniería Industrial**

Autor: Jesús Redondo Jurado

Tutor: José Andrés López Rodríguez

MÁLAGA, Septiembre de 2.025



Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

Autor:  
Jesús Redondo Jurado

Tutor:  
José Andrés López Fernández

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación  
Escuela de Ingenierías Industriales  
Universidad de Málaga  
Málaga, 2025



## **AGRADECIMIENTOS**

*A Pilar y Carla, por acompañarme en cada paso.*

*Y a Marina, por ser mi luz.*



## **RESUMEN**

El Conformado Incremental de Chapa (Incremental Sheet Forming, ISF) es un proceso de fabricación flexible que permite conformar láminas mediante una herramienta controlada por CNC, reduciendo costes de utillaje en series pequeñas. Entre sus variantes, el Conformado Incremental Monopunto (Single Point Incremental Forming, SPIF) ha sido ampliamente estudiado en metales, pero su aplicación a polímeros aún es escasa. La escasa aplicación a polímeros se debe, entre otras, a las complejidades en el comportamiento mecánico de este tipo de materiales, como pueden ser un comportamiento elástico no lineal, un comportamiento viscoso, o la sensibilidad a la temperatura.

Este TFM se enfoca en el modelado numérico del proceso SPIF en láminas poliméricas mediante elementos finitos (FEA). Se usará un código de tipo explícito para analizar la distribución de tensiones y deformaciones, así como la recuperación elástica de las piezas. Esto permitirá evaluar la influencia de los parámetros de proceso en la precisión geométrica, así como comprender el proceso de recuperación elástica, responsable de las desviaciones geométricas en piezas finales.

A través de este estudio, se busca contribuir a la optimización del SPIF en materiales poliméricos, facilitando su implementación industrial y reduciendo el número de ensayos experimentales requeridos para la obtención de piezas útiles.

### **Palabras clave**

Single Point Incremental Forming, Conformabilidad, Polímero, Elementos Finitos



## **ABSTRACT**

Incremental Sheet Forming (ISF) is a flexible manufacturing process that allows forming sheets using a CNC-controlled tool, reducing tooling costs for small series. Among its variants, Single Point Incremental Forming (SPIF) has been widely studied in metals, but its application to polymers is still limited. This reduced application to polymers is mainly due to the complexities of their mechanical behavior, such as nonlinear elasticity, viscoelastic effects, and high sensitivity to temperature.

This work focuses on the numerical modeling of the SPIF process in polymer sheets using Finite Element Analysis (FEA). An explicit code is employed to analyze the distribution of stresses and strains, as well as the elastic recovery of the formed parts. This approach enables the evaluation of the influence of process parameters on geometric accuracy, while also providing insights into elastic recovery, which is largely responsible for geometric deviations in final components.

Through this work, the objective is to contribute to the optimization of SPIF applied to polymeric materials, facilitating its industrial implementation and reducing the number of experimental trials required to obtain functional parts.

## **Keywords**

Single Point Incremental Forming, Formability, Polymer, Finite Element Analysis



## ÍNDICE DE CONTENIDOS.

Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vii
Abstract.....	ix
Índice de contenidos.....	xi
Índice de tablas.....	xiii
Índice de figuras.....	xv
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Descripción general y motivación.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Estado del arte.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Procesos de Fabricación en la Industria.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1. Fabricación por moldeo.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2. Fabricación por conformado.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.3. Fabricación por arranque de material.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.4. Fabricación aditiva.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Procesos de conformado de chapa.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1. Cizallado.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.2. Doblado.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.3. Embutición.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.4. Termoconformado.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.5. Conformado incremental de chapa.....</b>	<b>13</b>
2.2.5.1. Conformado incremental multipunto.....	13
2.2.5.2. Conformado incremental monopunto.....	14
<b>2.3. Fundamentos del conformado incremental monopunto (SPIF).....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.1. Influencia de los parámetros del proceso SPIF.....</b>	<b>16</b>
2.3.1.1. Material y espesor.....	16
2.3.1.2. Herramienta y trayectoria.....	16
2.3.1.3. Lubricación.....	17
<b>2.3.2. Conformabilidad.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.3. Aplicación del conformado incremental al policarbonato.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4. Análisis de Elementos Finitos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.1. Fundamentos del método de los elementos finitos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.2. Limitaciones del análisis.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.3. Aplicación del método explícito.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.4. Particularidades de los polímeros.....</b>	<b>24</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1. Validación del modelo.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.1. Modelado del ensayo de tracción.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.2. Obtención de la curva esfuerzo-deformación.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2. Modelado numérico.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.1. Geometría y mallado.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2. Contacto.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3. Condiciones de contorno.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.4. Parámetros de simulación (<i>Analysis Settings</i>).....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Postprocesado de datos.....</b>	<b>43</b>
<b>4. Discusión de resultados.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1. Validación del ensayo de tracción.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. Resultados del modelo numérico SPIF.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.1. Análisis de deformaciones.....</b>	<b>51</b>

<b>4.2.2. Análisis de tensiones</b> .....	55
<b>4.2.3. Deformada</b> .....	58
4.2.3.1. Comportamiento en el plano .....	58
4.2.3.2. Comportamiento en el plano XY .....	60
<b>4.3. Discusión sobre la fidelidad del modelo</b> .....	63
<b>5. Conclusiones y trabajos futuros</b> .....	66
<b>5.1. Conclusiones</b> .....	66
<b>5.2. Trabajos futuros</b> .....	67
<b>6. Bibliografía</b> .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen comparativo de diferentes procesos de fabricación aditiva según fase de suministro del material, material, técnica empleada y tipo de cambio de fase (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	7
Tabla 2. Propiedades del policarbonato. ....	29
Tabla 3. Valores de los puntos introducidos para el modelo MAT_024 en Engineering Data. ..	31
Tabla 4. Parámetros introducidos para el modelado en LS-DYNA.....	42
Tabla 5. Identificación y posición de los puntos característicos objeto de estudio. ....	52



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de placa bipartida típico (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	4
Figura 2. Ejemplos de operaciones de maquinado comunes: a) Torneado, b) Tronzado, c) Fresado periférico, d) Fresado frontal (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	6
Figura 3. Esquema del cizallado con un punzón y una matriz o dado (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	9
Figura 4. Terminología del doblado (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	10
Figura 5. Esquema del proceso de embutido profundo en un disco de lámina metálica. (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	11
Figura 6. Esquema del proceso de estiramiento incremental o spinning (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	12
Figura 7. Backward bulge method (Matsubara et al., 1994). .....	13
Figura 8. Esquema del proceso de Double-Sided Incremental Forming (Peng et al., 2019). .....	13
Figura 9. Esquema del proceso de Single-Point Incremental Forming (Peng et al., 2019). .....	14
Figura 10. Piezas con diferentes formas obtenidas al aplicar conformado incremental (Jeswiet et al., 2005). .....	15
Figura 11. Herramientas utilizadas en SPIF: (a) herramienta hemisférica, (b) bola rodante, (c) herramienta en el extremo (McAnulty et al., 2016). .....	17
Figura 12. Muestras planas cortadas a diferentes anchos para la determinación de los límites de conformabilidad de cada condición: 1) Deformación uniaxial, 2) Deformación plana, 3) Deformación biaxial, 4) Deformación equibiaxial (Inland Steel Company). .....	18
Figura 13. Diagramas de límite de conformabilidad (FLD) para diversas láminas metálicas (Kalpakjian y Schmid, 2009). .....	19
Figura 14. Diagrama FLD policarbonato (Rosa-Sainz, 2020). .....	20
Figura 15. Aplicación del proceso de SPIF a una lámina polimérica (Formisano y Durante, 2024). .....	21
Figura 16. Esquema de la orientación de las cadenas de moléculas entrelazadas de una probeta de policarbonato durante el ensayo de tracción (Formisano y Durante, 2024). .....	27
Figura 17. Curva tensión-deformación ingenieril para un metal genérico (Montes et al., 2014). .....	28
Figura 18. Curva tensión-deformación ingenieril del policarbonato (Ganzenmüller et al., 2016). .....	29
Figura 19. a) Curva tensión-deformación real para distintas velocidades de deformación (Xu y Gao et al., 2016), b) Curva tensión-deformación extraída para el modelo MAT_024 en Engineering Data. ....	30
Figura 20. Dimensiones de la probeta de policarbonato. ....	33
Figura 21. Discretización del espesor en un elemento solid-shell. ....	33
Figura 22. Condiciones de contorno aplicadas en la probeta de policarbonato dentro del entorno ANSYS Workbench. ....	34
Figura 23. Estados del ensayo de tracción: a) Instante inicial ( $t=0$ s), b) Instante intermedio (deformación elástica, $t=0.0016$ s), c) Instante final (deformación plástica, $t=0.001$ s). .....	35
Figura 24. Elementos utilizados para el proceso de conformado incremental monopunto en elementos finitos: a) Lámina de policarbonato, b) Matriz de apoyo, c) Herramienta. ....	37
Figura 25. Dimensiones de los elementos del SPIF. ....	37
Figura 26. a) Mallado de la lámina de policarbonato b) Detalle del mallado con un tamaño más fino en la zona central de la lámina. ....	38
Figura 27. Vista en perspectiva del contacto entre Contact Body (rojo) y Target Bodies (azul). 39	
Figura 28. Evolución del campo de tensiones en la probeta para diferentes estados durante el ensayo de tracción: a) Régimen elástico, b) Comienzo de la zona de estricción, c) Detalle de la formación del cuello, d) Propagación de la zona de estricción, e) Estado final. ....	46

Figura 29. Evolución del campo de deformaciones en la probeta para diferentes estados durante el ensayo de tracción: a) Régimen elástico, b) Comienzo de la zona de estricción, c) Propagación de la zona de estricción, d) Estado final. ....	47
Figura 30. a) Curva de tracción introducida en el módulo Engineering Data, b) Curva tensión-deformación obtenida con LS-Prepost, c) Comparativa de las dos curvas en la misma gráfica. ....	49
Figura 31. Trayectoria o path sobre el que se evalúan los resultados. ....	51
Figura 32. Esquema de la lámina de policarbonato deformada donde se ubican los puntos característicos. ....	53
Figura 33. Representación de las deformaciones principales para los distintos estados estudiados, definidos por la posición de la herramienta: a) Deformación principal mayor, $\epsilon_1$ , b) Deformación principal menor, $\epsilon_2$ . ....	54
Figura 34. Representación de las deformaciones principales a lo largo del tiempo para los puntos característicos: a) Punto I, b) Punto II, c) Punto III. ....	55
Figura 35. Evolución temporal de la tensión de Von-Mises respecto a los puntos característicos: a) Punto I, b) Punto II, c) Punto III. ....	58
Figura 36. Representación de la geometría respecto al plano XZ para los distintos estados estudiados, definidos por la posición de la herramienta: a) Z=0 mm, b) Z=-5 mm, c) Z=-10 mm, d) Z=-15 mm, e) Z=-20 mm. ....	60
Figura 37. Representación del springback para el perfil en el plano XZ. ....	61
Figura 38. Existencia de twisting en el estado final del proceso SPIF. ....	62
Figura 39. Evolución del twisting según el plano XY para distintos estados, definidos por la posición de la herramienta: a) Z=0 mm, b) Z=-5 mm, c) Z=-10 mm, d) Z=-15 mm, e) Z=-20 mm. ....	63
Figura 40. Representación del springback para el perfil en el plano XY. ....	64
Figura 41. Diagramas FLD para los distintos estados estudiados, definidos por la posición de la herramienta: a) Z=-5 mm, b) Z=-10 mm, c) Z=-15 mm, d) Z=-20 mm. ....	66

# Capítulo I

## Introducción

Este capítulo trata de introducir el trabajo realizado, presentando una visión general del documento. En la primera sección se realiza una breve descripción del trabajo y se exponen las motivaciones que han impulsado la realización del mismo. Por otro lado, en la segunda sección se desarrollan los objetivos y se define el alcance del documento.

### 1.1.Descripción general y motivación

Dentro de las disciplinas en las que se sustenta nuestra sociedad actual, la Ingeniería es un área fundamental que combina ciencia, creatividad y tecnología con el objetivo de resolver problemas concretos que mejoran la calidad de vida de las personas. Además, para materializar este propósito resulta esencial que las soluciones aportadas sean prácticas, sostenibles y eficientes. En este marco, la Ingeniería de la Fabricación desempeña un papel clave, ya que se encarga de desarrollar procesos con los que se transforman materias primas en bienes tangibles y útiles que responden a demandas concretas. No obstante, la búsqueda constante de soluciones no solo se limita a cumplir objetivos funcionales sino que abarca la mejora continua de procesos, minimizando costes de producción y el tiempo empleado.

De esta forma, para responder ante las necesidades de la Industria, en la etapa de la planificación de la producción se desarrollan aquellos procesos que mejor se ajustan a dichas necesidades al menor coste posible en base a dos parámetros fundamentales: volumen de producción y complejidad del producto a fabricar. En consecuencia, los procesos convencionales de fabricación en masa se basan en un elevado volumen de producción y una complejidad reducida, generalmente conllevan una elevada inversión inicial en pos de fabricar moldes, herramientas o máquinas utilizadas para la obtención del producto final. A medida que se escala el volumen de producción el coste por unidad se hace cada vez menor, sin embargo, para series pequeñas y medianas o en el caso de piezas con mayor complejidad, el coste unitario de los productos aumentaría notablemente.

En este contexto surge el conformado incremental de chapa (ISF, *Incremental Sheet Forming*), una técnica relativamente reciente que permite fabricar prototipos y series cortas con bajos costes de utillaje. Dentro de esta familia, el conformado incremental monopunto (SPIF, *Single Point Incremental Forming*) consiste en deformar la chapa mediante una herramienta que sigue una trayectoria controlada sin necesidad de matrices específicas. Este enfoque aporta gran flexibilidad y se ha consolidado en el ámbito del prototipado rápido y de la fabricación de geometrías complejas.

Si bien el SPIF en metales ha sido objeto de una amplia investigación experimental y numérica, los polímeros han recibido mucha menos atención. El modelado de estos materiales es extraordinariamente complejo, ya que presentan un comportamiento altamente no lineal bajo solicitaciones mecánicas, una recuperación elástica severa que condiciona la precisión dimensional, un marcado carácter viscoplástico con fuerte dependencia de la velocidad de deformación, así como una elevada sensibilidad a la temperatura que modifica de forma notable su respuesta mecánica. A todo ello se añade una estructura interna muy diferente a la de los metales, que condiciona tanto la anisotropía como la evolución de la deformación.

Estas particularidades explican por qué apenas existen trabajos en los que se utilicen modelos numéricos de elementos finitos (EF) para predecir el comportamiento de polímeros en SPIF. Entre todos los desafíos, la recuperación elástica (*springback*) representa un problema recurrente: aunque puede abordarse experimentalmente, en piezas de geometría compleja resulta extremadamente difícil y poco viable en un entorno industrial.

De ahí surge la motivación de este trabajo: diseñar un modelo numérico de elementos finitos para el conformado incremental monopunto de láminas poliméricas, en este caso policarbonato, con el objetivo de predecir y estudiar su comportamiento. Para ello, se ha realizado previamente la simulación numérica de un ensayo de tracción, cuyos resultados aportan una validación inicial al modelo. Este enfoque pretende contribuir a llenar el vacío existente en la literatura y abrir el camino hacia el uso de la simulación como herramienta para el diseño y optimización de procesos SPIF aplicados a polímeros.

## **1.2.Objetivos**

El objetivo principal de este documento es la validación del modelo numérico de SPIF en lámina de policarbonato con el propósito de aumentar el conocimiento de esta tecnología. Para ello, se ha hecho uso del *solver* LS-DYNA dentro del software ANSYS Workbench. Este objetivo general se ha logrado a través de la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollo de un modelo de EF explícito de un ensayo de tracción que permita la validación del comportamiento del policarbonato a través de curvas tensión-deformación reales obtenidas de la bibliografía.
- Desarrollo y optimización de un modelo explícito de elementos finitos del proceso de SPIF, controlando la topología del mallado, el contacto entre herramienta y pieza, las condiciones de contorno y el comportamiento del material, entre otros.
- Postprocesado parametrizado de resultados obtenidos del modelo de EF y análisis crítico de tensiones y deformaciones.
- Evaluación de la recuperación elástica de la lámina de policarbonato tras la fabricación de una geometría tronco-cónica.

# Capítulo II

## Estado del arte

En este capítulo se lleva a cabo una revisión de los antecedentes relacionados con los procesos de fabricación, poniendo énfasis en los métodos de conformado de chapa. Asimismo, se describen los fundamentos generales del conformado incremental monopunto (SPIF) y su aplicación a materiales no metálicos. Finalmente, se introduce el método de los elementos finitos como herramienta para la simulación numérica del proceso, prestando especial atención al método explícito y sus ventajas en simulaciones no lineales, como es el caso del SPIF en policarbonato.

### 2.1. Procesos de Fabricación en la Industria

La industria manufacturera se apoya en una amplia variedad de procesos para transformar materias primas en productos útiles y tangibles. El tipo de material, la complejidad geométrica, el número de piezas, el volumen de producción o los requisitos funcionales del producto son algunos de los factores que entran en juego a la hora de elegir el proceso adecuado. Estos procesos, que abarcan desde métodos tradicionales hasta tecnologías avanzadas, constituyen la base de la producción industrial moderna.

Desde el punto de vista de la organización de la producción, existen cuatro tipos principales de sistemas de fabricación a nivel industrial: fabricación por lotes, fabricación en masa, fabricación de flujo continuo y producción intermitente. No obstante, en este apartado se va a llevar a cabo una clasificación en base al tipo de proceso de formado, sentando las bases para comprender el contexto en el que se enmarca cada uno, así como sus ventajas y limitaciones que condicionan su aplicabilidad, coste y flexibilidad. De esta forma, se va a distinguir entre los procesos de fabricación más extendidos en la industria: fabricación por moldeo, fabricación por conformación, fabricación por arranque de material y fabricación aditiva.

#### 2.1.1. Fabricación por moldeo

Las primeras piezas fabricadas a través del proceso de moldeo fueron fundiciones de metal y se remontan a un periodo comprendido entre los años 4000 y 3000 a. C., donde se usaban moldes de piedra o metal para la fundición de cobre. Con el tiempo, se han desarrollado diferentes procesos de fundición, cada uno con sus propias características y aplicaciones para cumplir requisitos de diseño específicos (Kalpakjian, 2009). La fabricación por moldeo es una técnica que consiste en dar forma a un material en estado líquido, pastoso o semifluido vertiéndolo en un molde. Tras la solidificación del material, se retira el molde y se obtiene el producto con la forma final deseada. La principal ventaja de este proceso es su capacidad para producir piezas complejas utilizando cualquier material en una sola operación con buena precisión dimensional y acabado superficial. Además, cuenta con una alta repetibilidad y escasos residuos, pudiéndose escalar

fácilmente la producción. No obstante, la principal limitación de este proceso sería el elevado coste de algunos moldes y de los equipos empleados para la fabricación de piezas.

Este método convencional es ampliamente utilizado en la industria y es habitual usarlo para la fabricación de piezas metálicas, técnica conocida como fundición. La clasificación principal de las prácticas de fundición se relaciona con los materiales del molde, la producción de modelos, los procesos de moldeo y los métodos para el llenado del molde con metal fundido. De esta forma, las categorías principales son: moldes desechables (moldes fabricados de materiales refractarios como arena, yeso, cerámicos etc., los cuales se rompen una vez solidificada la fundición), moldes permanentes (utilizados repetidamente y hechos de metal) y moldes compósitos (hechos de dos o más materiales diferentes, que combinan las ventajas de cada material).

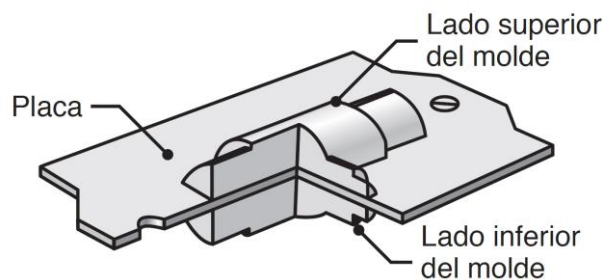


Figura 1. Modelo de placa bipartida típico (Kalpakjian y Schmid, 2009).

También existen diversas técnicas de moldeo para el procesamiento de materiales cerámicos en productos útiles. El procedimiento es similar y consta de los siguientes pasos: trituración o molienda de las materias primas en partículas muy finas, mezcla del material con aditivos (aglutinantes, lubricantes, defloculantes, plastificantes, etc.), moldeo, secado y cocción del material. Los tres procesos básicos de moldeo para los cerámicos son el colado o vaciado de barbotina, el formado plástico y el prensado.

En el caso de los polímeros, se funden a temperaturas relativamente bajas en comparación con los materiales metálicos y cerámicos, por lo tanto, requieren mucha menos energía para ser procesados. En general, los plásticos se pueden moldear en formas complejas con relativa facilidad y a altas tasas de producción. El moldeo por inyección, moldeo de espuma estructural, moldeo por soplado, moldeo rotacional, moldeo por compresión o moldeo por transferencia son algunas de las técnicas más asentadas en la industria para el formado de piezas plásticas utilizando la fabricación por moldeo.

### **2.1.2. Fabricación por conformado**

Los procesos de conformado modifican la forma de un material mediante deformación plástica, sin alterar sustancialmente su volumen. A diferencia del moldeo, en el conformado no se funde el material, sino que se aprovechan sus propiedades dúctiles para obtener la geometría deseada a través de esfuerzos mecánicos. En función de la temperatura a la que se encuentra el material a conformar (en frío o en caliente) y del tipo de esfuerzos aplicados (compresión, tracción, flexión o cizalladura), se distinguen

técnicas convencionales como laminado, forjado, extrusión, trefilado, estirado, plegado o embutido y otras técnicas más novedosas como el conformado incremental, conformado en caliente asistido por láser o conformado *dieless* (sin matrices de soporte). La elección del proceso depende de factores como el tipo de material, la geometría de la pieza, la cantidad de producción y las tolerancias dimensionales requeridas. Aunque la técnica más extendida, la cual representa el 90% de la fabricación por conformado, es el laminado, es por ello que en el siguiente apartado se ampliará la información sobre los procesos de conformado de chapa que más se usan en la industria manufacturera.

Una operación de conformado implica típicamente una secuencia de pasos que se repite a lo largo de la mayoría de los métodos mencionados anteriormente: preparación de tocho o preforma, calentamiento del material (en caso de conformado en caliente), conformado o deformación plástica de la pieza, enfriamiento (en caso de conformado en caliente) y acabado. Este tipo de procesos se aplica comúnmente a materiales metálicos, aunque en las últimas décadas su aplicación se ha extendido con éxito a polímeros, cerámicos e incluso materiales compuestos.

Una ventaja destacada del conformado es que mejora las propiedades mecánicas del material final gracias a la orientación de los granos durante la deformación, por ejemplo, en los materiales metálicos se reduce el tamaño de grano mejorando su resistencia y ductilidad. Además, al no alterar su volumen la cantidad de residuos es prácticamente inexistente y al no haber fusión ni solidificación, se evitan defectos como porosidad o contracción. Sin embargo, las herramientas utilizadas, como matrices o troqueles, pueden ser costosas, lo que hace que estos procesos sean más adecuados para producción en masa o series medianas. La aparición de tensiones residuales, debidas fundamentalmente a procesos de conformado en frío, resulta otro de los aspectos negativos que conlleva este método de fabricación.

### **2.1.3. Fabricación por arranque de material**

Generalmente, las piezas manufacturadas por los métodos descritos anteriormente requieren de operaciones adicionales antes de que el producto esté listo para su uso, esto se conoce como operaciones de acabado. Entre las operaciones de acabado se encuentran los procesos de maquinado o mecanizado, que consisten en eliminar material de una pieza en bruto a través de la producción de virutas hasta lograr la forma final deseada. En su forma más convencional, se realiza mediante herramientas de corte o abrasión que actúan sobre el material con elevada precisión.

Dentro de esta categoría algunos de los procesos más comunes en la fabricación por arranque de material son: torneado o cilindrado (la pieza de trabajo gira y la herramienta se desplaza a lo largo de la longitud de la pieza), tronzado (la pieza de trabajo gira y la herramienta se desplaza hacia dentro de la misma en forma radial), fresado periférico y fresado frontal (en ambos casos la herramienta gira y la pieza se encuentra paralela o perpendicular al eje de la herramienta, respectivamente). Con el avance de la tecnología CNC (Control Numérico por Computadora), estos procesos han alcanzado altos niveles de automatización, repetibilidad y precisión.

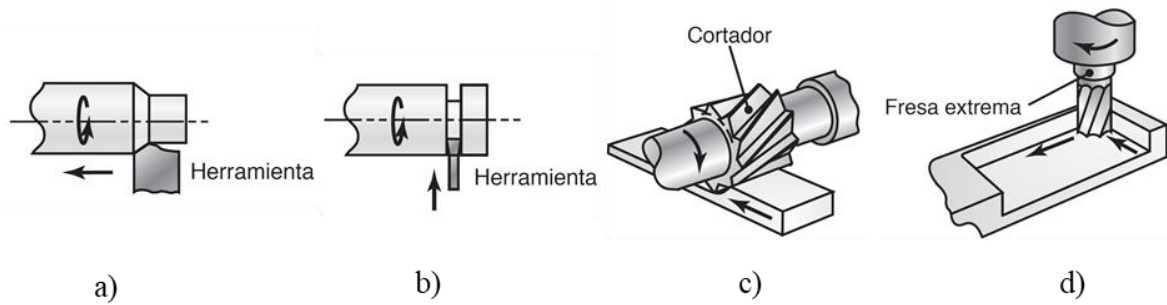


Figura 2. Ejemplos de operaciones de maquinado comunes: a) Torneado, b) Tronzado, c) Fresado periférico, d) Fresado frontal (Kalpakjian y Schmid, 2009).

Velocidad y profundidad de corte, avance, fluidos de corte, ángulos de la herramienta, viruta continua y discontinua, formación de borde acumulado (*built-up edge*), aumento de temperatura, desgaste de la herramienta y maquinabilidad de la pieza son algunos de los factores que influyen en las operaciones de maquinado. Aunque el arranque de material presenta ciertas limitaciones en cuanto al aprovechamiento de materia prima, ya que puede generar una gran cantidad de residuos y por lo general requiere más tiempo y energía que otros procesos de fabricación, su principal fortaleza es la versatilidad y precisión dimensional. Es especialmente útil para piezas de geometría compleja o con requerimientos estrictos de tolerancias y acabados superficiales.

#### 2.1.4. Fabricación aditiva

La técnica de la fabricación aditiva se enmarca en los procesos y operaciones del prototipado rápido, los cuales comparten características como integración de la computadora, producción sin el uso de herramientas y capacidad de producir rápidamente una sola pieza bajo demanda. Estos métodos de fabricación surgen de la necesidad de producir muestras o prototipos sin incurrir en elevados costes de capital y tiempo, además presentan un alto grado de flexibilidad, reducción de residuos y personalización. Sin embargo, la principal desventaja radica en las limitaciones de las propiedades mecánicas respecto a métodos tradicionales.

