

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Estudio numérico de estrategias de SPIF  
para el rebordeado de agujero  
de chapas de aluminio 7075-O

Autor: Mario Acera Mateos

Tutores: Domingo Morales Palma  
Marcos Borrego Puche

**Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio numérico de estrategias de SPIF para el  
rebordeado de agujero de chapas de aluminio  
7075-O

Autor:

Mario Acera Mateos

Tutor:

Domingo Morales Palma  
Profesor Contratado Doctor

Tutor:

Marcos Borrego Puche  
Profesor Sustituto Interino

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Estudio numérico de estrategias de SPIF para el rebordeado de agujero de chapas de aluminio 7075-O

Autor: Mario Acera Mateos

Tutores: Domingo Morales-Palma  
Marcos Borrego Puche

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



# AGRADECIMIENTOS

---

Agradecido a mis padres por su continua educación y cariño.

A mi hermano, por sus risas, enseñanzas y su manera de incentivar me en el mundo científico.

También a mi tutor Marcos Borrego Puche por no dudar a la hora de ofrecerme un trabajo de fin de grado y a mi otro tutor Domingo Morales Palma, por su dedicación, esfuerzo e inmediatez.



# RESUMEN

---

Con el auge de las nuevas tecnologías nuevos métodos de fabricación se han creado y su potencial está siendo estudiado con el objetivo de introducirlos en la industria, esto ocurre con el proceso de conformado incremental mono-punto, SPIF. En este documento se estudia el rebordeado de agujero en chapas de aluminio mediante SPIF, ya sea en una o varias etapas, repasando los documentos más notorios en este ámbito y se exponen las ventajas e inconvenientes de producir piezas mediante este método, así como las herramientas apropiadas para analizar el estado y validez de las piezas fabricadas.

EL estudio numérico se ha realizado con el software de elementos finitos Abaqus/CAE® 2017, tomando como especímenes diferentes piezas fabricadas por SPIF en trabajo anteriores. Los procesos originales de fabricación de estas piezas han sido simulados, analizados y validados. Todos los modelos se han generado mediante scripts en Python haciendo uso de herramientas que proporciona Abaqus Scripting. Esta metodología ha permitido automatizar la ejecución de los modelos y su análisis, así como reducir el tiempo de desarrollo.

En base a los primeros resultados obtenidos, se ha propuesto la fabricación de una forma cónica como la primera etapa para el rebordeado de agujero mediante SPIF. El estudio analiza la influencia del ángulo del cono y del radio del punzón en la conformabilidad de la chapa. Posteriormente se propone y analizan dos estrategias diferentes para el comienzo de la segunda etapa del proceso. Los resultados obtenidos proporcionan información muy valiosa para futuros trabajos sobre la optimización de procesos de SPIF multi-etapa.



# ABSTRACT

---

Due to the new technologies rise, novel fabrication methods have been created and the potential within them is being tested with the final goal of obtaining industrial profitability, which is happening with SPIF, single point incremental forming. In the following document, the hole-flanging process by single-stage and multi-stage SPIF on aluminium sheets is studied. Notorious papers on this field are reviewed and the advantages and disadvantages of manufacturing parts using this method are exposed as well as the proper tools to analyse the quality and validate the manufactured parts.

The numeric study has been carried out with the finite elements software Abaqus/CAE® 2017, taking as specimens different parts from previous works. The original fabrication processes for this parts have been simulated, analysed and validated. Every FEM has been generated via Python scripts, making use of the tool offered by Abaqus Scripting. This methodology helps on the automation of the models execution and analysis as well as reducing the model developing time.

Taking the results of the previous study as reference, a conic geometry is proposed as a first stage for a hole-flanging multi-stage operation by SPIF. The study analyses the influence of the conic flange inclination and the tool radius on the sheet formability. Subsequently two different strategies for the beginning of the second stage are proposed and analysed. The obtained results offer very valuable information for future research about the optimization of the SPIF multi-stage processes.