Los procesos de fabricación aditiva se basan en la construcción de piezas capa por capa, siendo requerido software especializado. Algunos de los métodos más asentados en la industria son: estereolitografía (SLA), modelado MultiJet/PolyJet (MJM/PJM), modelado por deposición fundida (FDM), manufactura de partículas balísticas (BPM), impresión tridimensional (3DP), sinterizado selectivo por láser (SLS), fusión por haz de electrones (EBM), manufactura de objetos laminados (LOM) y formado neto por ingeniería láser (LENS). En la siguiente tabla se lleva a cabo un resumen de la fase de suministro, técnica de creación de capas, tipo de cambio de fase y materiales empleados en cada proceso de fabricación aditiva.

Tabla 1. Resumen comparativo de diferentes procesos de fabricación aditiva según fase de suministro del material, material, técnica empleada y tipo de cambio de fase (Kalpakjian y Schmid, 2009).

<b>Proceso</b>	<b>Fase de suministro</b>	<b>Técnica de creación de capas</b>	<b>Tipo de cambio de fase</b>	<b>Materiales</b>
<b>Estereolitografía</b>	Líquido	Curado de capa líquida	Fotopolimerización	Fotopolímeros (acrilatos, epoxy, resinas coloreables y resinas con relleno)
<b>Modelado MultiJet/PolyJet</b>	Líquido	Curado de capa líquida	Fotopolimerización	Fotopolímeros
<b>Modelado por deposición fundida</b>	Sólido	Extrusión de polímero fundido	Solidificación por enfriamiento	Polímeros (como ABS, policarbonato y polisulfona)
<b>Manufactura de partículas balísticas</b>	Líquido	Deposición por goteo	Solidificación por enfriamiento	Polímeros y cera
<b>Impresión tridimensional</b>	Polvo	Deposición por goteo de aglutinante sobre una capa de polvo	Sin cambio de fase	Cerámica, polímero, polvo metálico y arena
<b>Sinterizado selectivo por láser</b>	Polvo	Capa de polvo	Sinterizado o fusión	Polímeros, metales con aglutinante, metales, cerámicos y arena con aglutinante
<b>Fusión por haz de electrones</b>	Polvo	Capa de polvo	Fusión	Titanio y sus aleaciones, cobalto-cromo
<b>Manufactura de objetos laminados</b>	Sólido	Deposición de material laminado	Sin cambio de fase	Papel y polímeros
<b>Formado neto por ingeniería láser</b>	Polvo	Inyección de chorro de polvo	Sin cambio de fase	Titanio, acero inoxidable, aluminio

## 2.2. Procesos de conformado de chapa

La laminación es el proceso de fabricación más extendido dentro de las operaciones de formado (*forming*). En comparación con los objetos fabricados a través de otros procesos, como fundición y forjado, las piezas fabricadas de chapa ofrecen la ventaja de tener

formas ligeras y versátiles. Es por ello por lo que resulta de gran interés conocer los procesos y equipos para el conformado de chapa. Existen multitud de técnicas para dar forma dependiendo de los requerimientos técnicos del producto o el tipo de material a conformar, así como la calidad del borde de la pieza cortada, la capacidad de la lámina para estirarse uniformemente, la resistencia del material al adelgazamiento, etc.

No obstante, uno de los factores más determinantes a la hora de decantarse por un tipo de proceso concreto es el coste involucrado, tanto del equipo utilizado como de la mano de obra. El coste de los equipos y herramientas varía mucho dependiendo de la complejidad de la pieza, su tamaño o el nivel de automatización. Sin embargo, la selección del proceso óptimo requiere equilibrar los costos con el volumen de producción. Por ejemplo, el embutido profundo requiere matrices y herramientas caras, aunque permite producir un número muy elevado de piezas. Por otro lado, existen métodos de fabricación más versátiles para el conformado de chapa cuyos equipos no requieren una inversión tan elevada, tales como el doblado de chapa o el conformado incremental.

Existen dos grandes grupos donde se pueden clasificar todos los procesos de conformado de chapa: procesos de conformado convencionales y especializados. Dentro del primer grupo se encuentran técnicas de conformado de chapa como cizallado, troquelado, doblado, embutido profundo, entre otros. Por otro lado, los procesos de conformado especializados son conformado explosivo, conformado incremental, conformado por rayo láser, microconformado, termoconformado, etc. A lo largo de esta sección, se ampliará información de los procesos de fabricación más utilizados en la industria, tales como cizallado, doblado, embutición, termoconformado y, dentro de los procesos especializados, conformado incremental.

### **2.2.1. Cizallado**

Por lo general, en los procesos de conformado de láminas se parte de una pieza en bruto que se obtiene mediante corte. Este primer paso, es el método de conformado de chapa conocido como cizallado. El cizallado comienza con la formación de grietas en los bordes superior e inferior de la pieza de trabajo (puntos A, B, C y D de la siguiente figura) debido a la aplicación de esfuerzos cortantes utilizando un punzón y una matriz. Finalmente, estas grietas se encuentran y ocurre la separación completa de material.

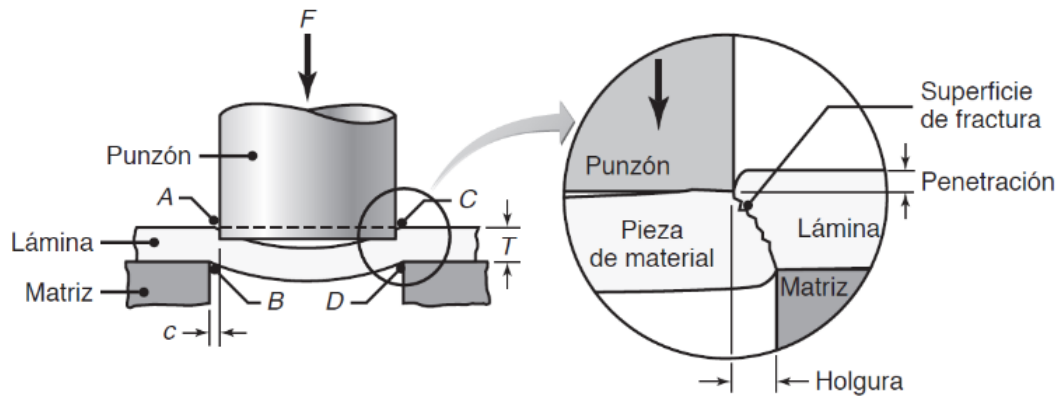


Figura 3. Esquema del cizallado con un punzón y una matriz o dado (Kalpakjian y Schmid, 2009).

Los principales parámetros que gobiernan el proceso de cizallamiento de una pieza son: la forma del punzón y la matriz, la holgura existente entre el punzón y la matriz, la velocidad o la fuerza del punzón y la lubricación. Controlando estos parámetros se determina la calidad del borde de cortado. Por ejemplo, a medida que se aumenta la holgura la superficie del corte se vuelve más áspera y se aumenta la rebaba. Por otro lado, al aumentar la velocidad del punzón se obtienen mejores resultados, es decir, variando los parámetros de proceso se modifica la mecánica de la fractura obteniendo así fractura dúctil o frágil respectivamente. Otro aspecto que resulta fundamental en la técnica de cizallado es la temperatura de trabajo, pudiendo aparecer endurecimiento en los bordes lo cual afectaría a las operaciones de formado subsiguientes.

Las operaciones de cizallado más comunes son el punzonado y el troquelado. Ambos procesos resultan muy versátiles debido a que suelen realizarse en máquinas de control numérico por computadora con portaherramientas de cambio rápido. Otro aspecto característico de este tipo de conformado es el deshecho o las mermas producidas en las operaciones de corte, las cuales pueden llegar al 30% en piezas estampadas grandes. No obstante, se han desarrollado técnicas alternativas para el corte de láminas, como por ejemplo el corte por haz láser, el corte por chorro de agua, etc.

### 2.2.2. Doblado

Seguido del cizallado, el proceso de doblado es una de las operaciones más extendidas en la industria. El doblado se presenta como uno de los procesos fundamentales en el conformado de chapa en la industria automovilística. Es ampliamente utilizado en la fabricación de componentes estructurales, carcasas, perfiles, etc. tanto en series pequeñas como en producción masiva, debido a su simplicidad, rapidez y bajo coste relativo frente a otros procesos. En la siguiente imagen se puede observar la terminología utilizada en el doblado de chapa.

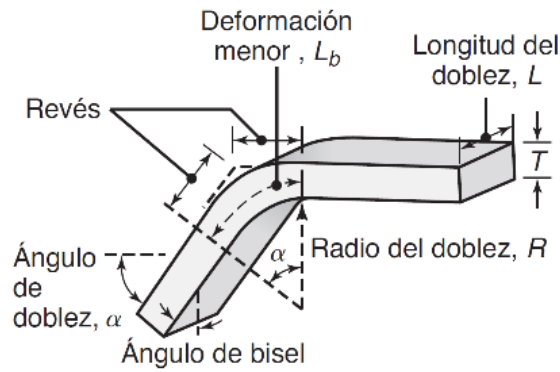


Figura 4. Terminología del doblado (Kalpakjian y Schmid, 2009).

Durante el doblado, la chapa se somete a una combinación de esfuerzos de tracción y compresión en la cara externa e interna, respectivamente. Además, esta operación aporta rigidez a la pieza al aumentar su momento de inercia. El radio mínimo de doblado, la fuerza de doblado o la restitución son algunos de los parámetros a controlar para llevar a cabo esta operación. Un aspecto fundamental en las operaciones de conformado es que la restitución suele compensarse al doblar en exceso la pieza, aunque pueden requerirse varios ensayos para obtener los resultados deseados.

Existen diversas técnicas de doblado, entre las que destacan el doblado en V, doblado en U, doblado con dado deslizante, doblado al aire doblado con rodillo, etc. El método elegido dependerá del ángulo deseado, del tipo de máquina empleada (presa excéntrica, máquina de cuatro correderas, etc.) y del nivel de precisión requerido.

### 2.2.3. Embutición

El embutido o embutición es un proceso en el cual un punzón se desplaza hacia abajo y fuerza a una lámina plana a entrar en una matriz con forma de cavidad, formando una pieza generalmente cilíndrica o copa embutida. La embutición es uno de los procesos de trabajo con metales más importantes debido a su uso generalizado para la fabricación de muchos tipos de productos, desde latas de bebidas y recipientes para alimentos, hasta tanques de combustible.

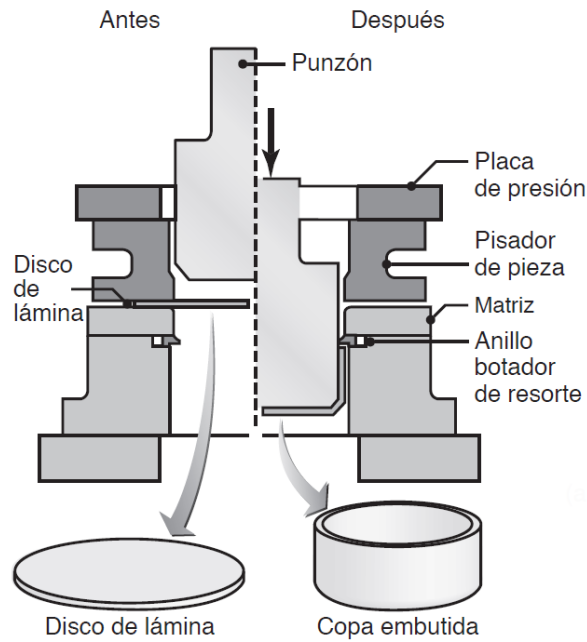


Figura 5. Esquema del proceso de embutido profundo en un disco de lámina metálica. (Kalpakjian y Schmid, 2009).

En cuanto a los equipos utilizados en este proceso, el elemento central es la prensa, ya sea mecánica o hidráulica, encargada de suministrar la fuerza necesaria para conformar la chapa dentro de la matriz. El pisador de la pieza, la matriz y el punzón completarían la máquina herramienta utilizada en los procesos de embutición. Además, con el fin de evitar el desgarramiento de la lámina durante el conformado, existen una serie de técnicas tales como rebordes o frenos de embutido adecuados, una lubricación eficaz, el corte o redondeo de las esquinas de la lámina en bruto, etc. En aplicaciones industriales, estos equipos pueden complementarse con sistemas automáticos de alimentación y extracción de piezas, así como sensores de fuerza y desplazamiento para garantizar la calidad el producto final o lubricación integrada de las piezas a embutir.

En definitiva, la embutición combina principios de mecánica de materiales, diseño de herramientas y control de procesos para lograr piezas con alta precisión dimensional y buen acabado superficial. Gracias a la continua evolución en técnicas de simulación numérica y control automatizado, la embutición sigue siendo una de las tecnologías más competitivas y adaptables en la fabricación de componentes de chapa metálica, permitiendo responder a las demandas de producción en masa y a las exigencias de calidad de la industria.

#### 2.2.4. Termoconformado

El termoconformado es un proceso para dar forma a láminas de materiales poliméricos en un molde mediante la aplicación de calor y presión o vacío. En este proceso, una lámina se sujeta y calienta por encima de la temperatura de transición vítrea del polímero, a continuación se fuerza contra la superficie del molde hasta adaptarse a la forma del mismo y finalmente se deja enfriar. Los materiales más utilizados son termoplásticos tales como:

politereftalato de etileno (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloruro de vinilo (PVC), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA) y policarbonato (PC).

El desgarramiento de la lámina durante su formado, un espesor de pared excesivamente irregular, moldes llenados incorrectamente y la ausencia de detalles superficiales son algunas de las limitaciones de este proceso. Es por ello por lo que se debe controlar en toda la pieza la temperatura, la presión y el tiempo de enfriado. Esto asegurará la conformidad de todas las piezas.

El termoconformado es especialmente valorado por su versatilidad y bajos costes de utillaje en comparación con otros métodos como la inyección de plásticos, esto lo hace ideal para la producción de series pequeñas y medianas. Este proceso se emplea ampliamente en la industria alimentaria, automoción y en aplicaciones médicas. Además, el proceso permite trabajar con una amplia gama de espesores y dimensiones, y su velocidad de producción lo convierte en una opción competitiva para productos de ciclo de vida corto o que requieran cambios frecuentes de diseño.

### 2.2.5. Conformado incremental de chapa

El método de conformado incremental de chapa (*Incremental Sheet Forming, ISF*) se basa en una deformación o estiramiento progresivo de la pieza a conformar. La lámina de material permanece fija y la herramienta encargada de dar forma gira siguiendo una trayectoria preestablecida, por lo tanto, no se hace uso de mandriles, moldes o herramientas especiales y el movimiento de la herramienta determina la forma de la pieza final. La versión más simple de este proceso es la expansión por estiramiento incremental o *spinning* (Figura 6). Por otro lado, el conformado incremental asimétrico de chapas (*Asymmetric Incremental Sheet Forming, AISF*), dentro del cual se enmarcan diversas técnicas tales como el conformado incremental monopunto y multipunto, utiliza una máquina herramienta de control numérico por computadora programada para seguir contornos a diferentes profundidades a través de la superficie de la lámina.

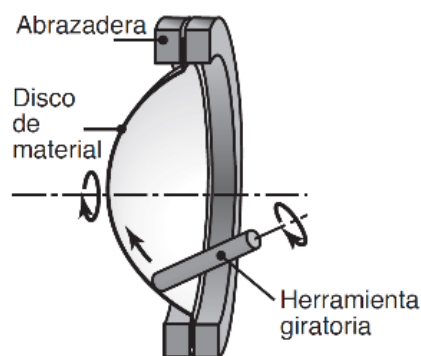


Figura 6. Esquema del proceso de estiramiento incremental o *spinning* (Kalpakjian y Schmid, 2009).

El primer método de AISF fue propuesto por Powell y Andrew (1992), y más tarde, por Matsubara et al. (1994), quienes lo denominaron método de abombado inverso (*backward*

*bulge method*). Tal como se ilustra en la Figura 7, este procedimiento consiste en aplicar presión sobre la chapa únicamente desde un lado mediante la herramienta de conformado, mientras que la cara opuesta permanece libre, salvo en la zona en la que está en contacto con un soporte fijo.

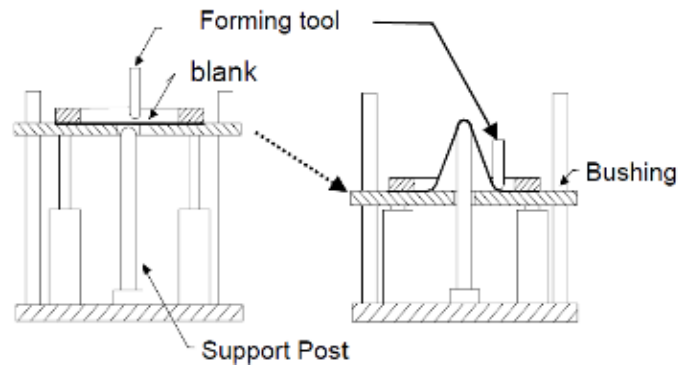


Figura 7. *Backward bulge method* (Matsubara et al., 1994).

Las ventajas principales del conformado incremental son los bajos costos de las herramientas y la alta flexibilidad de las formas que pueden producirse, así como su gran versatilidad. Este proceso ha sido utilizado para el prototipado rápido de piezas de lámina metálica y se ha intensificado su uso gracias a la evolución de las tecnologías CAD/CAM. No obstante, el principal inconveniente que presenta se debe a las bajas tasas de producción y las limitaciones relativas a los materiales que pueden formarse.

#### 2.2.5.1. Conformado incremental multipunto

El conformado incremental de doble punto (*Two Point Incremental Forming*, TPIF) es una variante del conformado incremental asimétrico en la que se utilizan dos herramientas o puntos de contacto para dar forma a la chapa. Generalmente, uno de estos puntos corresponde a la herramienta que sigue la trayectoria preestablecida, mientras que el segundo punto sirve de apoyo para dar forma a la lámina.

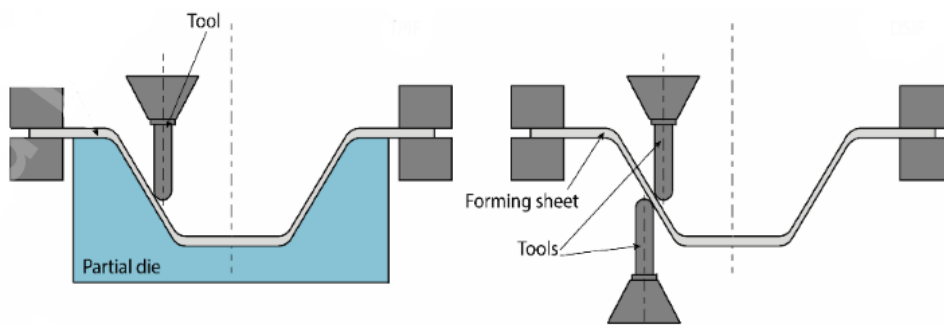


Figura 8. Esquema del proceso de Double-Sided Incremental Forming (Peng et al., 2019).

La técnica TPIF fue una consecuencia del desarrollo de procesos de conformado asimétrico y la implementación del control numérico por computadora (CNC). El TPIF resulta especialmente útil en la fabricación de componentes con tolerancias más exigentes

o geometrías más complejas que las alcanzables mediante SPIF. Además, este método permite trabajar con materiales más resistentes o chapas de mayor espesor, ya que el segundo punto de apoyo ayuda a controlar el flujo de material y a disminuir el riesgo de rotura. No obstante, el TPIF implica un equipamiento más complejo, ya que la sincronización y el ajuste del segundo punto de contacto deben realizarse con precisión para evitar defectos superficiales o deformaciones no deseadas.

#### 2.2.5.2. Conformado incremental monopunto

El conformado incremental monopunto (*Single Point Incremental Forming, SPIF*) es la configuración más extendida dentro de las técnicas de conformado incremental de chapa. Los primeros en aplicar esta tecnología fueron Jewiest y Hagan (2002) y surgió como variante al TPIF en el que la cara contraria a la herramienta que deforma la pieza queda libre, de esta forma una única herramienta se desplaza siguiendo una trayectoria controlada por CNC sobre una chapa fijada de manera rígida. La deformación se produce de forma localizada y progresiva, capa a capa, sin necesidad de matrices conformadoras completas. Esta característica reduce drásticamente los costes de utillaje, lo que convierte al SPIF en una opción muy atractiva para la fabricación de prototipos y piezas personalizadas, ya que permite obtener formas complejas con cambios de geometría sin modificar el equipo principal (Jewiest et al., 2005).

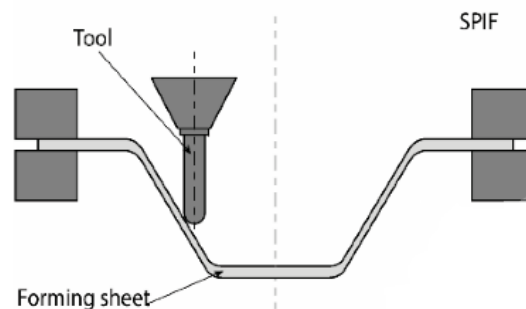


Figura 9. Esquema del proceso de Single-Point Incremental Forming (Peng et al., 2019).

Además de su flexibilidad, el SPIF presenta ventajas como tiempos reducidos de preparación y adaptabilidad a una amplia variedad de materiales, incluyendo metales, polímeros y laminados compuestos. Sin embargo, esta técnica también presenta desafíos, como una menor precisión dimensional, tiempos de conformado más largos en comparación con métodos convencionales y un mayor *springback* que puede requerir compensaciones en el diseño de la trayectoria. Pese a estas limitaciones, el SPIF ha ganado relevancia en entornos donde la personalización, la reducción de costes iniciales y la capacidad de producir geometrías no convencionales son prioridades, consolidándose como una herramienta clave en el desarrollo ágil de nuevos productos.

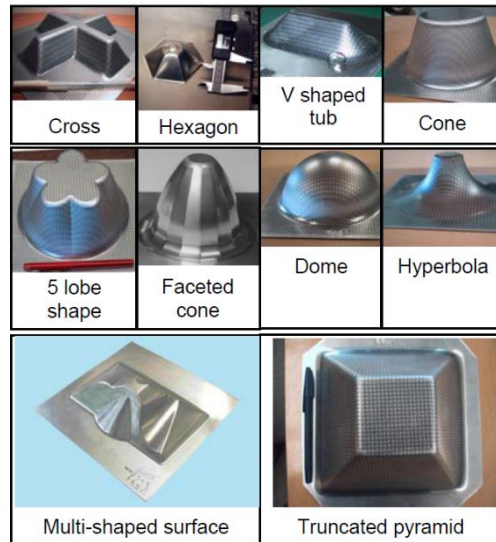


Figura 10. Piezas con diferentes formas obtenidas al aplicar conformado incremental (Jeswiest et al., 2005).

En la siguiente sección se desarrollarán los fundamentos y los aspectos clave que afectan a la técnica del conformado incremental monopunto, así como se profundizará en los parámetros que gobiernan este proceso de cara a la obtención de resultados más precisos.

### 2.3. Fundamentos del conformado incremental monopunto (SPIF)

Como ya se ha introducido anteriormente, el conformado incremental monopunto (SPIF) es una tecnología de conformado sin utillaje específico en la que una herramienta, habitualmente esférica, desplaza localmente el material de una lámina sujeta en su perímetro, siguiendo trayectorias controladas por CNC. Esta técnica permite obtener geometrías complejas de forma flexible, con bajo coste y sin necesidad de matrices. Aunque fue concebida inicialmente para metales dúctiles, en los últimos años ha sido aplicada con éxito a materiales poliméricos y compuestos (Jeswiest et al., 2005; Bagudanch et al., 2018).

El SPIF se caracteriza por acumular deformaciones plásticas localizadas en pequeñas regiones de la lámina, reduciendo así los esfuerzos globales requeridos. Esta particularidad permite trabajar con espesores reducidos, sin llegar a provocar fallos prematuros, así como adaptarse a variaciones de geometría sin necesidad de modificar herramientas. Sin embargo, factores como la precisión dimensional, el tiempo de procesado, la rugosidad superficial o los límites de conformabilidad están directamente condicionados por una serie de parámetros de proceso, propiedades del material, y estrategias de trayectoria.

En este apartado se describen los elementos clave que afectan al proceso SPIF, con el fin de establecer una base teórica que sirva de apoyo para el desarrollo de los capítulos siguientes.

### **2.3.1. Influencia de los parámetros del proceso SPIF**

Los parámetros de proceso en SPIF pueden clasificarse en dos grupos: cualitativos, como el tipo de material, la geometría de la herramienta o la estrategia de trayectoria; y cuantitativos, como el avance (*feed rate*), la profundidad de paso (*step down*) o la velocidad de rotación. La correcta elección de estos parámetros es esencial para garantizar un buen rendimiento del proceso, controlar el espesor final, evitar fallos por fractura o pérdida de estabilidad y asegurar una geometría precisa. A continuación, se desarrollan los principales parámetros documentados en la literatura sobre SPIF.

#### **2.3.1.1. Material y espesor**

Los materiales empleados en SPIF deben presentar buena ductilidad y capacidad de endurecimiento. De forma generalizada, las aplicaciones del conformado incremental de chapa se han desarrollado principalmente en metales, incluyendo aceros, aleaciones de aluminio, cobre, latón, titanio, magnesio y platino (Jewiest et al., 2005; Jurisevic et al., 2006), siendo las aleaciones de aluminio AA1050-O y AA3003-O las más utilizadas. Para materiales poliméricos, se ha investigado el comportamiento de polímeros comerciales como policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), polioximetileno (POM), polietileno (PE), poliamida (PA), policarbonato (PC) y tereftalato de polietileno (PET) (Silva et al., 2010), observándose una buena capacidad de conformado. La ventaja principal de estos materiales es su menor límite elástico en comparación con los metales, lo que permite alcanzar deformaciones significativas sin necesidad de la aplicación de grandes fuerzas.

El espesor de la lámina influye significativamente en la conformabilidad y en las fuerzas requeridas. Para metales, se trabaja normalmente con espesores de 0.3 a 2 mm, mientras que para polímeros se han alcanzado hasta 3 mm, e incluso más, debido a su menor módulo elástico (Silva et al., 2010).

#### **2.3.1.2. Herramienta y trayectoria**

Las herramientas en SPIF son generalmente de acero endurecido o carburo, y pueden presentar distintas geometrías, tales como esfera simple, esfera rotante libre o esfera de extremo plano. La herramienta esférica simple es la más común por su sencillez y menor fricción (Jeswiet y Hagan, 2003). Además, el tamaño del radio de la herramienta afecta el área de contacto y la distribución de la deformación. Mientras que radios pequeños, entre 4 y 8 milímetros, concentran la deformación e incrementan el riesgo de fractura; radios grandes de 16 a 20 milímetros, proporcionan deformación más uniforme y requieren mayor fuerza (Meier et al., 2011).

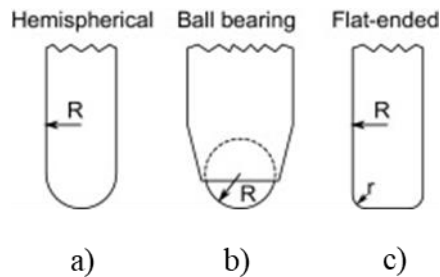


Figura 11. Herramientas utilizadas en SPIF: (a) herramienta hemisférica, (b) bola rodante, (c) herramienta en el extremo (McAnulty et al., 2016).

Las trayectorias de la herramienta se definen en el programa CNC y condicionan la distribución de deformaciones, la rugosidad final y la precisión de la geometría. Existen principalmente tres estrategias: trayectorias por contorno con *step down* constante, trayectorias helicoidales y estrategias en dos etapas (Filice et al., 2002; Jeswiet et al., 2005). Siendo las trayectorias por contorno las más extendidas y donde el avance vertical entre capas ( $\Delta z$ ) se mantiene constante, siendo habitual usar valores de 0.2 a 0.6 milímetros. En estrategias avanzadas, se realizan pasadas de desbaste con grandes *step downs* seguidas de pasadas de acabado con trayectorias más finas, lo que permite obtener geometrías complejas con mejor control de deformación (Young y Jeswiet, 2004).

El avance (*feed rate*) define la velocidad de desplazamiento lineal de la herramienta y suele fijarse entre 1000 y 12000 mm/min. En general, su efecto sobre la conformabilidad es limitado, aunque influye en la duración del proceso y en la calidad de acabado superficial (Pereira Bastos et al., 2016).

### 2.3.1.3. Lubricación

La fricción entre la herramienta y la lámina es un aspecto crítico del SPIF. Una lubricación adecuada no solo reduce las fuerzas del proceso, sino que también minimiza el calentamiento localizado y mejora la calidad superficial. En metales, se emplean grasas industriales, aceites minerales o lubricantes sólidos como grafito (Kopac y Kampus, 2005; Bambach et al., 2009). Para polímeros, la mejor opción es una mezcla de agua y jabón, dada la menor generación de calor (Silva et al., 2010; Franzen et al., 2009).

### 2.3.2. Conformabilidad

La conformabilidad de un material se define como su capacidad para soportar deformaciones plásticas sin que se produzcan defectos tales como la aparición de arrugas, fractura, estricción localizada o pérdida significativa de espesor. Este concepto resulta de gran relevancia en los procesos de conformado de chapa, ya que está condicionado por la aparición de inestabilidades mecánicas, entre ellas la formación de cuellos (*necking*) o la rotura del material al alcanzarse deformaciones críticas. De esta forma, conocer el límite de conformabilidad de un material permite anticipar su comportamiento frente a diferentes sollicitaciones. La conformabilidad depende de múltiples factores, entre los que destacan el espesor inicial, las propiedades mecánicas intrínsecas del material, así como

parámetros propios del proceso, como la geometría de la herramienta, la lubricación empleada, la temperatura, la velocidad de conformado, entre otros. (Groover, 2020).

Una herramienta fundamental para la evaluación de la conformabilidad son los diagramas de límite de conformado (*Forming Limit Diagrams*, FLD). Estos diagramas se construyen probando muestras planas cortadas a diferentes anchos (Figura 12) y representan gráficamente las deformaciones principales que puede soportar una chapa antes de alcanzar la inestabilidad plástica hasta su fractura. En el eje horizontal se representa la deformación principal menor y en el eje vertical la deformación principal mayor. La curva límite que se obtiene mediante ensayos experimentales divide el espacio en dos regiones: por debajo de la curva (el material puede deformarse de manera estable) y por encima de ella (se espera la aparición de fallos). En la Figura 13 se muestran el FLD de varias láminas metálicas y como puede observarse, mientras más alta sea la curva mejor será la conformabilidad de esa lámina de metal en particular (Kalpakjian y Schmid, 2009; Goodwin, 1968).

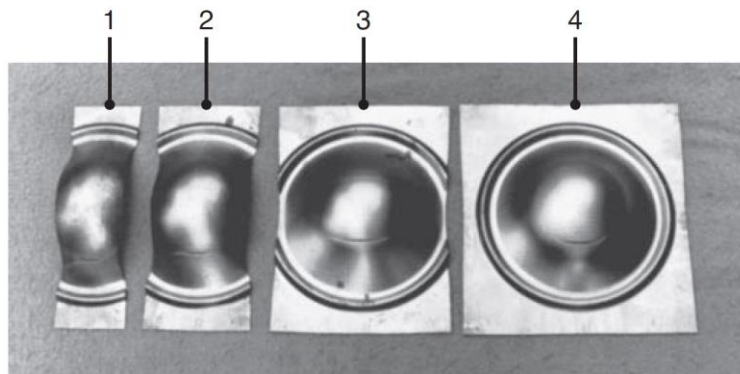


Figura 12. Muestras planas cortadas a diferentes anchos para la determinación de los límites de conformabilidad de cada condición: 1) Deformación uniaxial, 2) Deformación plana, 3) Deformación biaxial, 4) Deformación equibiaxial (Inland Steel Company).

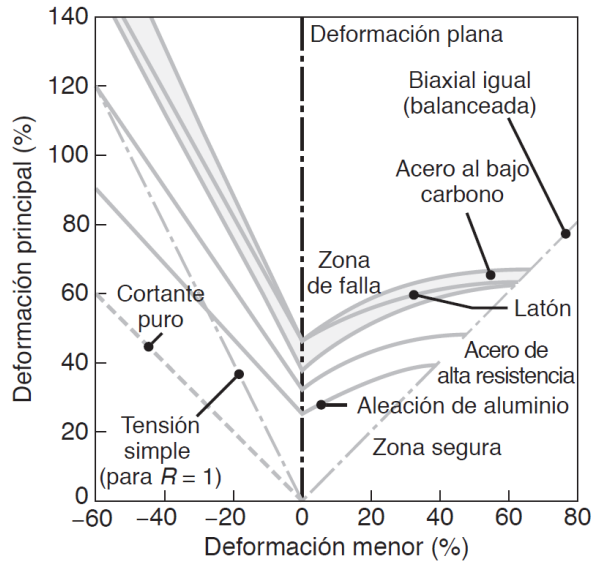


Figura 13. Diagramas de límite de conformabilidad (FLD) para diversas láminas metálicas (Kalpakjian y Schmid, 2009).

Además, los diagramas FLD resultan especialmente útiles porque ofrecen una visión global de la conformabilidad bajo distintos estados de deformación, desde tensión biaxial ( $\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = 1$ ) hasta compresión uniaxial ( $\beta = -2$ ), lo que permite evaluar la respuesta del material en una amplia gama de procesos de conformado. Además, constituyen una referencia indispensable para la validación de modelos numéricos, dado que los resultados de simulación pueden compararse directamente con la curva límite, identificando las zonas críticas de la pieza donde se supera el umbral de conformabilidad (Kalpakjian y Schmid, 2009).

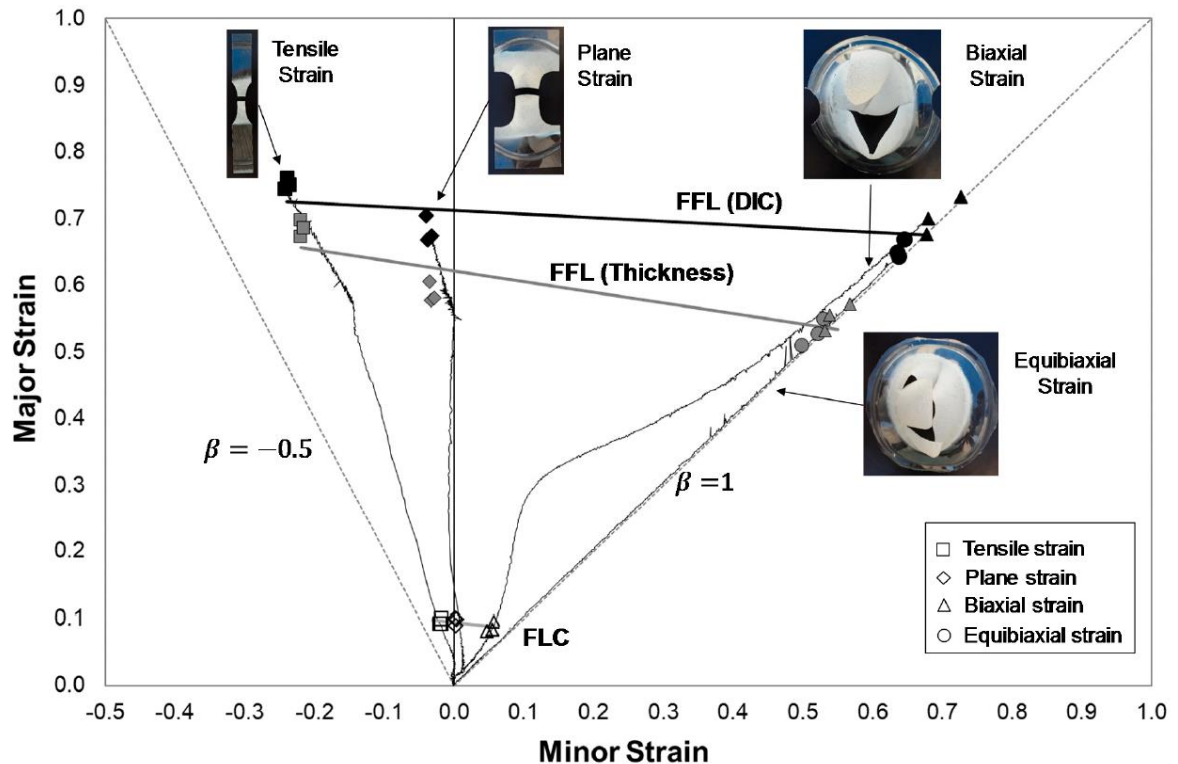


Figura 14. Diagrama FLD policarbonato (Rosa-Sainz, 2020).

En este contexto, en el Capítulo 4 de este trabajo se hará uso de esta herramienta para analizar el comportamiento de la lámina de policarbonato a la que se le aplicará el conformado incremental. De esta forma, la Figura 14 presenta los límites de conformabilidad y las correspondientes deformaciones de fallo para láminas de policarbonato de 1 milímetro de espesor en el espacio de deformaciones principales (Rosa-Sainz et al, 2020).

### 2.3.3. Aplicación del conformado incremental al policarbonato

Históricamente, el conformado incremental monopunto ha estado vinculado principalmente al trabajo con metales, debido a su elevada ductilidad y resistencia. Sin embargo, los polímeros presentan un gran potencial para aplicaciones donde se requiera flexibilidad en el diseño y tiempos de desarrollo reducidos. El conformado incremental monopunto aplicado a láminas de polímeros (Figura 15) ha experimentado un creciente interés en los últimos años, impulsado por la necesidad de fabricar componentes ligeros, de bajo coste y con alta personalización geométrica. A diferencia de los metales, los polímeros presentan un comportamiento viscoelástico que influye de manera significativa en el desarrollo del proceso, afectando tanto la distribución de tensiones como la recuperación elástica (*springback*) (Bagudanch et al., 2018). Esto implica que la adaptación de la tecnología SPIF a materiales poliméricos requiere un análisis específico de las condiciones de procesado.

El primer intento significativo de aplicar la técnica de conformado incremental a un termoplástico fue propuesto por Franzen et al. (2009) y se llevó a cabo a una lámina de

policloruro de vinilo (PVC). A partir de este hito, investigaciones posteriores exploraron diferentes tipos de termoplásticos comerciales, así como el análisis de los efectos de la trayectoria de la herramienta o la temperatura y fuerza de conformado (Bagudanch et al., 2015), confirmando la viabilidad del proceso aplicado a polímeros. No obstante, entre todos los plásticos que se han ensayado, el policarbonato, también conocido como “metal transparente” debido a sus notables características, resulta el candidato perfecto para ser conformado a través del ISF.



Figura 15. Aplicación del proceso de SPIF a una lámina polimérica (Formisano y Durante, 2024).

El método de conformado incremental de láminas poliméricas permite generar amplias zonas de deformación homogénea, evitando gradientes significativos de esfuerzo y deformación. Esto proporciona una mayor conformabilidad del material en comparación con los procesos convencionales de conformado de chapa. Sin embargo, estudios sobre la conformabilidad de piezas poliméricas fabricadas mediante ISF emplean metodologías derivadas de metales, que no siempre reflejan con precisión el comportamiento de los termoplásticos (Formisano et al., 2017). La aparición de fallos y defectos, como torsiones y arrugas en piezas de ISF poliméricas, influye de manera notable en la calidad del producto, lo que hace necesario consolidar métodos existentes o desarrollar nuevas estrategias para evaluar la conformabilidad.

No obstante, aunque se haya consolidado la aplicación del conformado incremental de chapa metálica para la fabricación de piezas y prototipos, se hace necesario un estudio más profundo para garantizar su aplicación en materiales poliméricos. De esta forma, en los apartados siguientes se desarrollará el trabajo que se ha llevado a cabo siguiendo la línea de investigación en la cual se encuentra esta técnica.

## **2.4. Análisis de Elementos Finitos**

Para llevar a cabo la simulación y el modelado numérico del proceso SPIF se ha hecho uso de la herramienta Ansys LS-DYNA, dentro del software comercial ANSYS Workbench. De esta forma las simulaciones realizadas se han basado en el uso del método de los elementos finitos (*Finite Elements Method*, FEM), concretamente en una integración explícita. En este apartado se van a presentar los fundamentos del FEM, el cual se aplicará al proceso de conformado incremental monopunto de lámina de policarbonato. Dadas las características del sistema que se quiere resolver, el FEM presenta una serie de limitaciones en cuanto a la integración de la solución, por ello en esta sección también se van a describir los fundamentos del método explícito en el cual se apoya Ansys LS-DYNA.

### **2.4.1. Fundamentos del método de los elementos finitos**

El método de los elementos finitos es una técnica numérica ampliamente utilizada para la resolución de problemas de ingeniería que involucran estructuras, sólidos y fluidos. Su objetivo principal es aproximar soluciones de problemas de equilibrio, deformación y transporte, los cuales se describen mediante ecuaciones diferenciales parciales, transformándolos en un sistema algebraico que puede ser resuelto mediante cálculo computacional. El principio básico del FEM consiste en dividir un dominio complejo en subdominios más simples, denominados elementos finitos, conectados entre sí a través de nodos, lo que comúnmente se conoce como mallado. Cada elemento se describe mediante funciones de forma que aproximan el comportamiento del campo de interés. Al ensamblar todos los elementos, se obtiene un sistema global de ecuaciones que representa el comportamiento del modelo completo.

Una característica esencial del FEM es su capacidad de manejar problemas no lineales, ya sea porque la pieza a simular sufre grandes deformaciones, el material cuenta con un comportamiento elastoplástico o viscoelástico, o por las condiciones de contacto y frontera. La solución de estos problemas no lineales se realiza generalmente mediante métodos iterativos, como el método de Newton–Raphson, en formulaciones implícitas, o mediante integración temporal directa en formulaciones explícitas.

En el contexto de simulación de polímeros y procesos de conformado incremental, el FEM permite analizar la evolución de esfuerzos, deformaciones y fallos locales, lo cual es difícil de predecir mediante análisis puramente teóricos. (Bathe, 1996; Zienkiewicz y Taylor, 2005)

### **2.4.2. Limitaciones del análisis**

Sin embargo, a pesar de su versatilidad, el FEM presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas para interpretar correctamente los resultados:

- Dependencia del mallado: la precisión de la solución está directamente relacionada con la calidad y el refinamiento de la malla. Una malla demasiado gruesa puede suavizar fenómenos localizados mientras que una malla

excesivamente fina aumenta significativamente el tiempo de cálculo y el coste computacional.

- Sensibilidad de la definición del material y condiciones de frontera.
- Inestabilidades numéricas: los problemas no lineales, especialmente aquellos que involucran ablandamiento (*softening*) o localización de las deformaciones, pueden generar divergencia en *solvers* implícitos.
- Simplificaciones inherentes: aunque el FEM permite modelar geometrías complejas, siempre implica una aproximación. Elementos de tipo continuo no capturan completamente fenómenos microscópicos como la nucleación de grietas, la orientación molecular en polímeros o los efectos de escala muy pequeña.

### 2.4.3. Aplicación del método explícito

El método explícito constituye una formulación temporal directa del FEM, en la que los estados de tensión y deformación se actualizan paso a paso sin necesidad de resolver un sistema global de ecuaciones implícitas. Una de sus principales ventajas frente a las pérdidas de convergencia del método implícito es la estabilidad frente a inestabilidades localizadas. Al avanzar en pequeños incrementos de tiempo, el método explícito permite capturar la evolución de los campos de tensiones y deformaciones para validar el modelo numérico. Esta estrategia es especialmente útil para problemas dinámicos o altamente no lineales, tales como impactos, choques y explosiones o el caso que ocupa este trabajo, la simulación del SPIF en policarbonato.

Sin embargo, la eficiencia del método explícito depende de cumplir criterios de estabilidad de tiempo, en los que el valor del paso de tiempo ( $\Delta t$ ) no puede superar un valor crítico ( $\Delta t_{crit}$ ) representado en la Ecuación (1). Este hecho puede traducirse en tiempos de simulación elevados, especialmente en modelos con mallado fino o geometrías extensas. Por ello, para garantizar la robustez en la simulación, el método explícito se combina con técnicas de simplificación, como el escalado de tiempo (*time scaling*) o escalado de masa (*mass scaling*).

$$\Delta t < \Delta t_{crit} \quad (1)$$

$$\Delta t = \frac{L_s}{c} \quad (2)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

Donde  $L_s$  es la longitud característica del elemento de menor tamaño del mallado y  $c$  es la velocidad del sonido a través del material (dependiendo a su vez de la densidad, el límite elástico y el coeficiente de Poisson). De esta forma, un tamaño menor de  $\Delta t$  incrementa el número de pasos a resolver, aumentando el tiempo de simulación. Sin embargo, dado un valor máximo de  $\Delta t$ , es posible reducir el número de pasos de tiempo utilizando *time scaling*, que consiste en aumentar artificialmente la velocidad del proceso físico y reducir el tiempo de simulación. No obstante, esta técnica podría provocar la inestabilidad de la solución como consecuencia de la alta velocidad de avance.

Otro método para reducir el tiempo de simulación consiste en aumentar la densidad del material. En consecuencia, las constantes  $c$  y  $\Delta t$  aumentan, reduciendo el número de pasos de tiempo de la simulación. Este método se conoce como *mass scaling*.

Los métodos de *time scaling* y *mass scaling* deben aplicarse bajo ciertas condiciones. En el caso del *time scaling*, al aumentar la velocidad, el efecto dinámico adquiere mayor importancia y las fuerzas de inercia pueden provocar resultados no deseados. Se debe prestar especial atención al momento en que dos cuerpos entran en contacto. En lo que respecta al *mass scaling*, el efecto es similar, aunque en este caso es el incremento virtual de la densidad lo que provoca un aumento de las fuerzas de inercia (Surech, 2014).

#### **2.4.4. Particularidades de los polímeros**

La aplicación del método de los elementos finitos (FEM) a polímeros plantea una serie de retos que lo diferencian de forma significativa respecto a los metales. A diferencia de estos últimos, cuyo comportamiento elastoplástico se encuentra ampliamente caracterizado y respaldado por décadas de investigación, los polímeros presentan un comportamiento mucho más complejo de modelar debido a su naturaleza viscoelástica y viscoplástica. Esto implica que la respuesta mecánica depende de forma notable no solo de la magnitud de la carga, sino también de la velocidad de deformación y de la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso. Así, propiedades como el límite elástico, la resistencia a la tracción o el coeficiente de endurecimiento no se mantienen constantes, sino que varían según las condiciones de carga, lo que exige el empleo de modelos constitutivos avanzados capaces de capturar dicha sensibilidad.

Uno de los principales desafíos que surgen en este campo es el fenómeno de la recuperación elástica o *springback*, que en polímeros es mucho más acusado que en metales. Esta característica condiciona de manera crítica la precisión dimensional de las piezas conformadas, ya que, tras la retirada de la herramienta, las láminas tienden a recuperar parte de su forma original. Modelar este fenómeno requiere el uso de leyes de comportamiento no lineales e incluso dependientes del tiempo, lo que incrementa la complejidad computacional y la dificultad de validación experimental (Edwards et al., 2020).

A esta problemática se añade la heterogeneidad estructural de los polímeros, ya que el grado de anisotropía varía de manera significativa en función de su naturaleza amorfa o semicristalina. Esta anisotropía influye en la evolución de la deformación, en la localización de esfuerzos y, en consecuencia, en la predicción de fenómenos como el inicio del fallo o la formación de cuello. Todo ello explica que la bibliografía existente sobre la aplicación de FEM a polímeros en procesos de conformado incremental sea muy reducida si se compara con el campo de los metales.

En lo referente al conformado incremental monopunto (SPIF), los trabajos publicados hasta la fecha se centran en un número limitado de polímeros comerciales como PVC, PP, PE, PA o PC, con especial atención al policarbonato debido a su elevada resistencia. Investigaciones como las de Silva et al. (2010) y Marques et al. (2012) han demostrado

la viabilidad del SPIF en chapas poliméricas, destacando la influencia de la temperatura y la velocidad de deformación en la calidad de las piezas obtenidas. Más recientemente, estudios como el de Gatea et al. (2017) y el de Göttmann et al. (2013) han profundizado en la aplicación de modelos numéricos para predecir el comportamiento de polímeros en SPIF, pero aún existe un vacío evidente en la literatura que limite la capacidad de generalizar resultados y establecer guías de diseño robustas.

En este contexto se enmarca el presente trabajo, que busca contribuir a cubrir dicha laguna mediante el desarrollo y validación de un modelo numérico de elementos finitos aplicado al policarbonato en SPIF. Este enfoque no solo permite analizar de forma sistemática parámetros como tensiones, deformaciones, *springback* o *twisting*, sino también sentar las bases para futuras investigaciones orientadas a optimizar el uso de polímeros en procesos de fabricación avanzada.



# Capítulo III

## Metodología

En este capítulo se describe la estrategia seguida para abordar el modelado numérico del proceso SPIF aplicado a una lámina de policarbonato. Se detallan las técnicas utilizadas para obtener el comportamiento mecánico del material, el diseño y condiciones del ensayo experimental, así como los pasos seguidos en la construcción del modelo numérico. Esto incluye la preparación de la geometría, el mallado, las condiciones de contacto, la aplicación de las trayectorias de herramienta y los parámetros definidos en la simulación explícita.

### 3.1. Validación del modelo

El policarbonato destaca por la combinación de diversas propiedades mecánicas y fisicoquímicas, incluyendo alta tenacidad, rigidez y resistencia, y capacidad de soportar calor y llama (comparado con otros polímeros), durabilidad prolongada, resistencia a impactos, estabilidad térmica, buen aislamiento eléctrico, transparencia sobresaliente, entre otros. En condiciones normales, como en su estado fundido o en piezas moldeadas sin orientación, el policarbonato presenta un comportamiento isotrópico, típico de los polímeros amorfos, con propiedades mecánicas, térmicas y ópticas uniformes en todas las direcciones. No obstante, puede adquirir anisotropía si durante el procesado se inducen orientaciones moleculares. En estos casos, las cadenas poliméricas, formadas por fuertes enlaces covalentes a lo largo de su eje, se alinean ante la aplicación de un esfuerzo y se alcanza el punto de fluencia. A partir de entonces, esta fase implica la ruptura de enlaces de van der Waals y la aparición de deformaciones permanentes, provocando un aumento de la deformación con reducción del esfuerzo.

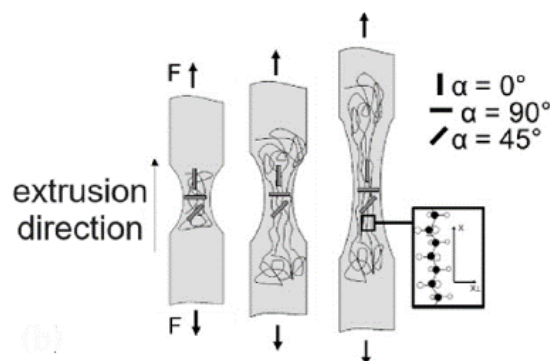


Figura 16. Esquema de la orientación de las cadenas de moléculas entrelazadas de una probeta de policarbonato durante el ensayo de tracción (Formisano y Durante, 2024).

En este contexto, el ensayo de tracción es una de las pruebas mecánicas más utilizadas para la caracterización de materiales, ya que permite determinar propiedades fundamentales como el límite elástico, la rigidez, la deformación y la tensión de rotura, etc. A través de este ensayo se obtiene la curva esfuerzo-deformación, la cual describe el comportamiento del material bajo carga uniaxial y constituye una herramienta esencial para el diseño de componentes y la validación de modelos numéricos.

Es importante destacar que, en los ensayos de tracción, pueden obtenerse dos tipos de curvas: las curvas ingenieriles (Figura 17), que se construyen a partir de magnitudes nominales utilizando las dimensiones iniciales de la probeta, y las curvas reales o verdaderas, que se derivan de los valores experimentales corregidos en función de la sección instantánea y de la deformación real. Mientras las curvas ingenieriles son útiles para una descripción general del comportamiento, las curvas verdaderas reflejan de manera más precisa la respuesta del material, especialmente en las etapas de deformación plástica, siendo estas últimas fundamentales en simulaciones y análisis avanzados.

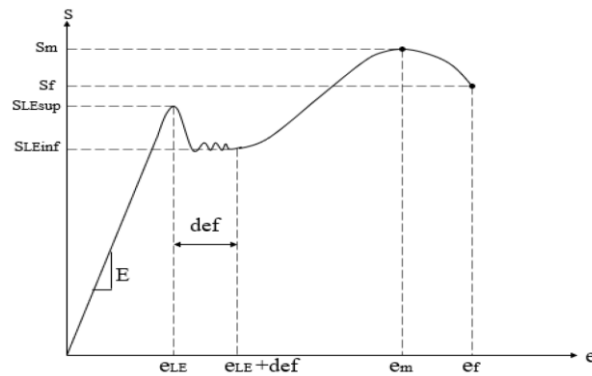


Figura 17. Curva tensión-deformación ingenieril para un metal genérico (Montes et al., 2014).