<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Notación</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>23</b>
1.1 Contexto	23
1.2 Objetivos	23
1.3 Estructura del documento	24
<b>2 Rebordeado de agujeros</b>	<b>25</b>
2.1 Procesos convencionales	25
2.2 Conformado de chapa mediante SPIF	28
2.3 Rebordeado de agujeros circulares por SPIF	31
2.3.1 Primeras estrategias multi-etapa	31
2.3.2 Proceso en una sola etapa	32
2.3.3 Proceso en dos etapas optimizado	36
<b>3 Modelado numérico del proceso</b>	<b>41</b>
3.1 Automatización con Abaqus Scripting	41
3.2 Creación del modelo	42
3.3 Definición de piezas	43
3.4 Definición del material	45
3.5 Mallado	45
3.6 Ensamblaje de piezas	46
3.7 Definición de "Steps"	47
3.8 Definición de los contactos	48
3.9 Condiciones de contorno	49
3.10 Definición de "Jobs"	51
3.11 Optimización mediante la opción "RESTART"	51
3.12 Extracción de resultados	53
<b>4 Verificación del modelo mediante resultados experimentales</b>	<b>57</b>
4.1 Caracterización del material	57
4.2 Ensayos experimentales empleados y adaptación del modelo	59
4.3 Comparación de resultados	61
4.3.1 Rebordeado de agujero de diámetro inicial 56 mm	61
4.3.2 Rebordeado de agujero de diámetro inicial 58 mm	63
4.3.3 Conformado de un cono de ángulo 64°	65
<b>5 Estudio de trayectorias cónicas</b>	<b>69</b>
5.1 Planteamiento del problema	69
5.2 Plan de simulaciones de conos con y sin agujero	70
5.3 Análisis de resultados	71
5.3.1 Conos de 45°	72

5.3.2	Conos de 50º	73
5.3.3	Conos de 55º	74
5.3.4	Conos de 60º	76
<b>6</b>	<b>Estudio preliminar de estrategias multi-etapa</b>	<b>79</b>
6.1	<i>Segunda etapa: Trayectoria helicoidal vs. Trayectoria espiral</i>	79
6.2	<i>Análisis de resultados</i>	80
<b>7</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>83</b>
7.1	<i>Conclusiones</i>	83
7.2	<i>Trabajos futuros</i>	83
	<b>Bibliografía</b>	<b>85</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1 Resultado experimentales con mayores HER en piezas sin fallos. Herramienta fija, sin rotación.  
Ensayos realizados en chapas de 1.6 mm de espesor. 35

Tabla 2.2 Resultado experimentales para diferentes ratios de doblado. Herramienta fija, sin rotación.  
Ensayos realizados en chapas de 1.6 mm de espesor. 36