Como es común en elementos finitos, la descripción del material a través de la ley de comportamiento en el módulo LS-DYNA se realiza introduciendo la curva tensión-deformación real. Es decir, requiere introducir los datos en formato de deformación verdadera (*true strain*,  $\epsilon_{real}$ ) y tensión verdadera (*true stress*,  $\sigma_{real}$ ) y no en términos ingenieriles ( $\epsilon_{ing}$ ,  $\sigma_{ing}$ ). Para realizar la conversión de las variables ingenieriles a las magnitudes verdaderas se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{real} = \sigma_{ing} \cdot (1 + \epsilon_{ing}) \quad (4)$$

$$\epsilon_{real} = \ln(1 + \epsilon_{ing}) \quad (5)$$

Como se muestra en la Figura 18, para los materiales poliméricos la curva ingenieril difiere en gran medida con las curvas ingenieriles de los metales. En la primera parte de la curva se observa la zona elástica, donde la relación entre tensión y deformación es aproximadamente lineal, aunque no perfectamente recta, lo que indica una ligera no linealidad en la respuesta inicial, como suele ocurrir en polímeros no elastómeros. Posteriormente, la curva alcanza un máximo de tensión, que corresponde al límite elástico o resistencia máxima del material previa a la deformación plástica. A partir de ese punto,

se produce una disminución de la tensión ingenieril, que se debe a que la sección de la probeta se reduce mientras el material continúa deformándose.

Tras este descenso inicial, aparece una zona de fluencia en la que la deformación sigue aumentando de manera significativa mientras la tensión se mantiene aproximadamente constante. Esta meseta indica que el material tiene la capacidad de sufrir grandes deformaciones plásticas sin un incremento notable de carga. Finalmente, tras este régimen, el material continúa deformándose hasta alcanzar la fractura, sin una recuperación de la tensión máxima inicial.

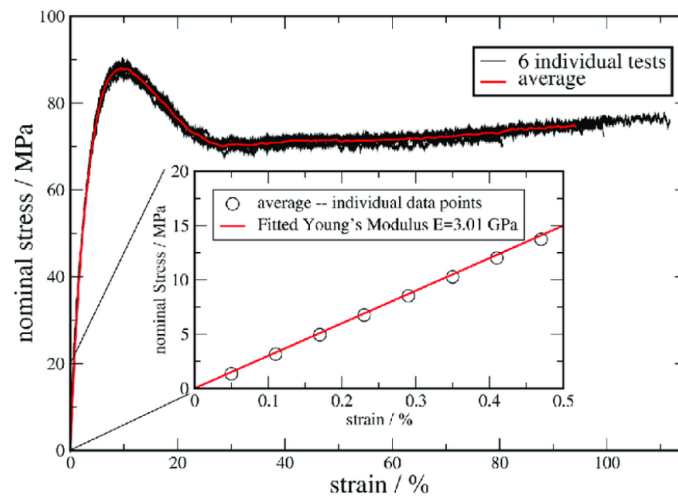


Figura 18. Curva tensión-deformación ingenieril del policarbonato (Ganzenmüller et al., 2016).

El primer paso para alcanzar los objetivos del presente trabajo es analizar el comportamiento del policarbonato, material que da forma a la lámina sobre la que se aplica el conformado incremental. Para ello, se han aplicado las propiedades generales que se muestran en la Tabla 2 (MatWeb). Como se comentó en el Capítulo I (Introducción) apenas existen trabajos que modelen el conformado de este material usando elementos finitos, siendo este trabajo una primera aproximación al estudio del proceso usando un enfoque numérico. Por ello, en el presente trabajo no se ha realizado una caracterización experimental del policarbonato, sino que se ha usado como propiedad del material una curva de tracción para una velocidad de deformación (*strain rate*) igual a  $0.001 \text{ s}^{-1}$  obtenida por Xu y Gao et al. (2016) para el mismo (Figura 19.a).

Tabla 2. Propiedades del policarbonato.

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad	$\rho$	1200	kg m <sup>-3</sup>
Módulo de Young	$E$	2300	MPa
Módulo de Poisson	$\nu$	0.37	
Límite elástico	$\sigma_Y$	65	MPa

El siguiente paso en la caracterización del material es introducir estos valores en el módulo *Engineering Data* de ANSYS Workbench. En la Tabla 3 se recogen los valores de la tensión real y la deformación real utilizados para la construcción de la curva de tracción que se ilustra en la Figura 19.b, la cual se aproxima con tramos lineales entre los puntos introducidos. Nótese que, para una mayor claridad en la representación de la curva de tracción extraída, no se han añadido los dos puntos finales que implican que para el modelo no se ha implementado un criterio de daño o rotura.

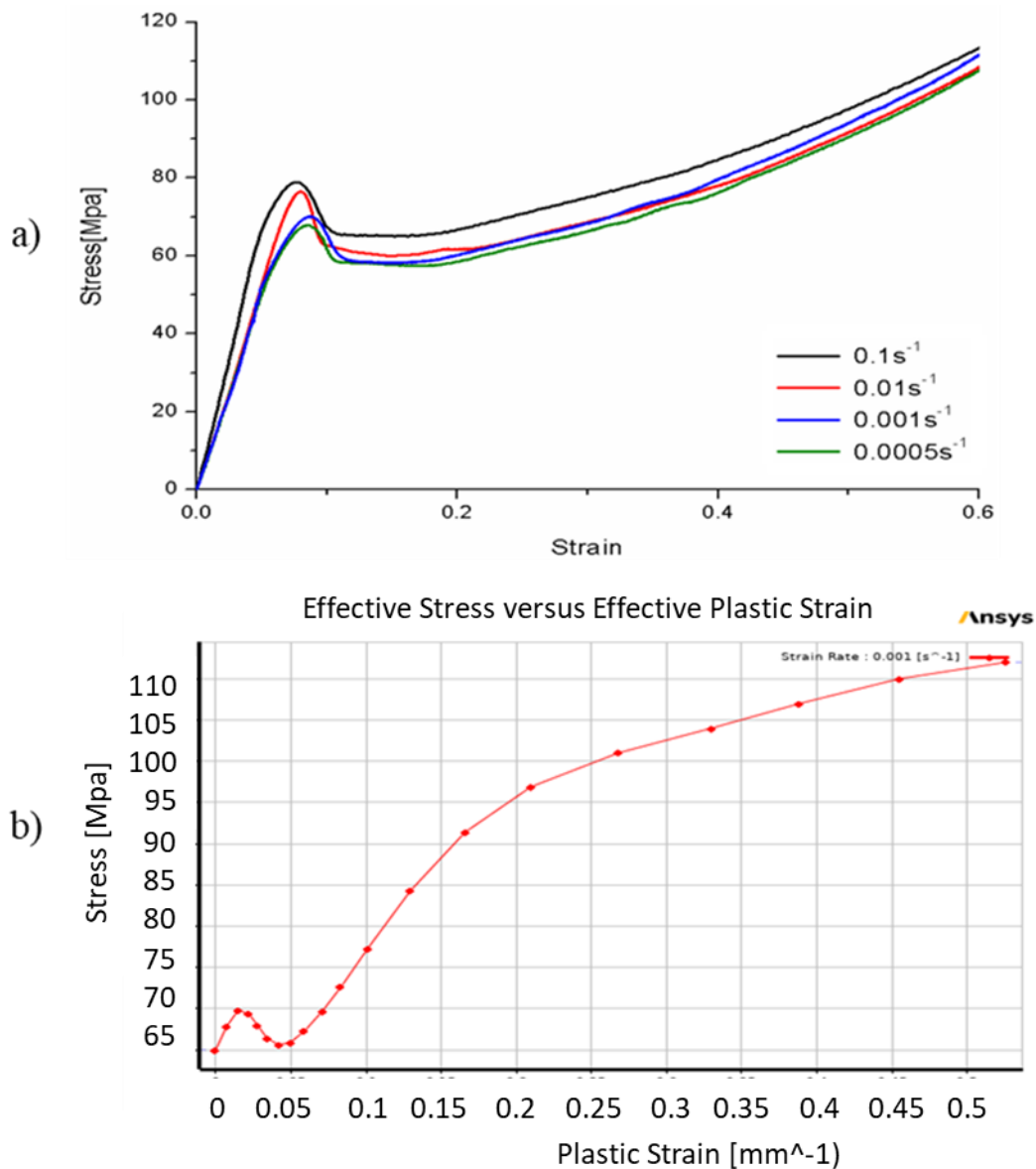


Figura 19. a) Curva tensión-deformación real para distintas velocidades de deformación (Xu y Gao et al., 2016), b) Curva tensión-deformación introducida para el modelo MAT\_024 en Engineering Data.

Tabla 3. Valores de los puntos introducidos para el modelo MAT\_024 en Engineering Data.

<b>Plastic Strain (mm/mm)</b>	<b>Stress (MPa)</b>
0	65
0.0072	67.8
0.0149	69.8
0.0219	69.4
0.0281	67.9
0.0342	66.4
0.042	65.6
0.0497	65.9
0.0592	67.3
0.071	69.7
0.0833	72.6
0.1012	77.3
0.1296	84.3
0.166	91.4
0.2098	96.9
0.2679	101
0.3298	104
0.3886	107
0.4549	110
0.5256	112
1	220
2	526

El módulo *Engineering Data* permite elegir entre varios materiales predefinidos como el policarbonato. Sin embargo, dadas las particularidades del proceso de conformado al que se va a someter a la lámina se ha optado por definir un material con un comportamiento que incluye las siguientes propiedades:

- *Isotropic Elasticity* (elasticidad isotrópica): implica que el modelo requiere introducir el Módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).
- Modelo \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY o MAT\_024: se trata de un modelo externo de LS-DYNA que permite introducir directamente las curvas reales del material y considerar el efecto de la velocidad de deformación, lo cual es perfecto para procesos como el conformado incremental. Sin embargo, no modela viscoelasticidad ni daño, así que su aplicación es adecuada para predecir esfuerzos y deformaciones plásticas, pero no la rotura final del material. Además, el modelo requiere introducir el límite elástico (*Yield Stress*) y los puntos de la curva tensión-deformación real (Tabla 3).

### 3.1.1. Modelado del ensayo de tracción

El ensayo de tracción es una de las pruebas mecánicas más utilizadas para la caracterización de materiales, ya que permite determinar sus propiedades fundamentales bajo sollicitaciones uniaxiales. Consiste en someter una probeta a una carga creciente de tracción hasta su rotura, registrando la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante. A partir de este ensayo se obtienen parámetros clave como el módulo de elasticidad, el límite elástico, la resistencia máxima a la tracción, el alargamiento a la rotura, etc., así como la curva tensión-deformación. De esta manera, el ensayo de tracción proporciona información esencial para la selección de materiales, el diseño estructural y la calibración de modelos constitutivos empleados en simulaciones numéricas.

Aunque parezca algo trivial, dada la complejidad del comportamiento del modelo de elementos finitos para un polímero, modelar un ensayo de tracción resulta una herramienta fundamental para la validación del material objeto de estudio. El objetivo de esta fase es comprobar que las curvas de tracción obtenidas del modelo de EF coinciden con los datos experimentales de partida introducidos en el módulo *Engineering Data* de Workbench, en magnitud y forma. A continuación, se describen los pasos seguidos en la obtención del modelado del ensayo de tracción; no obstante, en el apartado donde se desarrolla el modelado del SPIF se llevará una explicación en detalle de la estrategia tomada en cuanto al diseño de la geometría, proceso de mallado, condiciones de contacto, condiciones de contorno, etc.

En la Figura 20 se muestra las dimensiones de la probeta de policarbonato objeto de ensayo. Su modelado se ha llevado a cabo a través de elementos tipo *solid-shell* con un espesor de 2 milímetros. Este tipo de elemento combina las ventajas de los elementos *shell* clásicos, comúnmente utilizados en la simulación de chapas delgadas, con la robustez de los elementos sólidos tridimensionales. La principal diferencia radica en que, mientras un *shell* se define únicamente por su superficie media y un espesor asociado, el *solid-shell* discretiza el espesor con una sola capa de elementos sólidos hexaédricos o cuadriláteros degenerados, manteniendo un coste computacional reducido. Esto permite capturar fenómenos que en un *shell* tradicional resultan más difíciles de predecir, como la aparición de esfuerzos fuera del plano, efectos de *bending* o pandeo local, así como capturar deformaciones locales a través del espesor sin necesidad de recurrir a mallas multicapa (Betsch & Stein, 1995).

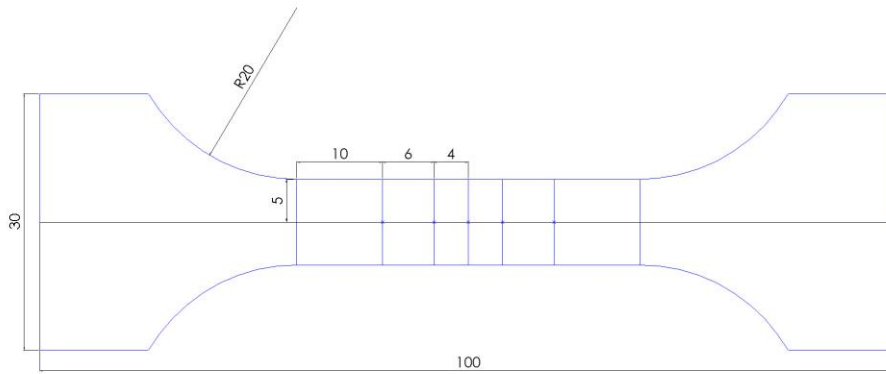


Figura 20. Dimensiones de la probeta de policarbonato.

En este trabajo se ha empleado un mallado regular con elementos cuadriláteros, lo que proporciona una distribución uniforme y reduce posibles concentraciones de rigidez numérica. Cada elemento *solid-shell* cuenta con 8 nodos y 24 grados de libertad en total (tres desplazamientos por nodo), lo que garantiza una representación adecuada de la cinemática de deformación. Por defecto, el modelo se ha configurado con 5 puntos de integración a través del espesor, lo que permite obtener no solo tensiones y deformaciones medias, sino también distribuciones a lo largo de la dirección Z, accediendo a las capas UPPER y LOWER, así como al resto de puntos de integración intermedios. En la Figura 21 se muestra un esquema con la distribución de las capas para el elemento comentado.

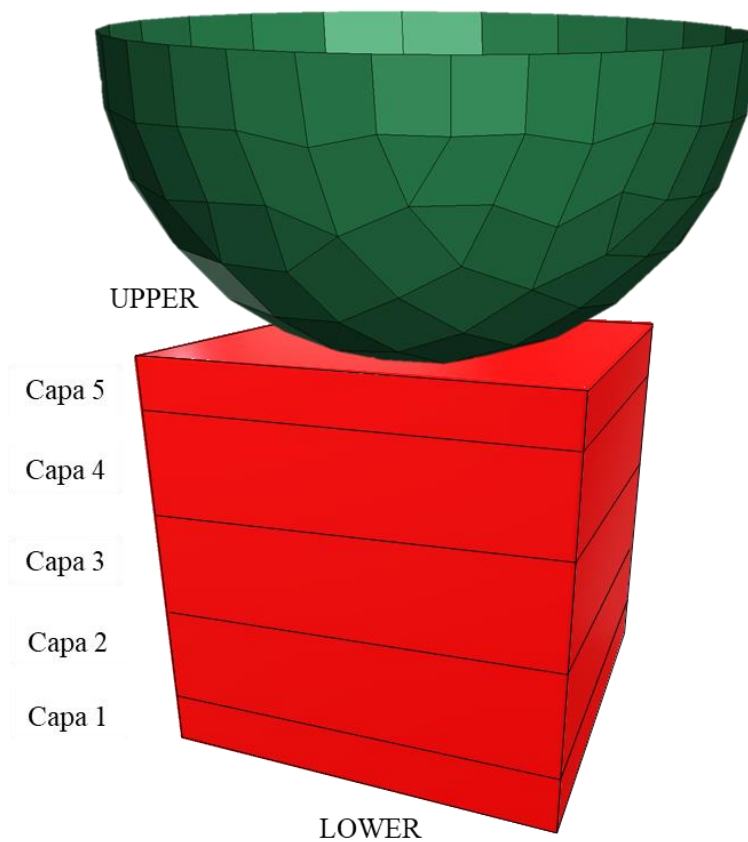


Figura 21. Discretización del espesor en un elemento *solid-shell*.

Además, para facilitar las operaciones de mallado, reducir el gasto computacional y obtener un resultado más preciso, dicha probeta se ha dividido en 16 superficies. De esta forma, como la zona de interés para el análisis de los resultados es el interior de la probeta, los elementos de la malla en la superficie interna cuentan con un tamaño igual a 0.5 milímetros, mientras que en el exterior es de 2 milímetros. Las condiciones de contorno aplicadas en los extremos de la probeta para un *End Time* igual a 0.01 segundos son:

- Empotramiento (*Fixed Support*, A) en el lado izquierdo.
- Desplazamiento (*Displacement*, B) constante a lo largo del eje X igual a 5000 milímetros en el lado derecho.

En el siguiente apartado se llevará a cabo una descripción más detallada de la aplicación de las condiciones para la obtención del modelo numérico SPIF.

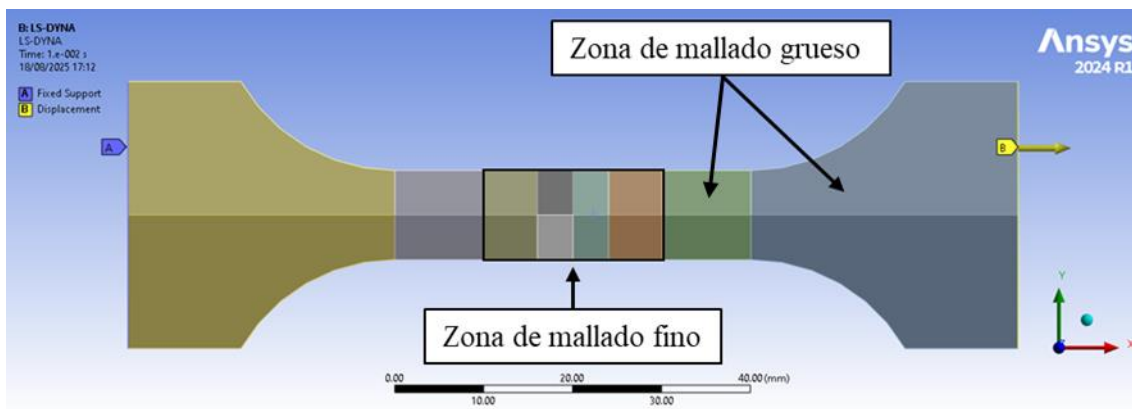


Figura 22. Condiciones de contorno aplicadas en la probeta de policarbonato dentro del entorno ANSYS Workbench.

### 3.1.2. Obtención de la curva esfuerzo-deformación

Como ya se ha comentado anteriormente, para validar el material que se va a utilizar en el conformado incremental, ha de existir coherencia entre los resultados obtenidos en el ensayo de tracción y los introducidos para la caracterización del material. De esta forma, para la obtención de la curva de tensión se ha hecho uso de la herramienta LS-PrePost de LS-DYNA, la cual permite realizar un análisis de los resultados y visualizar las curvas *stress-strain* a lo largo de todo el tiempo de simulación. En la Figura 23 se observa el campo de tensiones de la probeta para tres estados distintos: probeta indeformada en el instante inicial ( $t=0$  segundos), estado de deformación elástica ( $t=0.0016$  segundos) e instante final ( $t=0.01$  segundos). Estos valores de tiempo no son representativos del tiempo de un experimento real, sino que están modificados como consecuencia de la aplicación de *Time Scaling*. Dichos instantes corresponden a un alargamiento de la probeta en el eje longitudinal de  $X=0$ ,  $X=12$  y  $X=50$  mm.

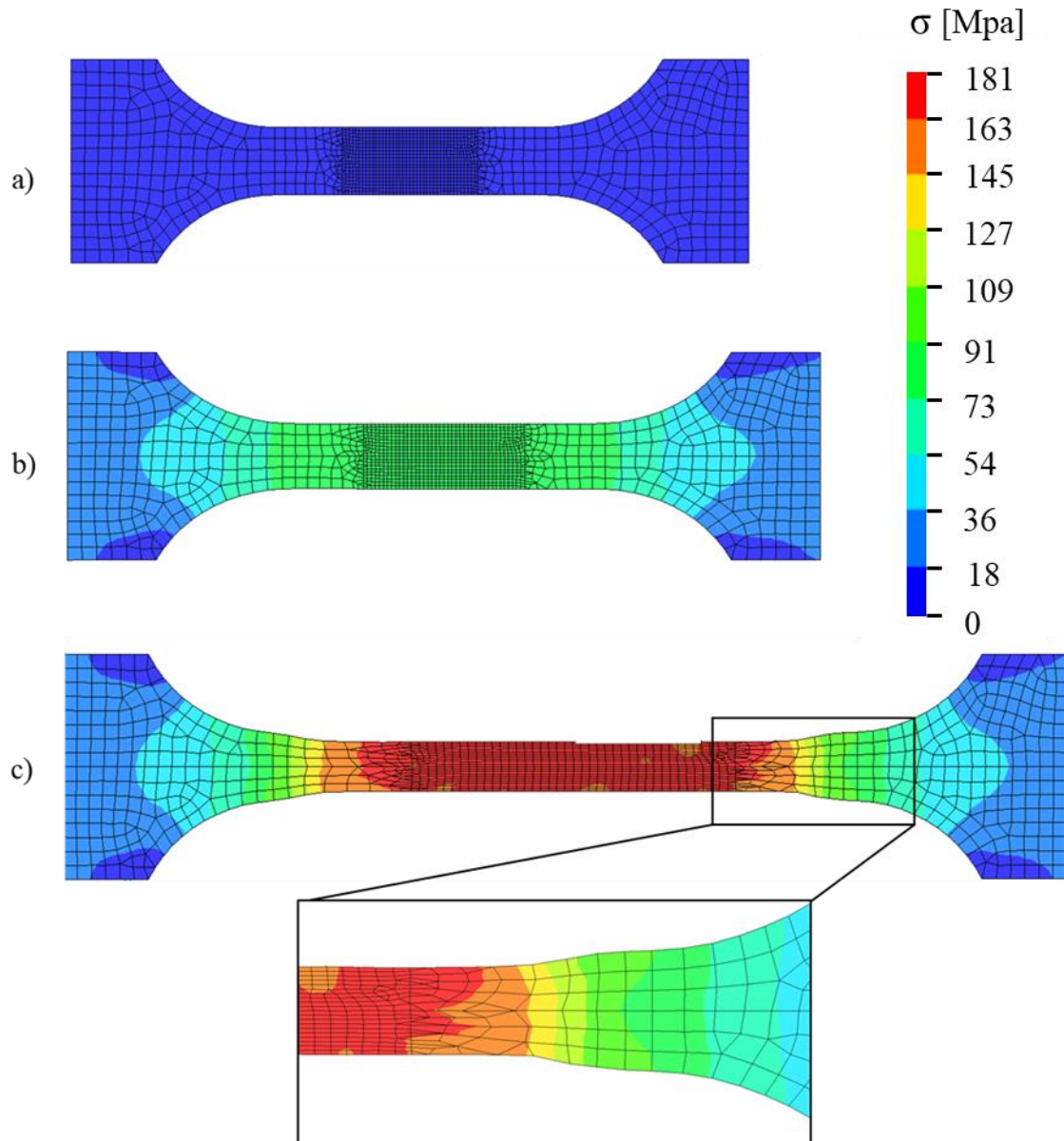


Figura 23. Estados del ensayo de tracción: a) Instante inicial ( $t=0$  s), b) Instante intermedio (anterior a la estricción  $t=0.0016$  s), c) Instante final (posterior a la estricción,  $t=0.001$  s).

Nótese que gracias al uso de la herramienta LS-DYNA, la cual permite resolver problemas altamente no lineales mediante el método explícito, se ha conseguido reproducir con precisión fenómenos localizados como la estricción (*necking*), cuya aparición está directamente vinculada con la evolución del endurecimiento por deformación y la sensibilidad a la velocidad de deformación. De este modo, la combinación de LS-DYNA y el modelo MAT\_024 no solo ha facilitado la predicción de la respuesta global del material, sino que también ha proporcionado una aproximación numérica robusta para analizar la formación y propagación del cuello, fenómeno crítico en la caracterización mecánica del policarbonato y en la validación de modelos constitutivos avanzados.

En el Capítulo 4 (Discusión de Resultados) se expondrán los resultados obtenidos de la simulación del ensayo de tracción y se comentará la validez del modelo de cara a la caracterización del policarbonato.

### **3.2. Modelado numérico**

En este apartado se van a describir los pasos que se han dado de cara a la obtención del modelo numérico para el conformado incremental monopunto utilizando la herramienta LS-DYNA dentro del software ANSYS Workbench. A lo largo de los siguientes puntos se va a comentar la metodología que se ha llevado a cabo y las configuraciones elegidas para la obtención de los resultados.

#### **3.2.1. Geometría y mallado**

En la Figura 24 se muestra el modelo de elementos finitos utilizado para la caracterización del proceso de SPIF, formado por tres partes o cuerpos diferentes: herramienta, matriz y lámina de policarbonato.

- Herramienta: es el elemento encargado de conformar la lámina, caracterizándose por una geometría de semiesfera hueca. Tal y como se detallará en el apartado siguiente, sobre ella se definen las condiciones de contacto con el material y se le aplica un desplazamiento específico.
- Matriz: se trata de un anillo de 5 milímetros de grosor y sirve como soporte del sistema.
- Lámina: es el elemento principal, cuenta con unas dimensiones de 150x150 milímetros. Se trata del cuerpo objetivo y será deformado por la herramienta adquiriendo una forma troncocónica.

Por un lado, la herramienta y la matriz se definen como cuerpos rígidos con distintas restricciones de desplazamiento, el material elegido para estos dos cuerpos ha sido un acero estructural básico (*Structural Steel*). Por otro lado, a la lámina de policarbonato se le ha restringido el movimiento en sus cuatro lados para garantizar su conformado y ahorrar el modelado de un cuarto cuerpo que sirva como sujeción de la lámina, además ha quedado definida con los datos introducidos en *Engineering Data*, comentados en el apartado anterior.

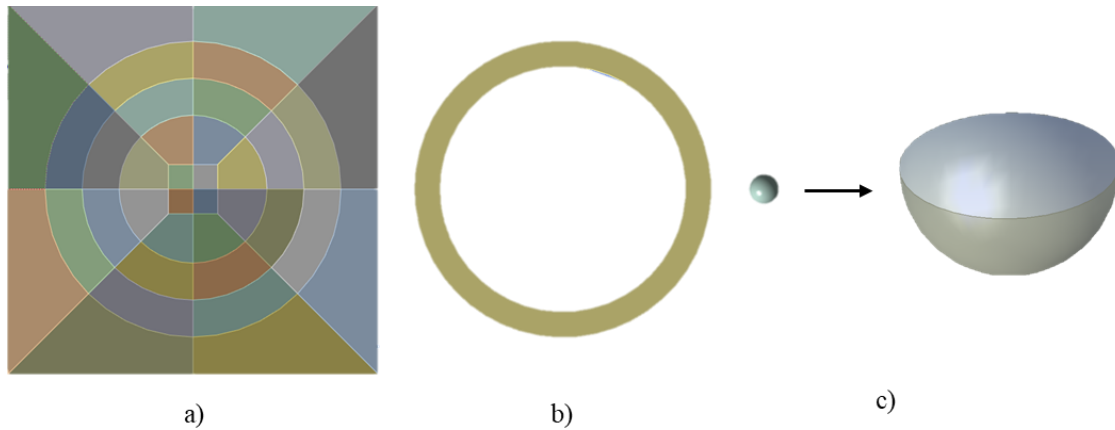


Figura 24. Elementos utilizados para el proceso de conformado incremental monopunto en elementos finitos: a) Lámina de policarbonato, b) Matriz de apoyo, c) Herramienta.

La geometría de la chapa y la herramienta se ha modelado utilizando elementos tipos *solid-shell* con un espesor de 2 milímetros de la misma forma que en el modelo de tracción descrito en el apartado 3.1. El contacto entre la herramienta y la lámina de policarbonato se da entre dos superficies, como se desarrollará en el siguiente apartado. Sin embargo, con el objetivo de simplificar la operación de diseño, la matriz se ha generado como un cuerpo 3D. A continuación, se muestran las dimensiones que se le ha dado a cada uno de los elementos que forman el sistema.

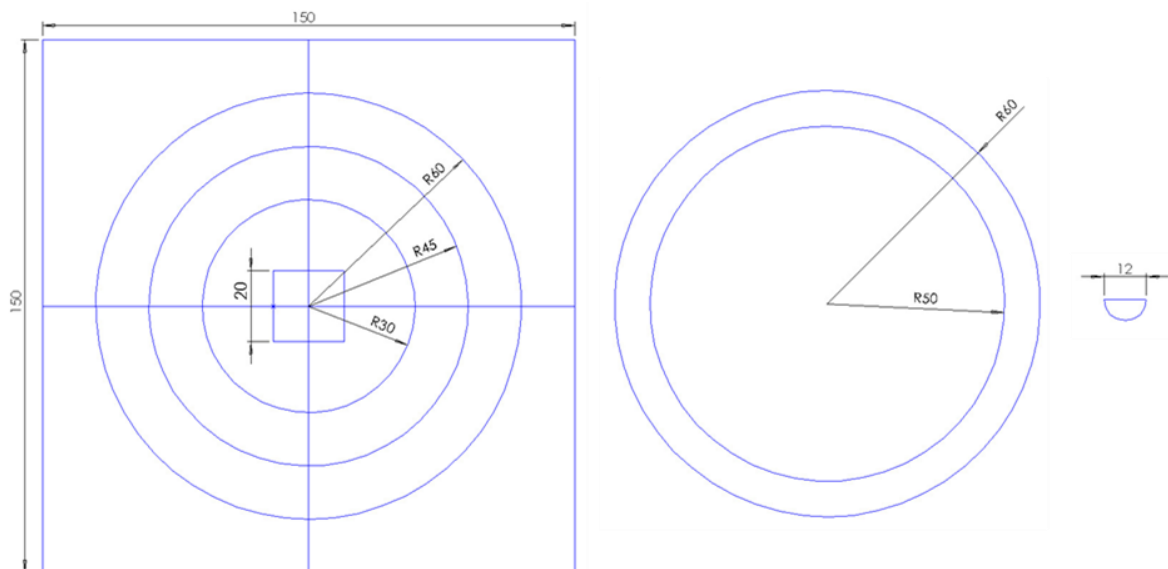


Figura 25. Dimensiones de los elementos del SPIF.

Como se puede observar en la Figura 26, se ha seguido un patrón específico para el diseño de la lámina de policarbonato generando un total de 36 superficies. Al igual que la probeta en el ensayo de tracción, el motivo de este patrón específico se basa en la estrategia de aplicar una malla más fina en aquellas zonas de mayor interés. De esta forma, tal y como se muestra en la imagen a continuación, el mallado se divide en dos partes bien diferenciadas: la zona interior, donde tendrá lugar el conformado de la lámina, y la zona

exterior. Además, para facilitar la obtención de resultados se ha definido la forma de los elementos de la malla en cuadriláteros.

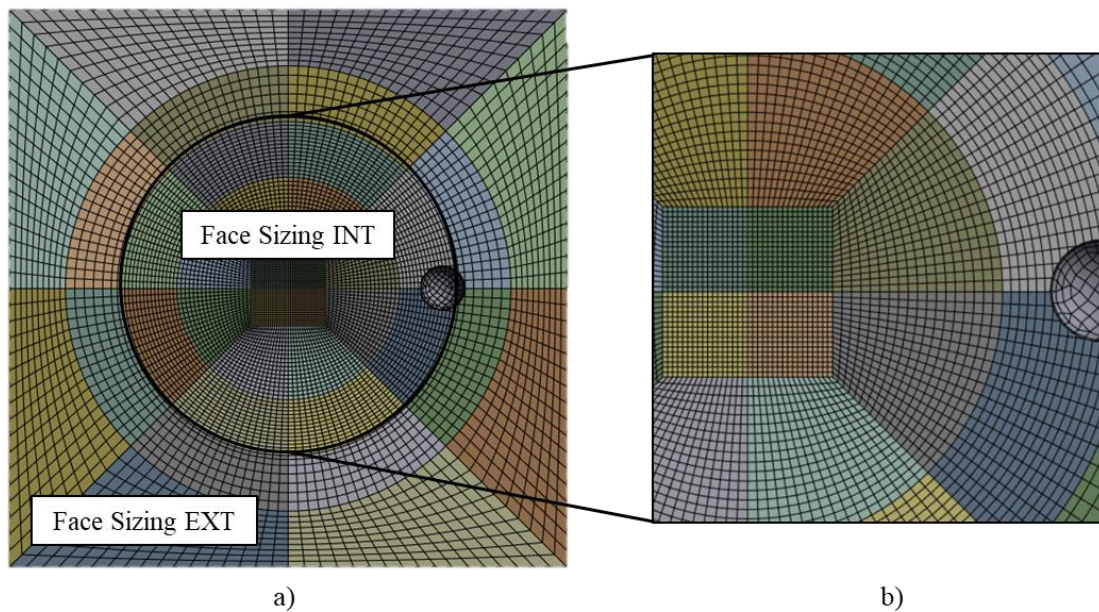


Figura 26. a) Mallado de la lámina de policarbonato b) Detalle del mallado con un tamaño más fino en la zona central de la lámina.

En la Figura 26.a, se muestra la estrategia seguida para el mallado del modelo. Para favorecer el cálculo y que el tiempo computacional de la resolución del problema no sea excesivo, se ha aplicado un mallado igual a 1 milímetro en la zona interior (*Face Sizing INT*) y 2.5 milímetros en la zona exterior (*Face Sizing EXT*). Por otro lado, el tamaño de los elementos de la malla de la matriz es de 3 milímetros y la herramienta cuenta con un mallado igual a 1.5 milímetros, lo cual ha permitido obtener resultados precisos en las zonas de contacto.

### 3.2.2. Contacto

Un parámetro fundamental a controlar en el modelado del proceso de conformado incremental es el contacto entre la herramienta y la lámina de policarbonato. Para ello, la herramienta (cuerpo rojo en la Figura 27) se ha definido como cuerpo de contacto o *Contact Body* mientras que el objetivo o *Target Bodies* son las 36 superficies (cuerpo azul en la Figura 27) en las que se ha dividido la chapa. Además, para dicho contacto se ha considerado un coeficiente de fricción igual a 0.001, debido a que experimentalmente se prevé utilizar una solución de agua y jabón como lubricante.

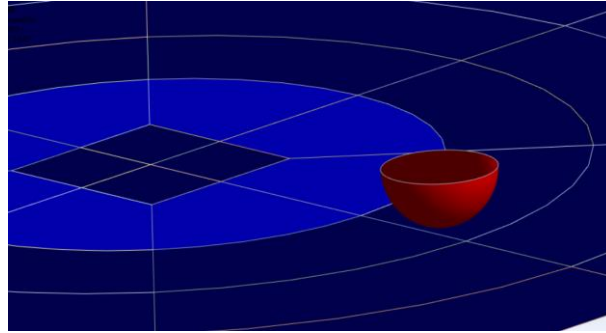


Figura 27. Vista en perspectiva del contacto entre *Contact Body* (rojo) y *Target Bodies* (azul).

La formulación de las condiciones de contacto en el módulo LS-DYNA, se ha realizado a través del modo `FORMING_SURFACE_TO_SURFACE`, el cual está diseñado específicamente para problemas de conformado de chapas, considerando de manera explícita la interacción entre una herramienta rígida y una lámina deformable, como es el caso objeto de estudio. La formulación permite el control de la penetración mediante algoritmos de penalización o multiplicadores de Lagrange, garantizando que el contacto se mantenga dentro de los límites físicos.

Además, el contacto `FORMING_SURFACE_TO_SURFACE` permite definir parámetros adicionales como la fricción de Coulomb. Otro aspecto importante es la posibilidad de especificar opciones avanzadas como la suavización de nodos (*segment-based*), que reduce problemas numéricos derivados de altas concentraciones de tensiones en zonas de contacto. Gracias a estas capacidades, este algoritmo es especialmente adecuado para modelar procesos SPIF, donde el contacto cambia de forma continua a lo largo de trayectorias programadas.

### 3.2.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno aplicadas en el modelo han consistido en apoyos fijos y desplazamientos. Para garantizar una correcta simulación del proceso, se fijaron tanto la matriz como los bordes de la lámina mediante la condición *Fixed Support*, lo que permitió reproducir el efecto de sujeción sin necesidad de diseñar piezas adicionales de apoyo. De este modo, se simplificó el modelo geométrico y se aseguraron unas condiciones de contorno coherentes con la realidad experimental.

Para simular los desplazamientos se ha hecho necesario definirlos como una condición de frontera de tipo *Displacement*. En el campo correspondiente al componente de desplazamiento (ejes X, Y, Z) el software ofrece la opción de importar valores desde un archivo externo. Sin embargo, el programa no admite directamente formatos simples como `.csv` o `.txt`, sino que requiere que los datos de tiempo y desplazamiento se estructuren en un archivo con extensión `.xml`, siguiendo una jerarquía específica de etiquetas `<Time>` y `<Value>` agrupadas en pares `<TimeValuePair>`. De esta forma, los desplazamientos experimentales pueden introducirse en el modelo numérico, permitiendo reproducir trayectorias reales de carga y garantizar que la simulación siga con precisión las condiciones experimentales. En la Figura 28 se muestra la trayectoria seguida por la

herramienta, adquiriendo una forma de tronco de cono tras el proceso de conformado. A lo largo del plano XY, el útil realiza una trayectoria en espiral bajando.

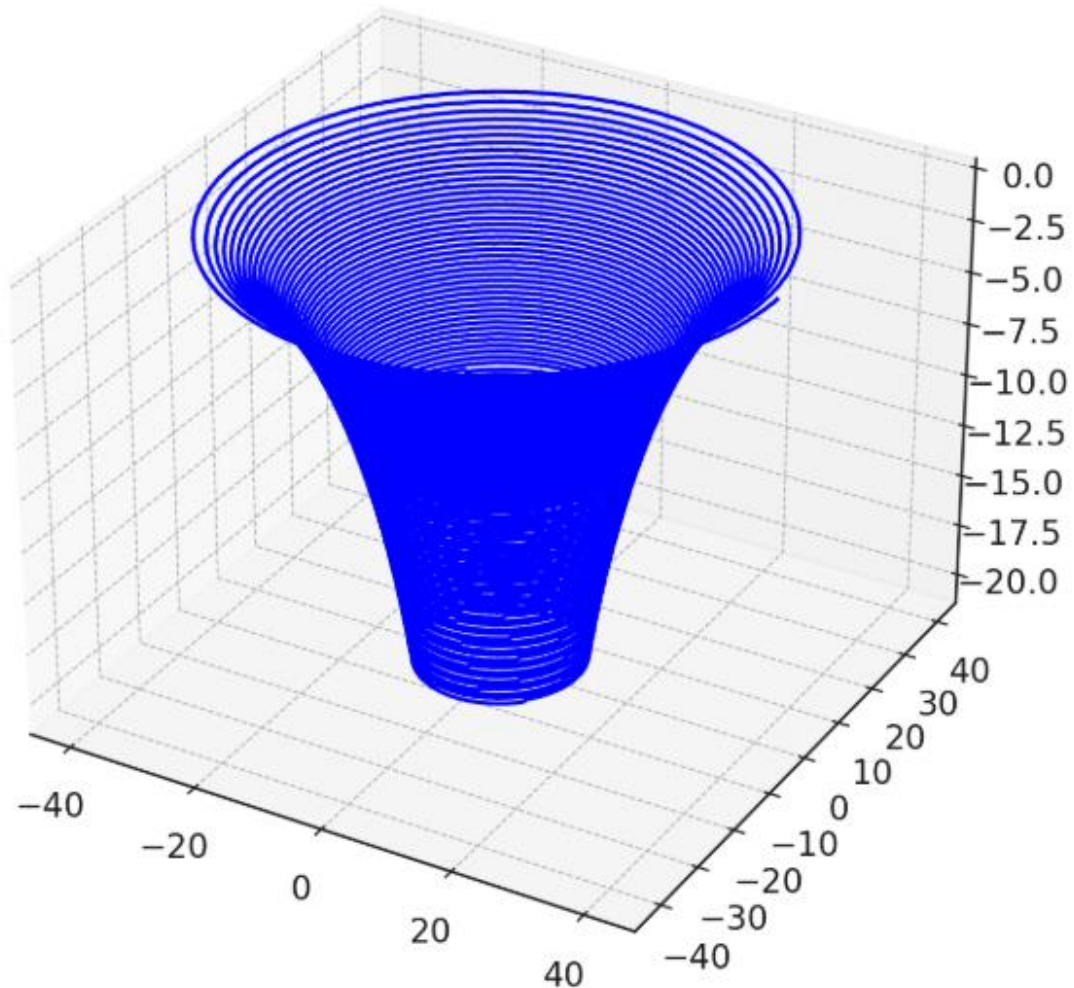


Figura 28. Trayectoria de la herramienta.

#### 3.2.4. Parámetros de simulación (*Analysis Settings*)

En la configuración de *Analysis Settings* se han definido los parámetros necesarios para garantizar tanto la estabilidad del cálculo como la correcta obtención de resultados. El tiempo total de simulación (*End Time*) se fijó en 0.35013 segundos, valor que no corresponde al tiempo real del ensayo, sino que se obtuvo tras aplicar un *time scaling* igual a 1000. Esta estrategia es habitual en simulaciones con el método explícito, ya que permite reducir de manera significativa el coste computacional sin que se vean alterados de forma sustancial los resultados de interés. Para reforzar la estabilidad numérica, el factor de seguridad del paso de tiempo (*Time Step Safety Factor*) se estableció en 0.9, lo que asegura que el tamaño de paso calculado por el programa se reduzca de manera conservadora, evitando así posibles divergencias. Además, se permitió un máximo de 10 millones de ciclos para impedir que el análisis se interrumpiese de forma prematura, y se descartó el uso del *mass scaling* automático para no modificar artificialmente las propiedades inerciales del sistema.

En lo referente a la asignación de recursos de cálculo, la gestión de memoria se dejó en manos del programa y se habilitaron 16 procesadores, de modo que el modelo pudiera beneficiarse de la simulación en paralelo y disminuir el tiempo de ejecución. Otro aspecto esencial de la configuración fue el control del fenómeno de *hourglassing*, asociado a los elementos de integración reducida. Para este caso, se aplicó el modelo de Flanagan-Belytschko en su formulación de rigidez (*stiffness form*) lo cual garantiza un comportamiento más estable y físico de los elementos durante la simulación.

El fenómeno de *hourglassing* aparece en elementos de integración cuando estos desarrollan modos de deformación sin apenas rigidez asociada, de manera que se distorsionan adoptando formas onduladas sin que realmente se genere energía interna en el material. Esto conduce a resultados numéricamente inestables y físicamente irreales, como deformaciones localizadas que no corresponden al comportamiento real de la pieza. Para controlar este efecto, además de la formulación de rigidez utilizada, LS-DYNA también incorpora la formulación *viscous form*, que introduce fuerzas disipativas proporcionales a la velocidad para amortiguarlo. Mientras que el método viscoso puede inducir pérdidas artificiales de energía, el método de rigidez suele proporcionar un comportamiento más estable, preservando mejor la respuesta física del modelo.

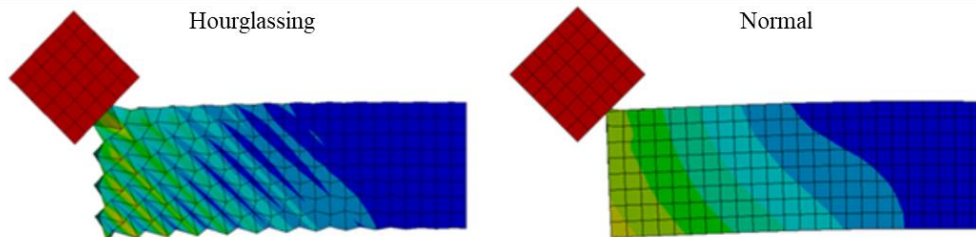


Figura 29. Efecto del *hourglass* en la resolución por elementos finitos (Hale, 2017).

En cuanto a la salida de resultados, se activó el registro de las variables fundamentales: tensiones, deformaciones totales y especialmente las deformaciones plásticas (*Plastic Strain*), imprescindibles para caracterizar el comportamiento del policarbonato en el proceso de conformado incremental haciendo uso de la herramienta LS-Prepost. Estos resultados se calcularon en intervalos igualmente espaciados, concretamente cada 500 pasos, lo que proporcionó un buen equilibrio entre resolución temporal y tamaño de los archivos generados.

De este modo, la configuración de los parámetros de análisis combinó criterios de estabilidad, eficiencia y relevancia física, permitiendo reproducir de forma precisa las condiciones del proceso y registrar las variables más significativas para el estudio, con especial énfasis en la obtención de la deformación plástica como indicador principal del comportamiento del material. En la Figura 30 se ilustra el estado de la lámina de policarbonato una vez finalizado el proceso de conformado y en la Tabla 4 quedan recogidos los parámetros más relevantes del modelo.

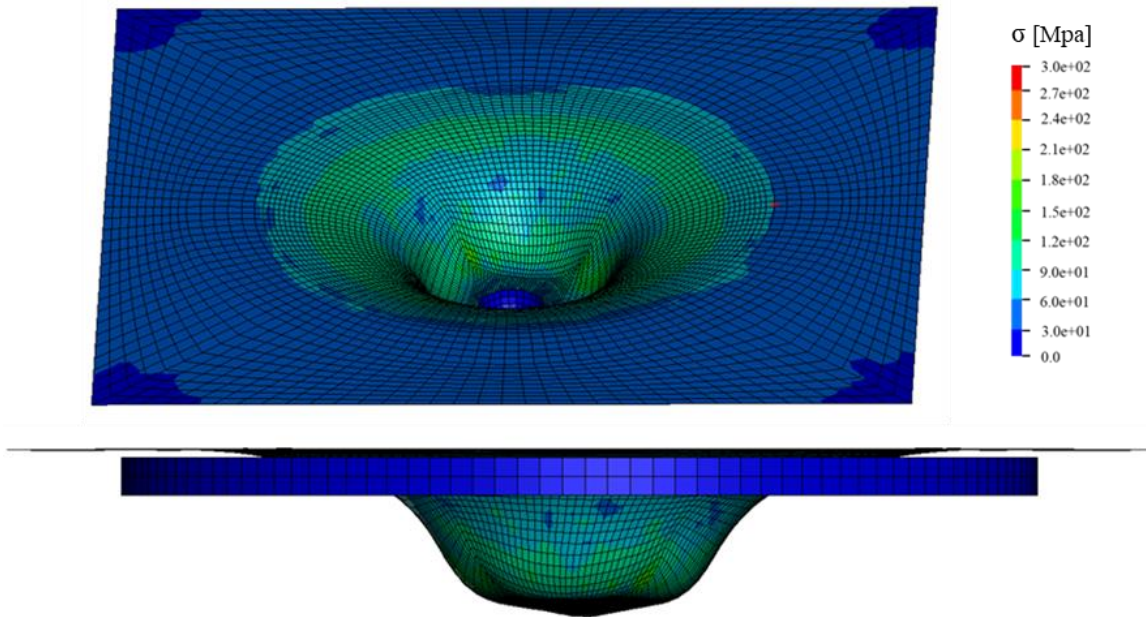


Figura 30. Estado final del proceso de conformado incremental.

Tabla 4. Parámetros introducidos para el modelado en LS-DYNA.

CATEGORÍA	PARÁMETRO	VALOR / CONFIGURACIÓN
<b>Elementos y discretización</b>	Tipo de elemento	Solid-shell (LS-DYNA)
	Nodos por elemento	4
	Grados de libertad	24 (6 gdl por nodo)
	Puntos de integración	5 a través del espesor
	Mallado lámina interior	1 mm
	Mallado lámina exterior	2.5 mm
	Mallado herramienta	1.5 mm
<b>Geometría</b>	Mallado matriz	3 mm
	Dimensiones lámina PC	150 × 150 mm
	Espesor lámina PC	2 mm
	Herramienta	Semiesfera hueca de 1mm
<b>Contacto</b>	Matriz	Anillo de 5 mm
	Algoritmo	FORMING_SURFACE_TO_SURFACE
<b>Condiciones de contorno</b>	Coeficiente de fricción	0.001 (agua + jabón)
	Restricciones ( <i>Fixed Support</i> )	Bordes de chapa y matriz
<b>Parámetros de simulación</b>	Desplazamiento herramienta	Trayectoria helicoidal descendente, importada en <i>.xml</i>
	Solver	LS-DYNA explícito
	End Time	0.36 s (time scaling 1000)
	Time Step Safety Factor	0.9
	Mass scaling	Desactivado
<b>Postprocesado</b>	Control de hourglass	Flanagan-Belytschko, stiffness form
	Frecuencia de guardado	500 steps

### 3.3. Postprocesado de datos

El análisis y postprocesado de los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas se ha llevado a cabo empleando el software LS-PrePost, herramienta oficial de LS-DYNA orientada al tratamiento y visualización de resultados. La elección de este programa frente al entorno de postprocesado de ANSYS Workbench fue necesaria porque este último no permite representar ni extraer de manera directa el campo de deformaciones (*strain*), lo cual resultaba fundamental para el objetivo de este trabajo.

El flujo de trabajo en LS-PrePost comenzó con la definición de un *path* geométrico a lo largo de la zona de interés del modelo, lo cual permitió realizar un seguimiento de diferentes magnitudes en elementos concretos del mallado. Las magnitudes objeto de estudio han sido: la tensión de von Mises, las deformaciones principales (*Lower Ipt Max Prin Strain* y *Lower Ipt 2nd Prin Strain*), así como las coordenadas nodales y desplazamientos en los ejes X, Y, Z. Además, se exportaron también las coordenadas Z de la herramienta para establecer la relación entre el avance del punzón y la evolución de las variables internas en la chapa. El conjunto de estos resultados se volcó en archivos .csv, que constituyen la base para la elaboración de gráficas comparativas.

Cabe destacar la importancia de emplear el *lower integration point (lower ipt)* en el caso de los elementos tipo *solid-shell*. Como ya se ha comentado anteriormente, en este tipo de elementos el espesor se divide en varias capas de integración, lo que permite analizar con detalle las diferencias entre la superficie superior e inferior de la chapa. Este aspecto es de gran relevancia para fenómenos como la predicción de tensiones y deformaciones a través del espesor, así como para el estudio de la recuperación elástica y el *twisting*, que en materiales poliméricos como el policarbonato es particularmente significativa. De esta forma, el análisis centrado en la capa inferior ofrece una visión más realista del comportamiento del material durante el conformado, además de ser la capa sometida a condiciones más severas.

En resumen, LS-PrePost no solo sirvió como plataforma de postprocesado, sino que constituyó una herramienta central en la validación de resultados, en la exportación de datos en formato .csv y en la verificación de la calidad y consistencia del modelo. Su empleo fue clave para establecer una correlación entre las simulaciones y los resultados experimentales, permitiendo profundizar en la comprensión del comportamiento del policarbonato en condiciones de conformado incremental.



## Capítulo IV

### Discusión de resultados

Este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas, comparándolos con los datos experimentales para evaluar la precisión del modelo. Se profundiza en la fidelidad de la simulación, la sensibilidad del modelo frente a los parámetros clave del proceso y el impacto de estos en la obtención de resultados.

#### 4.1 Validación del ensayo de tracción

Antes de analizar los resultados obtenidos de la simulación del proceso de conformado incremental, es necesario validarlo. Para ello se ha usado el modelo previo que representa un ensayo de tracción.

La validación del ensayo de tracción constituye un paso fundamental en la comprobación de la fiabilidad del modelo numérico desarrollado. Este proceso consiste en comparar los resultados obtenidos a partir de la simulación por elementos finitos con los datos experimentales obtenidos del estudio de Xu y Gao (2016). De este modo, es posible evaluar el grado de concordancia entre la curva esfuerzo-deformación experimental introducida y la curva obtenida del modelo, asegurando que las propiedades mecánicas del material se encuentran correctamente representadas. Aunque pueda parecer trivial, este paso es importante, dada la complejidad de la simulación de materiales poliméricos. En concreto, la reproducción de la estricción en el material, un fenómeno de inestabilidad, no es un proceso sencillo y requiere la selección adecuada de los parámetros y las condiciones de contorno.

A continuación, se recoge la evolución de la probeta durante el ensayo de tracción, mostrando tanto la distribución de tensiones (Figura 28) y deformaciones (Figura 29) en distintos instantes del proceso. Este tipo de representación no solo permite visualizar el alargamiento progresivo del material, sino también identificar cómo se concentran las tensiones en determinadas zonas críticas. A diferencia de lo que ocurre en los metales, que presentan una estricción inestable y rápida, los materiales poliméricos pueden presentar una estricción estable y prolongada en el tiempo. Como se observa en las Figuras 28.b-c y 29.b, el modelo reproduce claramente la aparición de la estricción, además de su evolución a lo largo del tiempo (Figuras 28.d-e y 29.c-d). En los metales, la fractura aparece tras la estricción, que en este caso equivale al estado de las Figuras 28b-c y 29.b.

En primer lugar, la Figura 28.a ilustra el momento inicial con la probeta en régimen elástico, donde la zona de medida se encuentra sometida a valores de tensión en torno a los 65-70 MPa. A continuación, cuando se alcanzan tensiones en torno a los 130 MPa se

observa la aparición y posterior desarrollo del *necking* (Figuras 28.b-c), caracterizado por una localización de la deformación plástica que conduce a una reducción significativa de la sección transversal de la probeta. En lugar de aparecer la fractura, la zona de estricción se propaga reduciendo cada vez más la sección, tal y como se observa en la Figura 28.d, hasta alcanzar el límite de la zona de medida (Figura 28.e).