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de un proceso simple de moldeo de chapa.	25
Figura 2.2 Proceso de rebordeado de agujero circular mediante estampación, pieza inicial y final junto al equipo necesario para la operación.	25
Figura 2.3 Sección del proceso de estampado (izquierda) y grafica para la comparación entre la fuerza aplicada en el proceso y la geometría del punzón usado (derecha).	26
Figura 2.4 Detalles de las piezas ensayadas analizar el efecto de la fuerza de sujeción.	26
Figura 2.5 Estampado convencional con planchado (derecha) y sin planchado (izquierda).	27
Figura 2.6 Diagrama de fallo según la ratio de apertura del agujero y el radio de acuerdo de los punzones.	28
Figura 2.7 Equipo y geometrías ensayadas (izquierda) y Diagrama de conformado límite adaptado (derecha).	29
Figura 2.8 Trayectorias básicas de la herramienta para procesos SPIF. Estrategia z-level o escalonada (izquierda) y estrategia helicoidal (derecha).	31
Figura 2.9 Estrategias multi-etapa para el rebordeado de agujeros circulares mediante SPIF (izquierda). Espesor a lo largo flanco del agujero rebordeado (derecha).	31
Figura 2.10 Esquema axisimétrico de operaciones SPIF con ángulo de flanco inclinado (a) y con flanco con rebordeado circular(b).	33
Figura 2.11 Esquema del flanco del agujero durante el proceso de deformación, donde las distintas zonas se encuentran diferenciadas por A, B, C, D. Análisis diferencial de esfuerzos en la zona del material que aún no ha entrado en contacto con la herramienta donde se representan el meridional o radial y el esfuerzo circunferencial, $\sigma_\varphi$ y $\sigma_\theta$ respectivamente y los cuales se pueden identificar con $\sigma_2$ y $\sigma_1$ .	33
Figura 2.12 Sección y distribución de espesores de la pared del agujero de una pieza sin fallos(a); Sección de una pared del agujero cuando se produce el fallo, con superficie punteada previamente al ensayo para mostrar las deformaciones sufrida en la superficie exterior (b); Instante y zona crítica del proceso(c).	34
Figura 2.13 Sección transversal de ensayos con distintos tipos de radios de herramientas esféricas que alcanzaron el fallo.	35
Figura 2.14 Se muestran las primeras etapas para las estrategias en dos etapas. (a) Estrategia de dos etapas propuesta por Cui y Gao. (b) Estrategia propuesta por Morales-Palma en [5]. (c) Prototipo de propuesta, sección parametrizada mediante 3 valores, (d) Estrategia final propuesta [6].	37
Figura 2.15 Trayectorias introducidas en el programa de EF para reproducir un proceso SPIF de rebordeado de agujero en dos etapas siguiendo la estrategia Fig. 2.14 (d).	37
Figura 2.16 Distribución de espesores de las piezas simuladas en rebordeado de agujeros mediante SPIF en dos etapas y comparación con la operación realizada en una etapa.	38
Figura 2.17 Resultados experimentales y numéricos para rebordeado de agujero circular mediante SPIF en una y dos etapas.	39
Figura 3.1 Extracto del archivo de variables.py de 'Abaqus scripting', creación de variables con la información de los directorios para introducción y extracción de información del modelo.	42
Figura 3.2 Extracto del archivo de 'Abaqus scripting' generado por Domingo, comando para la generación del modelo con el nombre registrado en las variables 'abaqus_name'.	42
Figura 3.3 Comando para la generación del modelo 'HF-SPIF-1stage'.	43
Figura 3.4 Piezas del MEF.	43

Figura 3.5 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la generación de la chapa.	44
Figura 3.6 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del material y sección y asignación de esta.	45
Figura 3.7 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente al mallado de la chapa.	46
Figura 3.8 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente al ensamblaje de las piezas en el modelo.	46
Figura 3.9 Imagen del visor de Abaqus, se muestran las distintas partes ensambladas, la herramienta situada en la posición inicial.	47
Figura 3.10 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del ‘Step’.	48
Figura 3.11 Definición de los tipos de superficies (Master-Slave) en la interacción en la interfaz de Abaqus.	49
Figura 3.12 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la definición de las diferentes superficies y las condiciones de contacto entre éstas.	49
Figura 3.13 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la definición de las condiciones de contorno.	50
Figure 3.14 Condiciones de contorno visualizadas en la interfaz de Abaqus.	50
Figura 3.15 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la asignación de trayectorias a la herramienta.	51
Figura 3.16 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del ‘Job’.	51
Figura 3.17 Extracto de archivo model_2.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del ‘Job’.	52
Figura 3.18 Extracto de archivo model_2.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del ‘Job’.	52
Figura 3.19 Extracto de archivo model_2.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación de las trayectorias para la segunda etapa.	53
Figura 3.20 Extracto de archivo results.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la apertura del archivo del cual se quiere obtener información y a la toma de imágenes.	54
Figura 3.21 Comandos para el archivo results.py de ‘Abaqus scripting’, código referente a la extracción de información según el instante temporal.	55
Figura 4.1 Gráfica tensión-deformación con los resultados de los tres ensayos realizados para generar la ley de comportamiento para AA7075-O.	57
Figura 4.2 Disposición del ensayo de laboratorio para realizar ensayos de Nakazima y generar la información (izquierda). Distintas geometrías ensayadas en los ensayos de Nakazima para generar distintas situaciones tensionales (derecha).	58
Figura 4.3 Diagrama de conformado límite (FLD) para AA7075-O.	59
Figura 4.4 Imagen de la disposición en el ensayo de laboratorio con el agujero ya rebordeado (derecha). Esquema de la trayectoria y la pieza final (izquierda).	60
Figura 4.5 Simulación y generación de trayectoria para el ensayo de laboratorio mediante CATIA para rebordeado cónico mediante SPIF.	60
Figura 4.6 Imágenes de operaciones fallidas de rebordeado de agujeros circulares mediante SPIF en una	