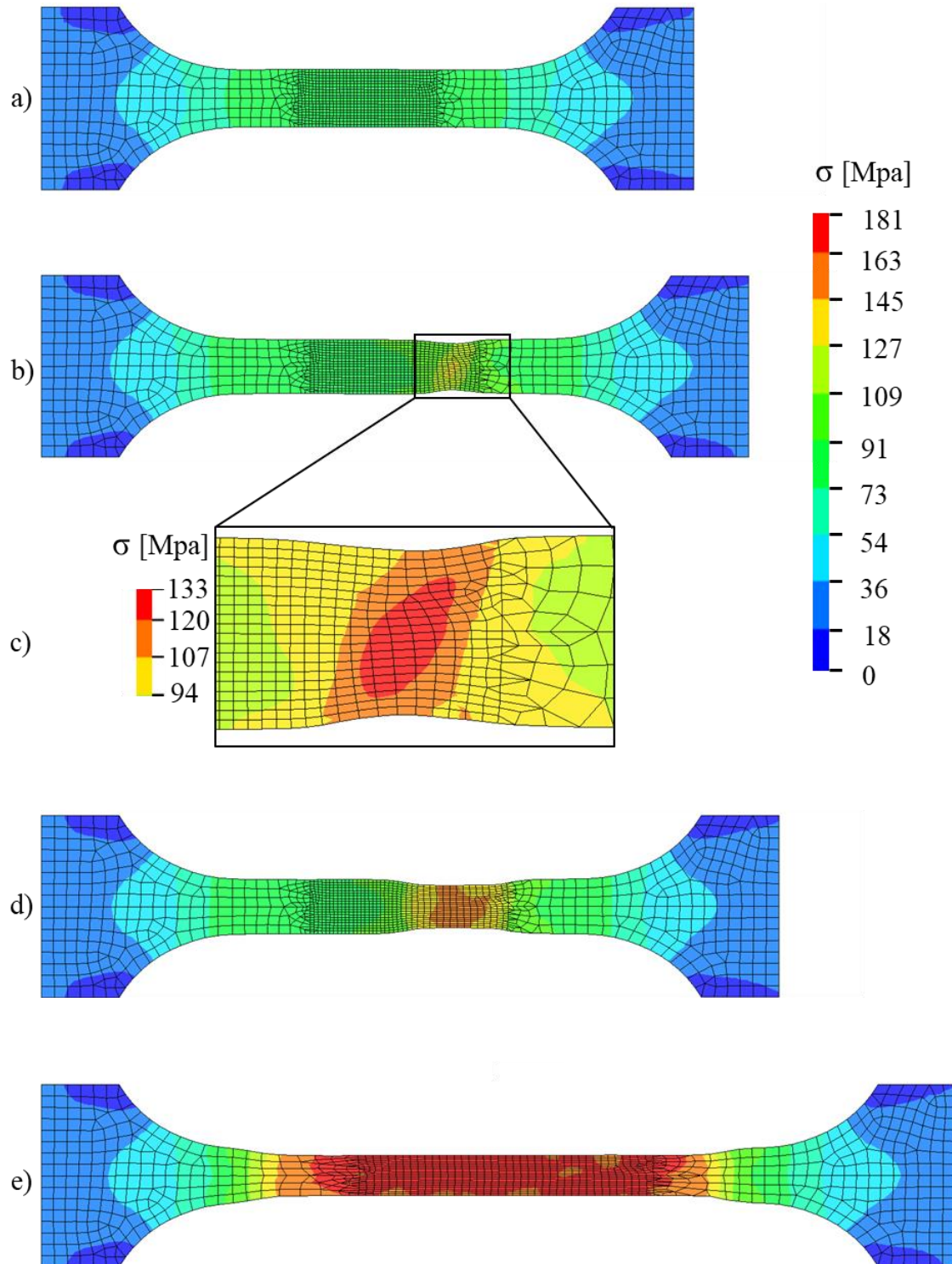


Figura 28. Evolución del campo de tensiones en la probeta para diferentes estados durante el ensayo de tracción: a) Régimen elástico, b) Comienzo de la zona de

estricción, c) Detalle de la formación del cuello, d) Propagación de la zona de estricción, e) Estado final.

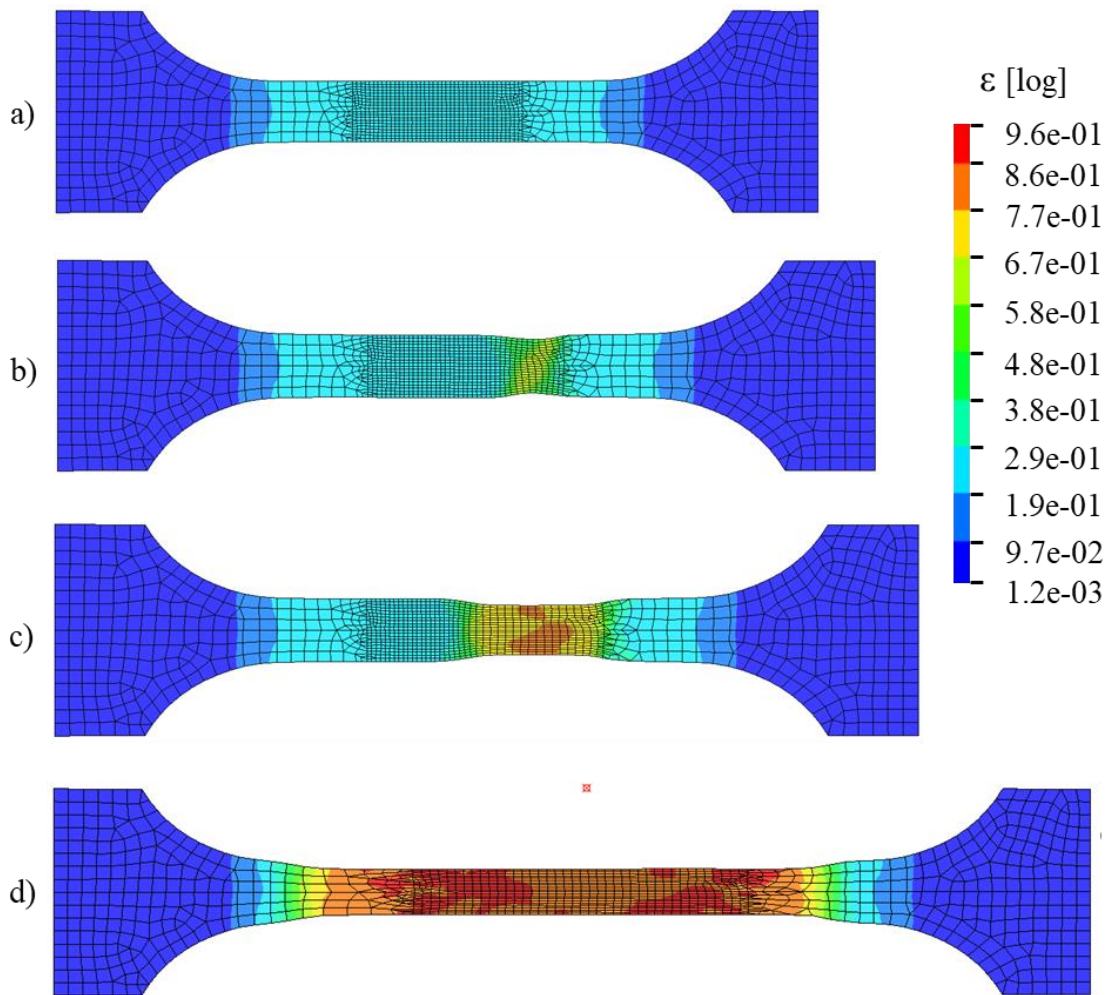


Figura 29. Evolución del campo de deformaciones en la probeta para diferentes estados durante el ensayo de tracción: a) Régimen elástico, b) Comienzo de la zona de estricción, c) Propagación de la zona de estricción, d) Estado final.

Además, el uso de un mallado más refinado en la zona central permite captar con mayor detalle la distribución de tensiones y deformaciones. De este modo, la comparación entre simulación y resultados experimentales en la formación del cuello permite verificar la precisión en la predicción de deformaciones en el material.

En la Figura 30 se comparan la curva tensión-deformación introducida en el módulo *Engineering Data* (Figura 30.a) y la que se obtiene tras el postprocesado de datos a través de LS-Prepost (Figura 30.b). Ambas curvas muestran una tendencia coherente, con una fase inicial de comportamiento elástico, la cual se rige por el módulo elástico ( $E$ ), seguida de una zona de endurecimiento plástico, lo que confirma que el modelo numérico reproduce de manera satisfactoria la respuesta global del material. No obstante, al superponer ambas representaciones en la misma gráfica (Figura 30.c) se aprecian ligeras diferencias en la pendiente de la región elástica, así como en la evolución de la tensión

efectiva en el régimen plástico. Estas discrepancias pueden estar relacionadas con la forma en que el modelo numérico implementa el criterio de Von Mises y las leyes de endurecimiento, así como con el mallado utilizado. Al margen de esa diferencia, puede considerarse que el modelo reproduce de forma satisfactoria la evolución de tensiones y deformaciones.

En la misma representación se han señalado los principales puntos característicos del ensayo: el módulo elástico inicial ( $E$ ) y el límite de fluencia, los cuales se corresponden de manera razonable con la curva experimental introducida en *Engineering Data*. Sin embargo, el modelo no reproduce la etapa final del ensayo, correspondiente a la estricción localizada y la fractura de la probeta. Esto se debe a que en la simulación no se ha implementado un criterio de daño o rotura, de modo que la curva numérica se prolonga en el dominio plástico sin reflejar la caída de tensión propia del fallo real del material.

En conclusión, la validación del ensayo de tracción es esencial para garantizar la robustez del modelo numérico previo a su aplicación en simulaciones más complejas, como es el caso del conformado incremental. Tras esta validación es posible afirmar que el comportamiento mecánico del material ha sido correctamente implementado y que los resultados posteriores tendrán una base sólida y fiable.

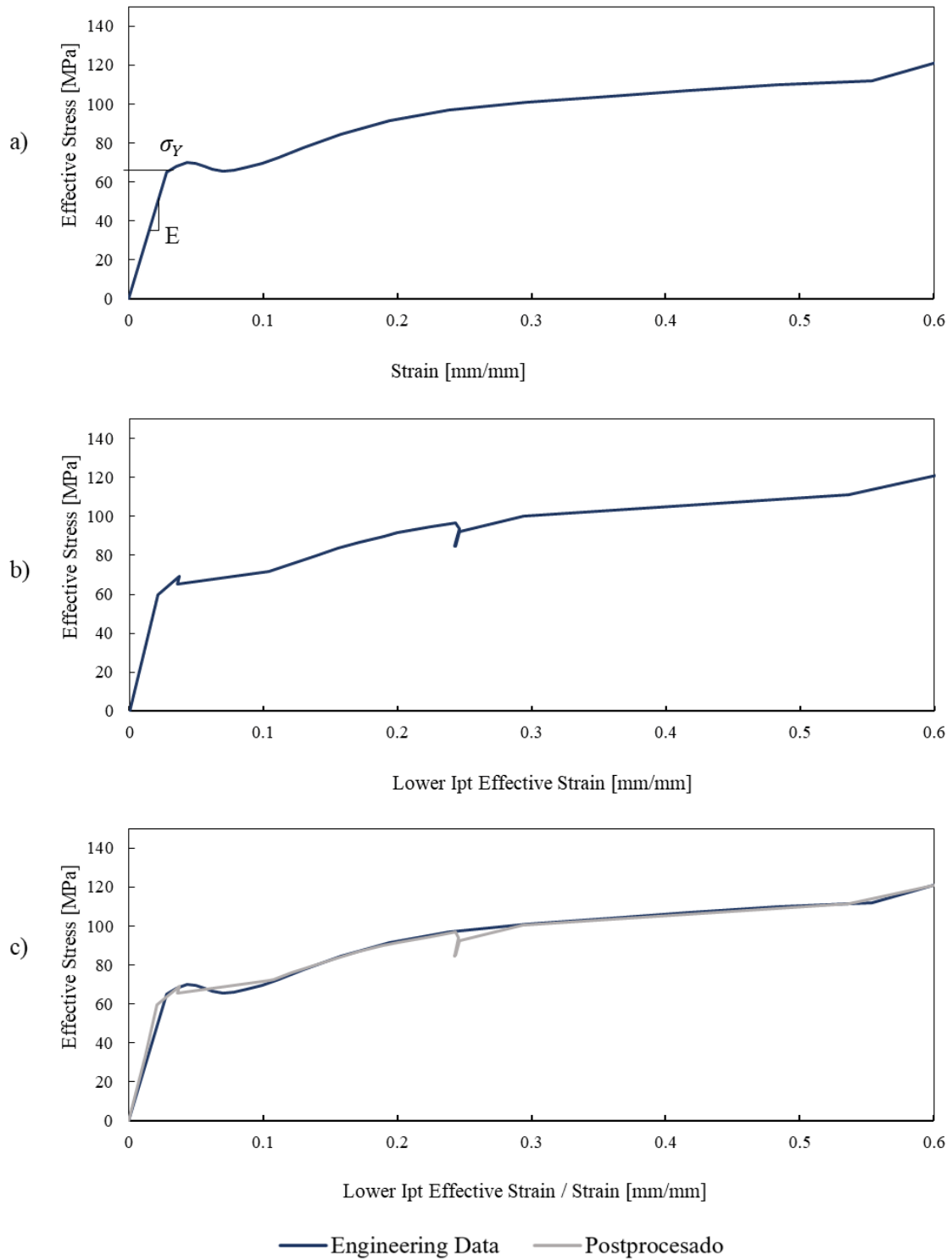


Figura 30. a) Curva de tracción introducida en el módulo *Engineering Data*, b) Curva tensión-deformación obtenida con LS-Prepost, c) Comparativa de las dos curvas en la misma gráfica.

Finalmente, aunque se puede confirmar una adecuada representación del comportamiento general y un resultado aceptable, debe considerarse que el modelo es idealizado y que una futura extensión del trabajo debería incluir criterios de daño o modelos viscoelasto-plásticos más avanzados para capturar con mayor fidelidad la etapa de estricción y fractura.

#### **4.2 Resultados del modelo numérico SPIF**

Una vez validado el material usando el modelo de tracción, se analizan los resultados del proceso de SPIF. Este modelo ha permitido reproducir la evolución de la deformación de la lámina durante todo el proceso de conformado incremental. Como ya se comentó en el apartado 3.2., los datos que se van a analizar han sido: la tensión de von Mises, las deformaciones principales (*Lower Ipt Max Prin Strain* y *Lower Ipt 2nd Prin Strain*), así como las coordenadas nodales y desplazamientos en los ejes X, Y, Z. La componente *Max Prin Strain* representa la mayor deformación principal que experimenta el material ( $\epsilon_1$ ), generalmente asociada con el alargamiento máximo en la dirección predominante de estiramiento. Por su parte, la componente *2nd Prin Strain* refleja la segunda deformación principal ( $\epsilon_2$ ), normalmente vinculada a la compresión o deformación secundaria en una dirección ortogonal a la anterior. La consideración conjunta de ambas magnitudes permite obtener una visión más completa del estado de deformación, lo cual resulta esencial para interpretar con precisión el comportamiento del material bajo solicitaciones complejas, como las que se producen durante el proceso SPIF. En el modelo empleado, el contacto entre la herramienta y la chapa se produce en la superficie definida como UPPER o capa 5. Sin embargo, para el análisis de los resultados en este trabajo se ha considerado el punto de integración inferior (*Lower IPT*) ya que en esta región se concentran habitualmente las deformaciones y tensiones más críticas del espesor. La superficie inferior (la que no está en contacto con la herramienta) es la que está sometida a mayor tracción, por estar sujeta a flexión por el radio de la herramienta. De esta forma, el estudio permite evaluar con mayor precisión los fenómenos asociados a la conformabilidad y la aparición del fallo en la cara opuesta al contacto directo, complementando la información aportada por la superficie en contacto (véase el esquema de la Figura 21, donde se representa la discretización del espesor).

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos en la sección que se muestra en la Figura 31. Para ello se ha definido una trayectoria o *path* a lo largo de una sección representativa de la pieza, este procedimiento permite extraer con detalle la evolución de variables clave. Aunque el proceso no es axisimétrico, los resultados varían muy poco en función de la orientación de la sección, siempre que pase por el centro de la lámina. En este caso la sección coincide con el eje X del modelo geométrico.

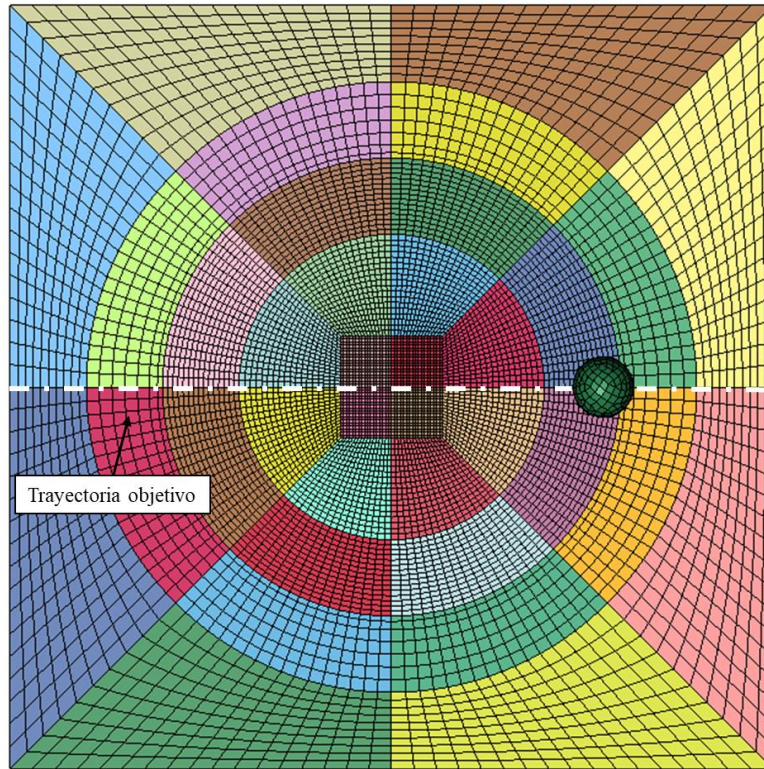


Figura 31. Trayectoria o *path* sobre el que se evalúan los resultados.

En primer lugar, se va a realizar una representación detallada de las deformaciones principales en la cara inferior de la chapa de policarbonato (*Lower Ipt Max Prin Strain* y *Lower Ipt 2nd Prin Strain*) a lo largo del *path* definido. Este análisis se llevará a cabo en distintos instantes clave del proceso, seleccionados en función de la posición de la herramienta en el eje Z. Dado que el valor del tiempo de simulación no se asocia de forma intuitiva con un estado físico concreto del modelo, ya que está escalado a través del *time scaling*, se ha optado por utilizar como referencia la cota Z alcanzada por la herramienta en cada momento. Así, por ejemplo, el instante correspondiente a  $t=0.0015$  segundos equivale a la posición de la herramienta en  $Z=-5$  milímetros.

Se consideran un total de cinco estados representativos del modelo:  $Z=0$  mm, que corresponde a la condición inicial de la lámina en estado indeformado y las posiciones  $Z=-5$ ,  $Z=-10$ ,  $Z=-15$  y  $Z=-20$  mm, que permiten analizar la evolución progresiva del proceso. En cada uno de estos estados se analizarán los parámetros clave, comenzando con las deformaciones principales para caracterizar el modo en que el material se adapta al proceso incremental, seguidas por la representación del campo de tensiones en puntos seleccionados como representativos de la lámina. Por último, se mostrará la deformada de la chapa en los planos XZ y XY, lo que permitirá visualizar la evolución geométrica de la pieza y evaluar tanto la precisión de conformado como los efectos asociados a la recuperación elástica y los fenómenos de torsión.

### 4.2.1 Análisis de deformaciones

El análisis del campo de deformaciones permite comprender de manera detallada cómo se distribuye la deformación plástica a lo largo de la chapa durante el proceso de conformado incremental. En la siguiente figura se ilustra un esquema de la geometría deformada de la lámina de policarbonato, donde se han identificado tres puntos clave a lo largo del perfil, lo que permite analizar la evolución de las deformaciones en función de la posición.

El análisis del campo de deformaciones permite comprender de manera detallada cómo se distribuye la deformación plástica en la lámina lo largo del proceso de conformado incremental. En la Figura 32 se muestra un esquema representativo de la geometría resultante, donde se han identificado tres puntos clave en el perfil deformado que permiten estudiar la evolución local de las deformaciones en función de la posición de la herramienta y la interacción con el material:

- Punto I: se encuentra en una zona no afectada por la herramienta, prácticamente indeformada, lo que lo convierte en una referencia útil para establecer la diferencia con las regiones sometidas a sollicitaciones intensas. Es además un punto que no tiene contacto con la herramienta en ningún momento del proceso. Como se verá a lo largo de este apartado, su comportamiento refleja el estado inicial del material sin apenas acumulación de deformación plástica ni tensiones.
- Punto II: está localizado en la región de máxima curvatura, justo en la transición entre el fondo y la pared del cono. Esta zona concentra los mayores niveles de deformación debido al contacto directo y repetido con la herramienta, lo que explica que sea el punto más deformado de los tres. El análisis en este punto resulta esencial para evaluar la capacidad del material para soportar deformaciones elevadas sin llegar a la fractura.
- Punto III: se sitúa en una posición intermedia de la pared del cono. Su nivel de deformación se encuentra a caballo entre los puntos I y II, lo que lo convierte en un indicador del gradiente de deformación que se desarrolla a lo largo de la pared conformada.

Tabla 5. Identificación y posición de los puntos característicos objeto de estudio.

<b>Identificación</b>	<b>Posición X (mm)</b>
Punto I	0.3
Punto II	15
Punto III	22

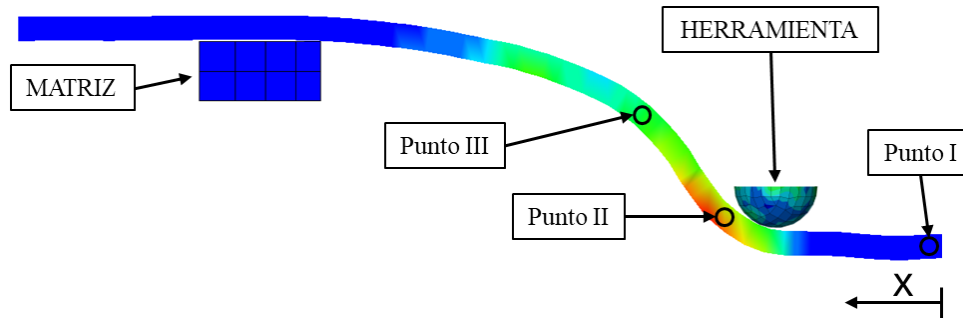


Figura 32. Esquema de la lámina de policarbonato deformada donde se ubican los puntos característicos.

En la Figura 33 se muestran los perfiles de deformación principal máxima y mínima para una sección radial del cono como la representada en la Figura 32, donde se han identificado los puntos de interés I-III. Cada una de las líneas representadas corresponde al perfil de deformaciones para un instante del proceso de conformado que se identifica según la posición de la herramienta en el eje  $Z$  ( $Z=0$ ,  $Z=-5$ ,  $Z=-10$ ,  $Z=-15$  y  $Z=-20$  mm). Cuanto menor es el valor de  $Z$ , más avanzado está el ensayo y por tanto, más deformación se haya en el troco de cono. Otro hecho que se observa es una mayor deformación en la componente  $\varepsilon_1$  de la deformación principal (*Lower Ipt Max Prin Strain*, Figura 33.a) den comparación con la componente  $\varepsilon_2$  (*Lower Ipt 2nd Prin Strain*, Figura 33.b). Esto es debido a que el cono es una geometría diseñada para evolucionar en deformación plana ( $\varepsilon_2 = 0$ ). Nótese que no se alcanzan valores nulos para la componente  $\varepsilon_2$ , aunque es considerablemente menor, lo cual ocurre en otros estudios que analizan estas geometrías (López-Fernández, 2021). En resumen, la Figura 33 muestra que la fabricación de una geometría troncocónica mediante SPIF desarrolla deformaciones similares a las que se observan en metales, aunque con valores de deformación principal mínima  $\varepsilon_2$  ligeramente mayores, lo cual indica una desviación con respecto al estado de deformación plana.

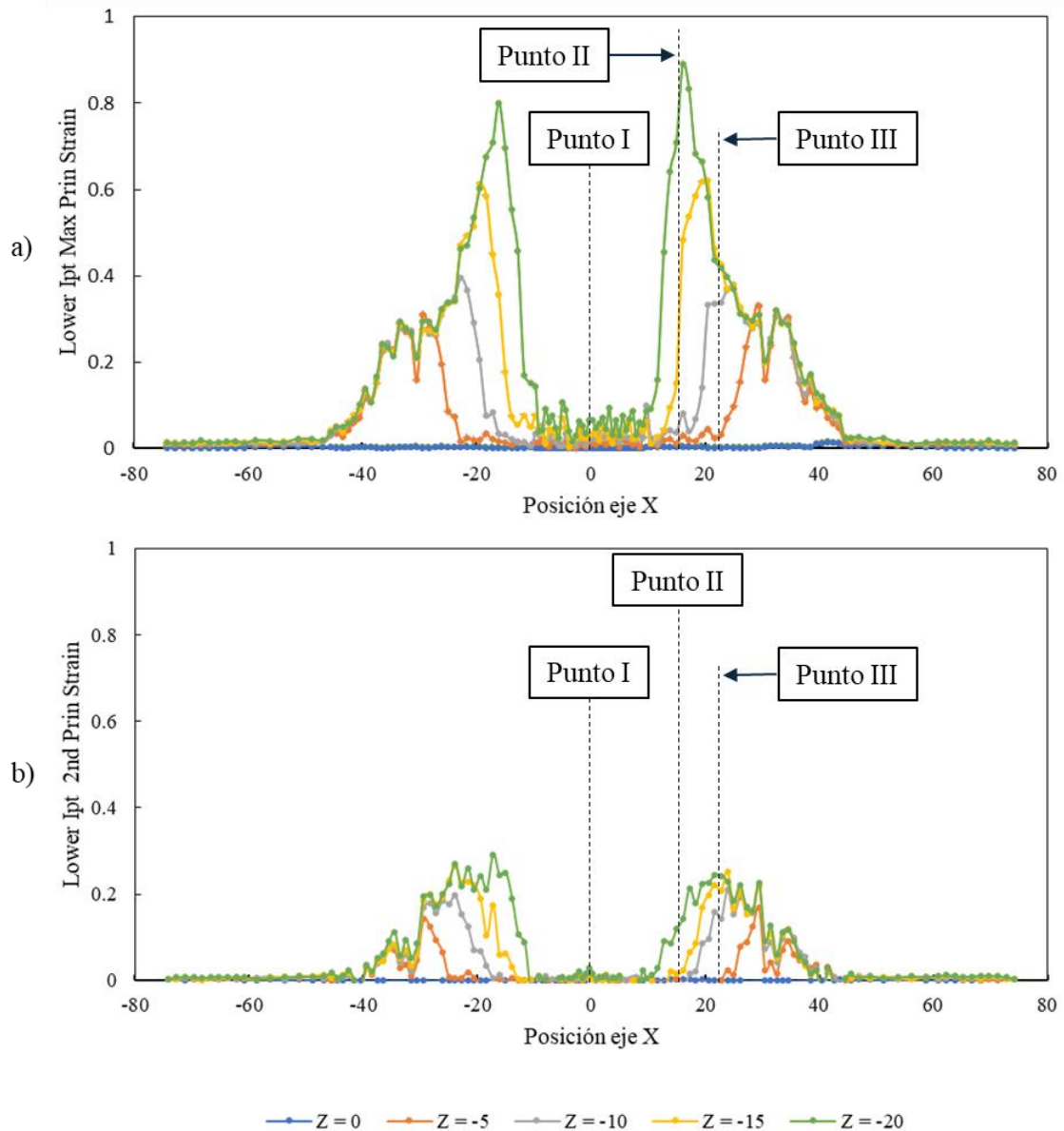


Figura 33. Representación de las deformaciones principales para los distintos estados estudiados, definidos por la posición de la herramienta: a) Deformación principal mayor,  $\varepsilon_1$ , b) Deformación principal menor,  $\varepsilon_2$ .

En la Figura 34 se ha representado la evolución de la componente mayor (curva azul) y menor (curva gris) de las deformaciones principales a lo largo del tiempo y de la profundidad alcanzada de la herramienta para los puntos característicos I-III. Al igual que ocurría en la Figura 33, la componente es mayor  $\varepsilon_1$  que la componente  $\varepsilon_2$ . La Figura 34.a corresponde al punto característico I desde el instante de tiempo inicial hasta  $t=0.35$  ( $Z=-21$ ). Como se puede observar, al tratarse de un punto que apenas se ha deformado (se sitúa en el centro del cono y la herramienta no llega al él), los valores de la deformación mayor y menor son prácticamente cero. Sin embargo, para los puntos II y III se observa que los

cambios en deformaciones más significativos se observan cuando la herramienta llega al punto, dicho instante se ha indicado en las Figuras 34.b-c.

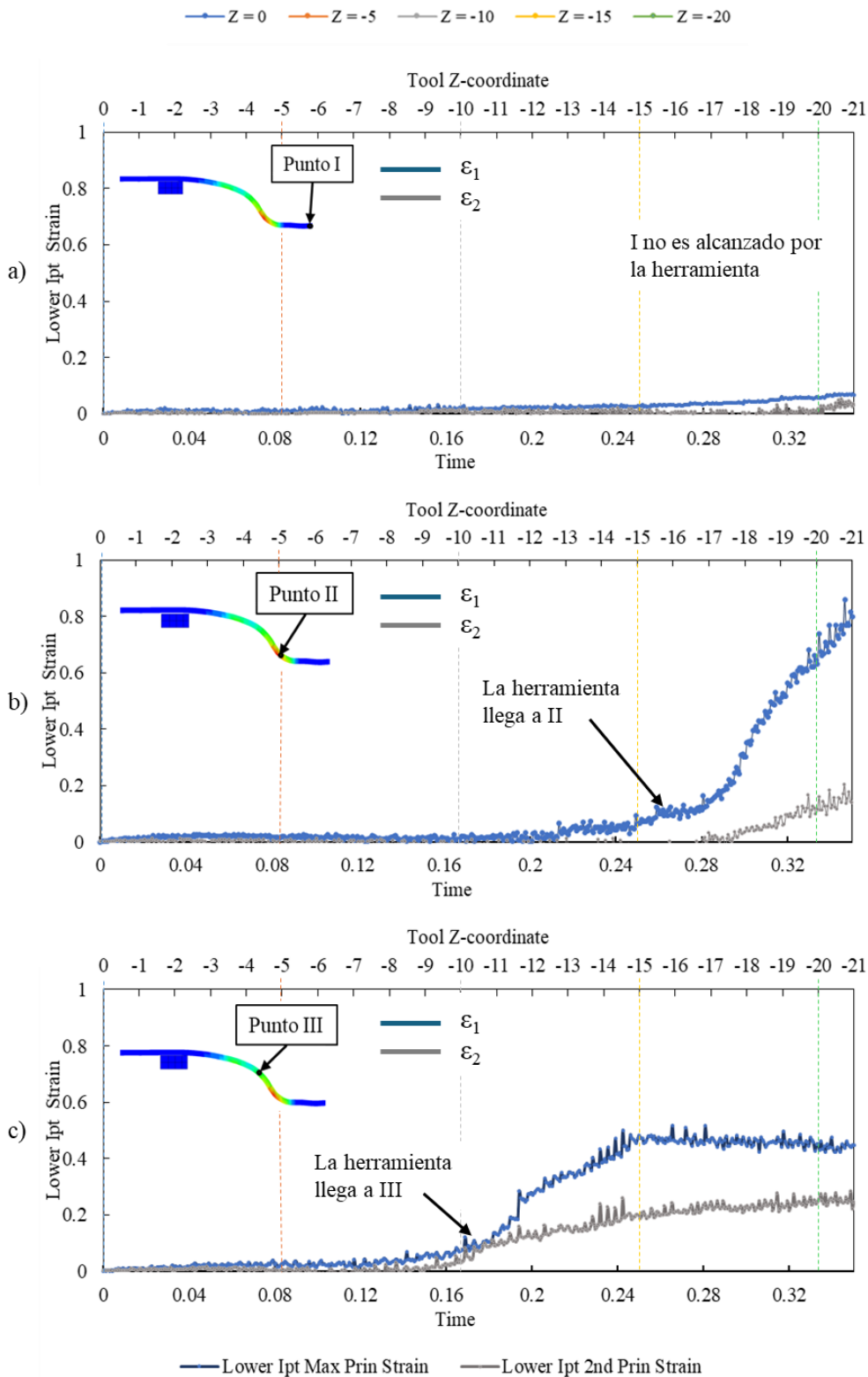


Figura 34. Evolución de las deformaciones principales a lo largo del tiempo para los puntos característicos: a) Punto I, b) Punto II, c) Punto III.

Por otro lado, en la Figura 34.b., se representa la deformación del punto con mayor deformación (punto III), donde la herramienta ha realizado muchas pasadas con mucha profundidad respecto a la cota 0 del eje Z. Este hecho provoca un aumento considerable de la deformación de la chapa en esta zona, observándose una distribución de deformaciones con los valores más altos en la gráfica. Por último, en la Figura 34.c., se muestra la evolución del punto II el cual cuenta con cierto grado de deformación, ya que está más deformado que el punto I, pero menos que el punto III. Esto se traduce en un aumento de la deformación a medida que la herramienta realiza cada pasada hasta que se estabiliza en un valor concreto, lo cual es debido a que la trayectoria del útil se va cerrando hasta adquirir la forma del tronco de cono y a partir del instante de tiempo  $t=0.25$  la herramienta, que se encuentra a una cota  $Z=-15$ , entra en contacto con una zona de la lámina interior al punto característico II.

En general, se observa que un punto que no ha sido alcanzado por la herramienta (Punto I) desarrolla deformaciones casi nulas, que probablemente sean de orden elástico. Por otro lado, un punto que es alcanzado por la herramienta en un estado muy inicial del proceso (Punto III) experimenta un aumento en deformaciones cuando la herramienta llega a él, pero estas se estabilizan una vez la herramienta se aleja del punto. Por último, un punto alcanzado por la herramienta en un estado avanzado del proceso es el que experimenta mayores deformaciones, las cuales aumentan significativamente cuando la herramienta se acerca al punto.

#### **4.2.2 Análisis de tensiones**

El estudio del campo de tensiones obtenido a partir de las simulaciones constituye un aspecto fundamental para evaluar el comportamiento del policarbonato durante el SPIF. El análisis de la distribución de tensiones permite identificar las zonas críticas de la lámina, donde se concentran los esfuerzos principales y pueden originarse fenómenos de inestabilidad como el inicio de la estricción localizada o la aparición de fracturas. Al igual que en el análisis del campo de deformaciones, las tensiones han sido representadas para los tres puntos característicos frente al tiempo y Z. De esta forma, se puede observar la evolución de la tensión a lo largo de todo el proceso de conformado, lo cual permite conocer de primera mano la tensión que se alcanza en cada pasada de la herramienta o la tensión residual una vez que se ha conformado el material.

En la Figura 35.a se representa la evolución de las tensiones de Von Mises para el punto I a lo largo del tiempo. Al igual que ocurría en el análisis de las deformaciones, al tratarse de una zona área que no ha entrado en contacto directo con la herramienta, los valores de la tensión registrados son inferiores en comparación con los otros dos puntos analizados. En las Figuras 35.b-c se muestra la tensión a lo largo del tiempo para los puntos II y III respectivamente. En estas zonas al sí existir interacción directa con la herramienta, se observa un aumento gradual de la tensión por cada pasada que realiza la herramienta, alcanzando valores máximos para el punto II, lo que pone de manifiesto la mayor severidad de las condiciones de carga en esa zona.

Además, en estas gráficas se aprecia un comportamiento cíclico, donde cada paso de la herramienta genera un máximo relativo de tensión seguido de una relajación parcial hasta que la herramienta vuelve a pasar por la misma posición. Este comportamiento oscilatorio

confirma que la tensión depende en gran medida del contacto directo entre la herramienta y la lámina, lo cual evidencia la naturaleza incremental del proceso. Asimismo, se observa una tendencia de acumulación progresiva de tensiones a lo largo del tiempo, reflejada en el aumento del nivel base entre picos, lo que puede asociarse al endurecimiento por deformación del material y a una redistribución limitada de esfuerzos a medida que la deformación avanza.

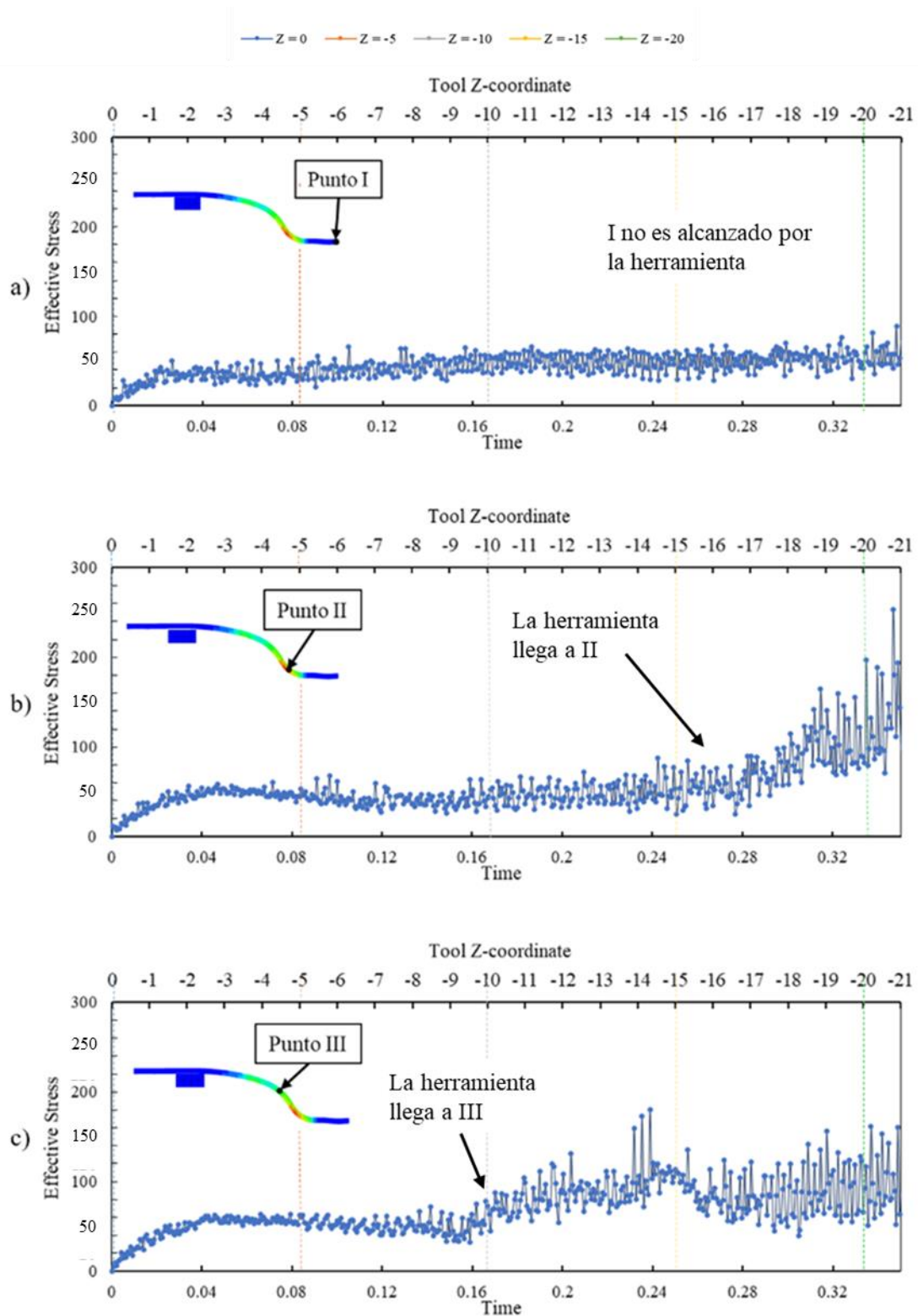


Figura 35. Evolución temporal de la tensión de Von-Mises en los puntos característicos: a) Punto I, b) Punto II, c) Punto III.

Los resultados muestran cómo el avance progresivo de la herramienta genera un estado de tensiones localizado en la zona de contacto, mientras que el resto de la superficie experimenta una redistribución gradual de esfuerzos definido por la geometría final de la pieza, que para el caso objeto de estudio es un tronco de cono. Además, tras el análisis

realizado se desprende que el valor de la tensión en un área es dependiente de la cercanía de la herramienta a esa zona puesto que para el punto I la tensión es baja porque la herramienta no ha alcanzado esa zona, en el punto II la tensión aumenta hasta el final del proceso y en el punto III la tensión aumenta cuando la herramienta llega a la zona donde se ubican el punto y se estabiliza cuando se va a una zona interior.

### 4.2.3 Deformada

Con el fin de analizar el comportamiento geométrico de la lámina de policarbonato, se ha realizado una representación de la deformada para dos perfiles característicos respecto a la trayectoria de la Figura 31: uno en el plano XZ y otro en el plano XY. Esta representación permite obtener la evolución de la geometría de la chapa a lo largo del eje Z, lo que resulta esencial para identificar la profundidad y la precisión de conformado alcanzada en cada instante. Además, el análisis del perfil en el plano XY permite visualizar la existencia de fenómenos de torsión o *twisting*, asociados a asimetrías en la trayectoria de la herramienta o a las condiciones de sujeción de la lámina. Gracias a esta doble perspectiva, es posible caracterizar con mayor exactitud la forma final de la pieza y evaluar la influencia de los parámetros de proceso sobre la estabilidad geométrica del conformado.

#### 4.2.3.1 Comportamiento en el plano XZ

Para llevar a cabo un análisis adecuado de los resultados obtenidos en el proceso de conformado, resulta esencial la evaluación de la geometría en el plano XZ. Este enfoque permite representar de manera clara el perfil longitudinal de la chapa, así como identificar desviaciones respecto a la forma teórica diseñada. Asimismo, el estudio de este plano facilita la observación de la distribución de desplazamientos en la dirección Z, aportando información directa sobre la profundidad alcanzada, la precisión geométrica de la pieza y la posible aparición de inestabilidades locales.

Uno de los fenómenos más relevantes que puede evidenciarse en este plano es el *springback*, entendido como la recuperación elástica que experimenta el material una vez retirada la herramienta. Este efecto, ampliamente estudiado en los procesos de conformado de chapa, resulta especialmente significativo en materiales poliméricos como el policarbonato, debido a su elevada capacidad de recuperación elástica en comparación con los metales (Silva et al., 2010; Martins et al., 2008).

De esta forma, en la Figura 36 se muestran los diferentes perfiles que adquiere la deformada de la chapa para aquellos instantes de tiempo en los que la herramienta se encuentra a diferentes alturas.

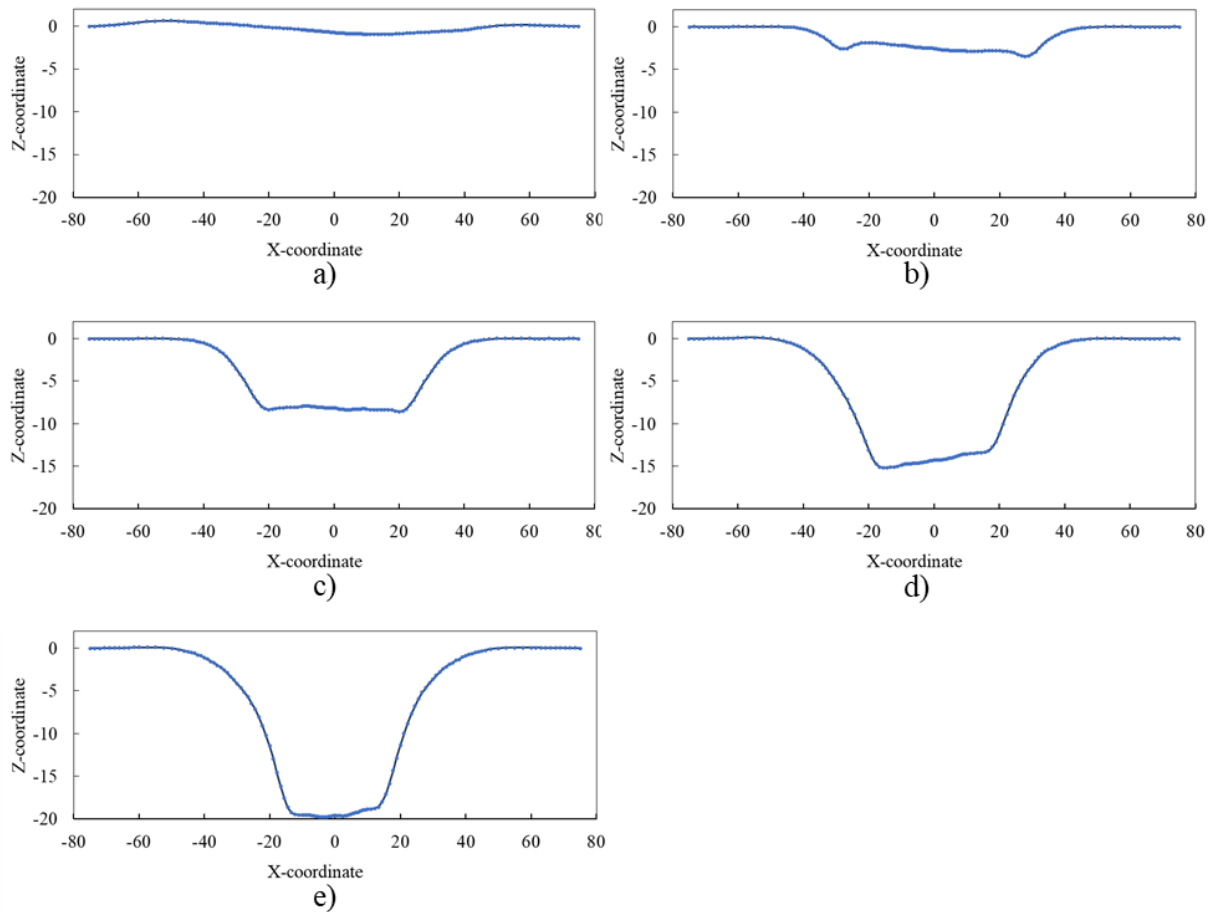


Figura 36. Representación de la geometría respecto al plano XZ para los distintos estados estudiados, definidos por la posición de la herramienta: a)  $Z=0$  mm, b)  $Z=-5$  mm, c)  $Z=-10$  mm, d)  $Z=-15$  mm, e)  $Z=-20$  mm.

Por otro lado, la Figura 37 ilustra la evolución del perfil de la lámina de policarbonato conformada mediante SPIF, mostrando la influencia del fenómeno de *springback*. Durante el proceso, la herramienta alcanza una profundidad de conformado de 21 mm (curva azul), generando la geometría prevista. Sin embargo, una vez que la herramienta retorna a su posición inicial y deja de estar en contacto con la lámina, puede observarse cómo la pieza experimenta una recuperación elástica, reflejada en el perfil final (curva gris).

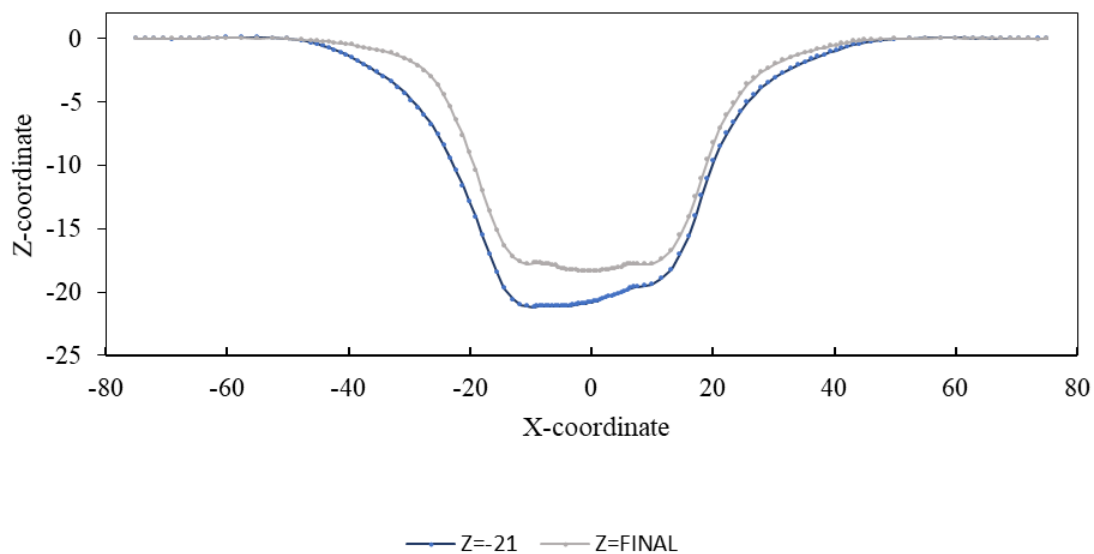


Figura 37. Representación del *springback* para el perfil en el plano XZ.

Este retroceso se debe a la recuperación elástica del material, fenómeno característico en procesos de conformado de láminas, y que en el caso de polímeros como el policarbonato resulta aún más acusado que en metales. Como consecuencia, la pieza final no conserva de manera exacta la geometría objetivo, generando desviaciones dimensionales que deben ser consideradas en el diseño y la validación del proceso. La cuantificación de este efecto es fundamental para introducir estrategias de compensación geométrica o ajustes en las trayectorias de la herramienta, de modo que se garantice la precisión de la pieza conformada.

Es importante señalar que los resultados obtenidos en el modelo numérico se ajustan a los ensayos experimentales, ya que muestran que este efecto es considerable, presentando una recuperación elástica del orden de 5 milímetros. Esto es debido al comportamiento del policarbonato, caracterizado por una marcada viscoelasticidad e influencia de fenómenos dependientes de la velocidad de deformación y la temperatura.

#### 4.2.3.2 Comportamiento en el plano XY

El análisis de los resultados en el plano XY constituye una herramienta clave para estudiar la geometría final de la lámina conformada mediante SPIF, ya que permite observar la distribución del material en la superficie de la pieza y detectar posibles desviaciones respecto a la forma teórica. A través de este perfil transversal es posible evaluar la simetría de la geometría, así como caracterizar con mayor claridad la forma adquirida en la dirección del plano.

A través de la representación de la deformada en este plano, se puede analizar el *twisting* al que está sometido la lámina de policarbonato (Figura 38). El fenómeno del *twisting* en el conformado incremental de chapa se refiere a la aparición de rotaciones no deseadas en el plano de la lámina durante el proceso de deformación. Estas distorsiones geométricas se producen cuando las trayectorias de la herramienta generan una

acumulación desigual de deformaciones plásticas, provocando que la pieza adopte una torsión respecto al plano XY. Aunque el *twisting* no suele comprometer la integridad estructural de la lámina, sí afecta de manera directa a la precisión dimensional y a la calidad superficial (Hussain et al., 2007).

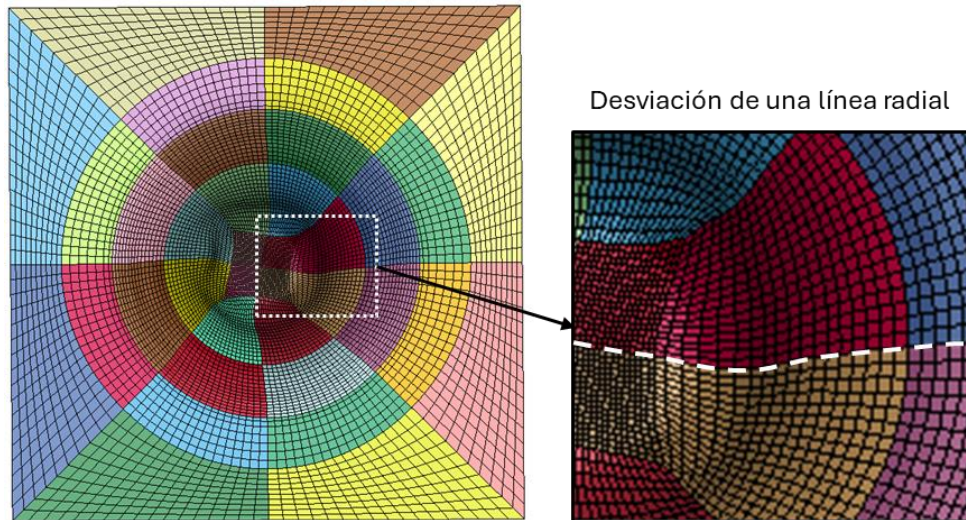


Figura 38. Existencia de *twisting* en el estado final del proceso SPIF.

El análisis del *twisting* resulta de gran interés en materiales poliméricos debido a su mayor sensibilidad a fenómenos de recuperación elástica y a la acumulación de tensiones residuales tras el conformado. A diferencia de los metales, en los que la anisotropía y los parámetros de proceso tienden a ser los principales responsables de este efecto, en los polímeros se suma la influencia del comportamiento viscoelástico, lo que intensifica la aparición de deformaciones fuera del plano (Ambrogio et al., 2012). Por esta razón, representar la deformada de la lámina en el plano XY permite identificar claramente las desviaciones respecto a la trayectoria nominal de la herramienta.

En este contexto, el análisis de los perfiles deformados en el plano XY que se presentan a continuación no solo permite observar la geometría final de la lámina de policarbonato, sino también detectar de manera visual y cuantitativa la presencia del *twisting*. El análisis de los resultados obtenidos es esencial para comprender las limitaciones del SPIF aplicado a polímeros, así como relacionarlos con parámetros del proceso. En este contexto, la Figura 39 muestra cómo un incremento en la profundidad de conformado de la herramienta está asociado con una manifestación más acusada del *twisting*.

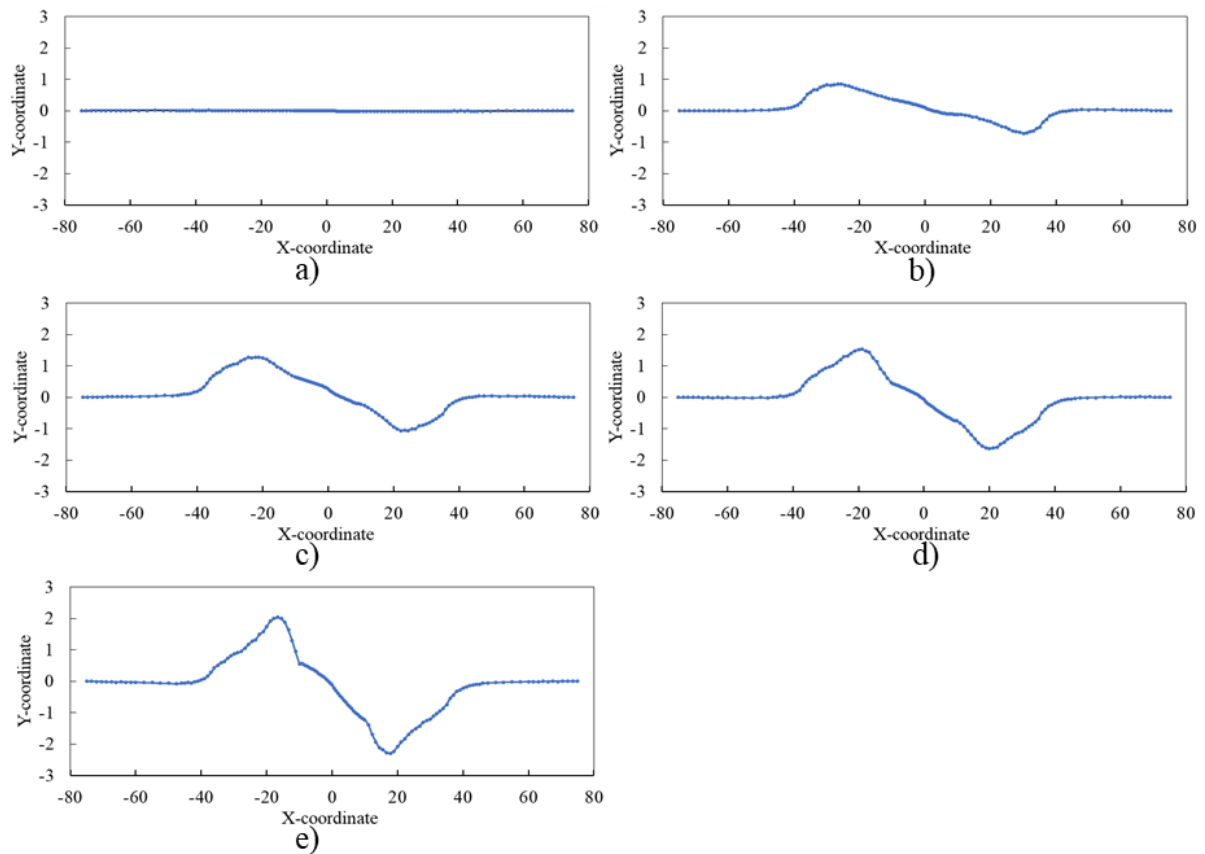


Figura 39. Evolución del twisting según el plano XY para distintos estados, definidos por la posición de la herramienta: a) Z=0 mm, b) Z=-5 mm, c) Z=-10 mm, d) Z=-15 mm, e) Z=-20 mm.

La Figura 40 ilustra el fenómeno *springback* a lo largo del plano XY. En este caso, el modelo representa un nivel de recuperación elástica diferenciado en dos zonas. Para las coordenadas positivas se advierte una mayor respuesta elástica del material, la cual puede venir dada por la posición final de conformado en la que se encuentra la herramienta mostrando una gran diferencia entre el estado final (curva gris) y el instante anterior (curva azul). Por otro lado, para las coordenadas negativas se advierte una menor respuesta elástica, posiblemente debido al efecto de la inercia inherente en la lámina de policarbonato.

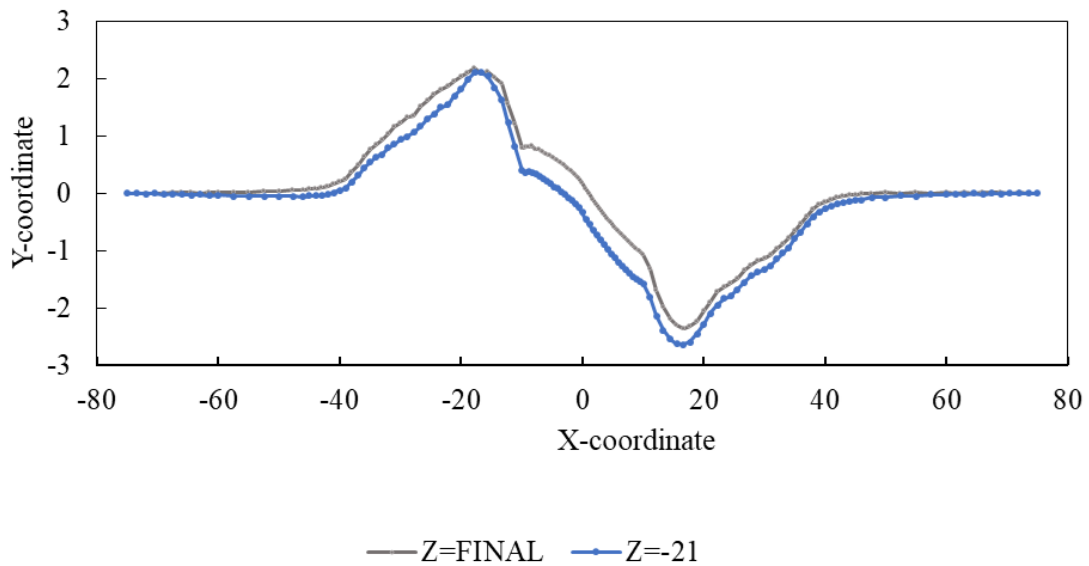


Figura 40. Representación del *springback* para el perfil en el plano XY

### 4.3 Discusión sobre la fidelidad del modelo

Los resultados presentados en este capítulo, tanto en el campo de tensiones como en el de deformaciones y en la evolución de la geometría de la chapa a través de los perfiles en los planos XY y XZ, reflejan un comportamiento similar a los resultados obtenidos en la literatura para el conformado incremental de láminas metálicas. Las gráficas muestran patrones característicos en términos de tensiones, se observa cómo éstas se concentran progresivamente en la zona de contacto con la herramienta, mientras que el resto de la lámina experimenta una redistribución gradual de esfuerzos. Por otro lado, el campo de deformaciones revela un incremento localizado en las zonas críticas, lo que coincide con la evolución típica observada en ensayos experimentales. Asimismo, los perfiles geométricos obtenidos en los planos XY y XZ reproducen los efectos de *twisting* o *springback*. Todo ello sugiere que el modelo numérico ha captado de forma aceptable los fenómenos asociados al SPIF.

Aunque se produce correlación con los modelos experimentales disponibles para láminas metálicas, es necesario validar la fidelidad del modelo a través de un análisis experimental específico para el caso del policarbonato. Ya que este material presenta particularidades frente a los metales, como una mayor sensibilidad a la velocidad de deformación, efectos de recuperación elástica más acusados y una distinta respuesta en el endurecimiento plástico, lo que puede introducir discrepancias si no se consideran adecuadamente.

En este contexto, a pesar de que la validación experimental se encuentra fuera del ámbito de este trabajo, el presente estudio se plantea como una primera aproximación al entendimiento del conformado incremental monopunto de policarbonato, donde los resultados numéricos sientan una base sólida para futuras validaciones. La similitud en la forma de las gráficas con respecto a los ensayos realizados en metales proporciona confianza en el planteamiento del modelo, pero al mismo tiempo evidencia la necesidad de verificar cuantitativamente parámetros como la distribución de deformaciones, los límites de conformabilidad y la precisión geométrica de la pieza final. De esta forma, se

procede a la representación de los diagramas FLD, permitiendo determinar con mayor precisión si el policarbonato se encuentra dentro de la zona de deformación plana.

En la Figura 41, se muestran los diagramas FLD para aquellos estados en los que la herramienta se encuentra a distintas cotas. Para una mayor claridad, se ha llevado a cabo la representación de la mitad de los elementos que forman la trayectoria definida en la Figura 31. Por un lado, las Figuras 41.a. y 41.b. ilustran el FLD de los estados en los que la herramienta se encuentra a  $Z=-5$  y  $Z=-10$ . En ambos casos, la pieza se encuentra mayoritariamente en un régimen de tracción uniaxial a biaxial ligera observándose una acumulación progresiva de deformación plástica en la dirección principal de tracción. Atendiendo a la Figura 13, se puede asegurar que en las dos situaciones la pieza se encuentra en un estado seguro y no crítico.

Por otro lado, en las Figuras 41.c. y 41.d. se muestran los diagramas de conformabilidad para los estados en los que la cota del útil es  $-15$  y  $-20$  mm, respectivamente. Para este escenario se observan mayores valores de las deformaciones debido a un aumento de la profundidad de la herramienta. En ambos casos, existen varios puntos próximos a la diagonal  $\beta=1$ , lo que significa que el material está entrando en un régimen de tracción biaxial en los que sus componentes principales mayor y menor son prácticamente iguales. Este hecho implica la posibilidad de alcanzar la zona límite de conformabilidad y el riesgo de aparición de inestabilidad plástica o rotura por adelgazamiento uniforme debido a que la capacidad de deformación del material en biaxialidad es limitada.

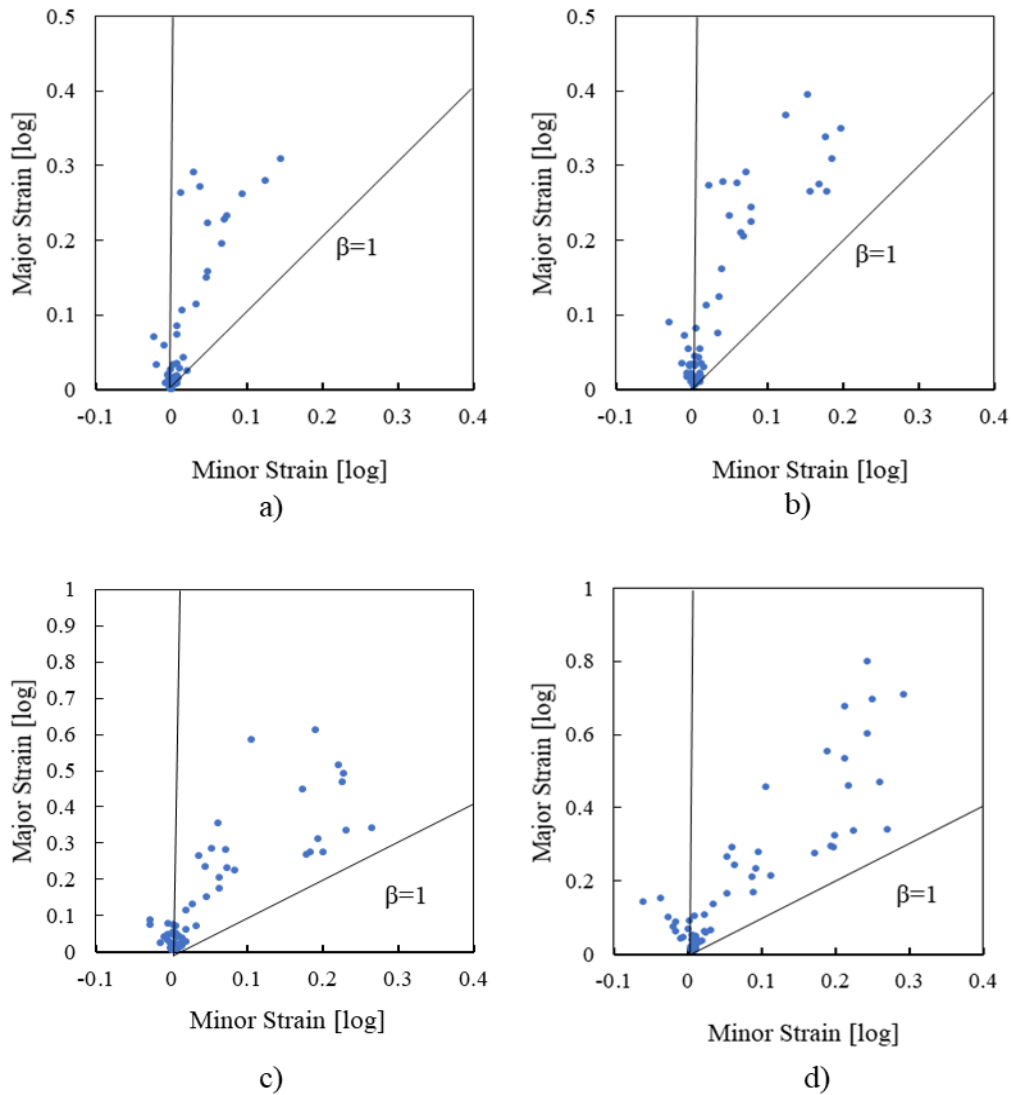


Figura 41. Diagramas FLD para los distintos estados estudiados, definidos por la posición de la herramienta: a)  $Z=-5$  mm, b)  $Z=-10$  mm, c)  $Z=-15$  mm, d)  $Z=-20$  mm.

Con todo ello, los diagramas FLD muestran que en la mayor parte del proceso la lámina de policarbonato trabaja entre deformación plana y triaxialidad de tracción ligera, manteniéndose en una zona estable por debajo de la curva límite de conformabilidad. Cuando los puntos se aproximan a la diagonal  $\beta=1$  la sollicitación se vuelve más severa y la margen de conformabilidad disminuye, existiendo la posibilidad de alcanzar zonas críticas, sobre todo en aquellos estados donde la herramienta se encuentra más abajo. En conjunto, los FLD confirman que el procedimiento actual es viable, pero requieren vigilancia en las regiones cercanas a la diagonal y en los incrementos finales de profundidad.

# Capítulo V

## Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se resumen los principales hallazgos del trabajo, destacando las conclusiones más relevantes en cuanto a la validez del modelo numérico desarrollado y su capacidad para predecir el comportamiento real del proceso SPIF sobre láminas de policarbonato. Asimismo, se identifican las limitaciones encontradas y se proponen posibles líneas futuras de investigación para ampliar y profundizar en el estudio del conformado incremental en materiales poliméricos.

### 5.1. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido profundizar en el estudio del conformado incremental monopunto (SPIF) aplicado a láminas de policarbonato mediante un enfoque basado en el método de los elementos finitos. A lo largo del desarrollo de este TFM se ha puesto de manifiesto la dificultad que supone modelar polímeros debido a su complejo comportamiento, caracterizado por su respuesta no lineal, elevada recuperación elástica y dependencia de la velocidad de deformación. Sin embargo, también se ha demostrado el potencial de estas técnicas numéricas como herramienta de predicción y optimización de procesos de conformado, contribuyendo así a un campo en el que la bibliografía sigue siendo muy limitada.

Puede afirmarse que se han cumplido los objetivos planteados inicialmente: se ha diseñado y validado un modelo numérico mediante la simulación de un ensayo de tracción, se ha implementado un modelo SPIF con policarbonato, y se han analizado en detalle los campos de tensiones, deformaciones y la deformada final de la chapa. Estos resultados han permitido identificar por primera vez el comportamiento del material bajo el proceso de conformado incremental y establecer una base metodológica que podrá servir de referencia en futuros estudios y validaciones experimentales y numéricas.

En lo que respecta al estado del arte, se ha constatado que, mientras que el SPIF aplicado a metales cuenta con una amplia trayectoria experimental y numérica, los polímeros, y en particular el policarbonato, han recibido una atención mucho menor. Esta carencia justifica la relevancia del presente trabajo, en el que se ha abordado la implementación de un modelo numérico con el fin de avanzar en la comprensión de los mecanismos de deformación y en la predicción de fenómenos característicos como el *springback* o el *twisting*.

La metodología desarrollada ha sido clave para garantizar la validez de los resultados. La utilización de elementos tipo *solid-shell* ha permitido capturar la distribución de tensiones y deformaciones a través del espesor, mientras que la definición de un mallado regular con elementos cuadriláteros ha contribuido a la estabilidad del cálculo. Asimismo, la validación previa mediante el ensayo de tracción ha asegurado que la curva esfuerzo-

deformación introducida en el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento mecánico del policarbonato, aunque se ha constatado la ausencia de fractura en la simulación, lo que limita su aplicación a grandes deformaciones.

En cuanto a los resultados obtenidos, el análisis de las deformaciones y tensiones principales ha permitido identificar la evolución de los puntos clave de la lámina de policarbonato, llegando a la conclusión de que el estado de deformaciones y tensiones es dependiente tanto de la proximidad de la herramienta a dicha zona como del número de pasadas. También, se ha observado que los máximos se alcanzan en las zonas de contacto directo con la herramienta, mientras que el resto de la superficie presenta una distribución progresiva de esfuerzos. Por otro lado, el campo de deformaciones representado establece que la componente  $\varepsilon_1$  tiene un peso mayor que la componente  $\varepsilon_2$  de las deformaciones principales; además, estas deformaciones son dependientes de la profundidad a la que se encuentra la herramienta durante el proceso de conformado. La representación de la deformada en los planos XY y XZ ha aportado información relevante sobre la geometría final de la pieza, permitiendo analizar tanto el perfil en profundidad como la presencia de distorsiones por *twisting*. El fenómeno de recuperación elástica también ha quedado completamente reproducido en el modelo numérico, otorgando resultados que se ajustan a lo esperado en ensayos experimentales.

Por otro lado, el modelo ha mostrado que, si bien las gráficas de tensiones, deformaciones y desplazamientos presentan una forma coherente con la literatura para chapas metálicas, resulta imprescindible validar el modelo con ensayos experimentales equivalentes. Solo de esta forma podrá asegurarse que el modelo no solo capta las tendencias generales, sino que también predice de manera precisa la magnitud de los fenómenos característicos del SPIF en polímeros.

En conclusión, este trabajo constituye una primera aproximación sólida a la simulación del SPIF en láminas de policarbonato. Ha permitido identificar las limitaciones actuales del modelado numérico y, al mismo tiempo, abre nuevas líneas de investigación orientadas a la mejora de la predicción del comportamiento de láminas poliméricas, la implementación de criterios de fractura y la validación experimental del modelo. Todo ello representa un avance significativo hacia la consolidación de los polímeros como materiales candidatos en procesos de conformado incremental, ampliando así las posibilidades de aplicación industrial de esta tecnología.

## **5.2. Trabajos futuros**

La investigación realizada en este TFM abre nuevas vías de estudio que pueden contribuir a mejorar la fiabilidad, aplicabilidad y alcance de los resultados. En este sentido, se proponen a continuación tres líneas de trabajo que pueden orientar desarrollos futuros.

En primer lugar, resulta fundamental la mejora del modelo numérico mediante su validación con ensayos experimentales de SPIF aplicados a diferentes geometrías. Hasta el momento, la validación se ha llevado a cabo a partir del ensayo de tracción, lo que permite verificar el comportamiento constitutivo del material, pero no asegura completamente la correspondencia del modelo con el proceso real. Por ello, la realización

de ensayos experimentales de conformado incremental sobre geometrías variadas, como pirámides, conos o piezas de doble curvatura, permitirá contrastar la predicción numérica con resultados físicos y, en consecuencia, aumentar la robustez y la aplicabilidad del modelo.

Una segunda línea de trabajo está vinculada a la realización de un modelado parametrizado y sistemático de diferentes casos de SPIF variando factores clave del proceso, tales como la profundidad máxima de la herramienta, el diámetro esférico, la velocidad de avance o el paso vertical entre pasadas. Este enfoque permitiría analizar de manera controlada la influencia de cada parámetro sobre la conformabilidad, las tensiones residuales y la precisión geométrica de las piezas obtenidas. Además, un estudio paramétrico amplio facilitaría la elaboración de mapas de procesado y de correlaciones útiles para el escalado industrial del conformado incremental de polímeros.

Por último, se plantea la ampliación de los conocimientos del conformado incremental en otros materiales poliméricos, más allá del policarbonato, permitiendo comparar de cómo afectan parámetros como la cristalinidad, la sensibilidad térmica o la tasa de endurecimiento a la respuesta bajo el proceso SPIF. Este enfoque resulta de gran interés, ya que cada familia polimérica presenta particularidades en términos de recuperación elástica, comportamiento viscoelástico y capacidad de alcanzar altos niveles de deformación sin fractura. Además, mediante la aplicación de modelos numéricos similares a los aquí desarrollados, sería posible estudiar los límites de conformabilidad de cada material y analizar si presentan un mejor ajuste a las geometrías objetivo. Con ello, se podrían sentar las bases para la selección óptima de materiales poliméricos en aplicaciones industriales concretas a través del conformado incremental.



## Capítulo VI

### Bibliografía

- Ambrogio, G., Filice, L., Gagliardi, F., & Manco, G. (2012). On the high-speed single point incremental forming of titanium alloys. *CIRP Annals*, 61(1), 243–246. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.078>
- Bagudanch, I., Centeno, G., & García-Romeu, M. L. (2018). Incremental Sheet Forming of Polymers: Process Parameters, Applications and Future Trends. *Polymer Testing*, 67, 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.026>
- Bagudanch, I., Centeno, G., Elías-Zúñiga, A., Garcia-Romeu, M. L., & Ciurana, J. (2016). Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.009>
- Bagudanch, I., Garcia-Romeu, M. L., Centeno, G., Elías-Zúñiga, A., & Ciurana, J. (2015). Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 221–229.
- Bambach, M., Taleb, A. B., & Hirt, G. (2009). Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming. *Production Engineering*, 3, 145–156.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.
- Behera, A. K., de Sousa, R. A., Ingarao, G., & Oleksik, V. (2017). Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, 37–62. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.014>
- Betsch, P., & Stein, E. (1995). An assumed strain approach avoiding artificial thickness straining for a non-linear 4-node shell element. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 11(11), 899–909. <https://doi.org/10.1002/cnm.1640111104>
- Duflou, J. R., Behera, A. K., Malhotra, R., & Cao, J. (2018). State of the art in incremental sheet forming. *International Journal of Material Forming*, 11(6), 743–773. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1421-7>
- Edwards, G. A., Nunes, R. D., & Silva, M. B. (2020). On the role of springback in polymer sheet incremental forming. *Materials*, 13(9), 928.
- Filice, L., Micari, F., & Fratini, L. (2002). Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP Annals*, 51(1), 199–202.

- Formisano, A., Durante, M., Boccarusso, L., & Astarita, A. (2017). The influence of thermal oxidation and tool-sheet contact conditions on the formability and the surface quality of incrementally formed Grade 1 titanium thin sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 3723–3732.
- Formisano, A., & Durante, M. (2024). A comprehensive review on the incremental sheet forming of polycarbonate. *Polymers*, 16, 3098. <https://doi.org/10.3390/polym>
- Franzen, V., Silva, M. B., & Martins, P. A. F. (2009). Single point incremental forming of PVC sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(1), 462–469.
- Gatea, S., Ou, H., & McCartney, G. (2017). Review on the recent applications and future potential of incremental sheet forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2439–2462.
- Goodwin, G. M. (1968). Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *SAE Technical Paper Series*, 680093.
- Göttmann, A., Diettrich, J., Bergweiler, G., Bambach, M., & Hirt, G. (2013). Investigation on polymeric materials for incremental sheet forming. *Key Engineering Materials*, 554–557, 1385–1393.
- Hagan, E., & Jeswiet, J. (2003). A review of single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(8), 213–224.
- Hale, S. (2017, 26 enero). Десять основных шагов расчёта динамических задач в явной постановке. Часть первая. *Soft Engineering Group*. Recuperado el 1 de septiembre de 2025, de <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/216-desyat-osnovnykh-shagov-rascheta-dinamicheskikh-zadach-v-yavnoj-postanovke-chast-pervaya.html>
- Hussain, G., Gao, L., & Hayat, N. (2007). Tool path generation strategy for single point incremental forming using spline curves. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5-6), 543–550. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0625-5>
- Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., & Allwood, J. (2005). Asymmetric incremental sheet forming (AISF). *CIRP Annals*, 54(2), 88–114. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60021-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3)
- Jurisevic, B., Kuzman, K., & Junkar, M. (2006). Water jetting technology: An alternative in incremental sheet metal forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31, 18–23.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2009). *Manufacturing engineering and technology*. Pearson.
- Kopac, J., & Kampus, Z. (2005). Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 622–628.
- López Fernández, J. A. (2021). Stretch and shrink flanging of AA2024-T3 sheet by single point incremental forming (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla, Sevilla.

- Marques, A. E., Franzen, V., Silva, M. B., & Martins, P. A. F. (2012). On the potential of single point incremental forming of polymers. *CIRP Annals*, 61(1), 251–254.
- Matsubara, S. (1994). Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical tool. *Journal of the JSTP*, 35, 1311–1316.
- McAnulty, T., Jeswiet, K., & Doolan, M. (2016). Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 43–54.
- Meier, H., Magnus, C., & Smukala, V. (2011). Impact of tool geometry on forces and surface quality in SPIF. *International Journal of Material Forming*, 4(2), 155–168.
- Montes Martos, J. M., Gómez Cuevas, F. P., & Cintas Físico, J. (2014). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (1.<sup>a</sup> ed.). Ediciones Paraninfo.
- Peng, H., Li, M., Liu, C., Fu, W., & Cao, J. (2014). Numerical simulation of multi-point forming accuracy for polycarbonate sheet. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 228, 87–96.
- Pereira Bastos, D., Bagudanch, I., & Garcia-Romeu, M. L. (2016). Influence of process parameters in SPIF of polymers. *Procedia Manufacturing*, 5, 870–879.
- Powell, N., & Andrew, C. (1992). Incremental forming of flanged sheet metal components without dedicated dies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 206, 41–47.
- Rosa-Sainz, A., Centeno, G., Silva, M. B., López-Fernández, J. A., Martínez-Donaire, A. J., & Vallelano, C. (2020). On the determination of forming limits in polycarbonate sheets. *Materials*, 13(9), 928. <https://doi.org/10.3390/ma13040928>
- Silva, M. B., Martins, P. A. F., & Franzen, V. (2010). Single point incremental forming of PVC: An experimental investigation. *Materials and Design*, 31(9), 4520–4526.
- Silva, M. B., Nielsen, P. S., Bay, N., Martins, P. A. F., & Alves, L. M. (2010). Failure mechanisms in single point incremental forming of polymers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 985–994.
- Surech, K., & Regalla, S. P. (2014). Effect of time scaling and mass scaling in numerical simulation of incremental forming. *Applied Mechanics and Materials*, 612, 105–110. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.612.105>
- Young, D., & Jeswiet, J. (2004). Forming parameters and tooling in single point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(12), 1453–1459.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (6th ed.). Elsevier.