sola etapa. Ensayo de laboratorio (derecha). Simulación mediante EF, se encuentra representado el campo de espesores de la pieza, donde el color azul representa un adelgazamiento excesivo (0.4 mm aprox.), punto donde se desarrolla la inestabilidad en la resolución.	61
Figura 4.7 (a) Imagen del visor de Abaqus del ensayo numérico fallido de reboreado de agujero circular de agujero inicial de 56 mm de diámetro, donde se representan, en la posición indeformada, los puntos de la pieza analizados. (b) Representación del estado de deformación del material en los puntos analizados mediante el uso del Diagrama de Conformado Límite (FLD).	62
Figura 4.8 Comparación de las fuerzas, obtenidas experimental y numéricamente, que intervienen en el proceso de reboreado de agujero circular mediante SPIF en una etapa para un agujero inicial de 56 mm de diámetro. Dos tipos de filtros para la fuerza son mostrados.	63
Figura 4.9 (a) Imagen del visor de Abaqus del ensayo numérico satisfactorio de reboreado de agujero circular de agujero inicial de 56 mm de diámetro, donde se representan, en la posición indeformada, los puntos de la pieza analizados. (b) Representación del estado de deformación del material en los puntos analizados mediante el uso del Diagrama de Conformado Límite (FLD).	64
Figura 4.10 Comparación de las fuerzas, obtenidas experimental y numéricamente, que intervienen en el proceso de reboreado de agujero circular mediante SPIF en una etapa para un agujero inicial de 58 mm de diámetro. Dos tipos de filtros para la son mostrados.	64
Figura 4.11 Imagen del modelado en Catia y la trayectoria generada para el ensayo de laboratorio.	65
Figura 4.12(a) Imagen generada por el software ARGUS donde se muestran las deformaciones ingenieriles. (b) Imagen del visor de Abaqus donde se muestran las deformaciones en la dirección principal.	66
Figura 4.13 Deformaciones a lo largo del flanco en la operación de reboreado cónico a 64° mediante SPIF. Resultados experimental y numérico.	66
Figura 5.1 Diagramas de conformado límite (FLD) para ensayos experimentales de reboreado de SPIF en una etapa, se representan los casos límite.	69
Figura 5.2 Imagen de los modelos con y sin agujero al inicio de la operación.	70
Figura 5.3 Esquema explicativo del aumento del radio inicial de la trayectoria de la herramienta en trayectorias cónicas	70
Figura 5.4 Imagen de los modelos con pendiente de 45° con y sin agujero solucionados, se muestra el campo de deformaciones en la dirección principal en ambos modelos.	71
Figura 5.5 Distribución de espesores para reboreados cónicos a 45° mediante SPIF.	72
Figura 5.6 Diagramas de conformado límite para reboreados cónicos a 45° mediante SPIF.	73
Figura 5.7 Distribución de espesores para reboreados cónicos a 50° mediante SPIF.	74
Figura 5.8 Diagramas de conformado límite para reboreados cónicos a 50° mediante SPIF.	74
Figura 5.9 Distribución de espesores para reboreados cónicos a 55° mediante SPIF.	75
Figura 5.10 Diagramas de conformado límite para reboreados cónicos a 55° mediante SPIF.	75
Figura 5.11 Distribución de espesores para reboreados cónicos a 60° mediante SPIF.	76
Figura 5.12 Diagramas de conformado límite para reboreados cónicos a 60° mediante SPIF.	77
Figura 6.1 Trayectorias del punto de referencia de la herramienta seguidas en la segunda etapa del reboreado de agujeros por SPIF.	79
Figura 6.2 Imágenes del modelo en el que se ha seguido una trayectoria helicoidal. (a) Instante previo al inicio de la inestabilidad, H=10 mm. (b) Primera parte de la segunda etapa completada, H=15 mm.	80
Figura 6.3 Imagen del modelo resuelto siguiendo la trayectoria en espiral.	80
Figura 6.4 Resultados de la segunda etapa siguiendo la primera estrategia propuesta para reboreado de	

agujeros mediante SPIF.

81

Figura 6.5 Resultados de la segunda etapa siguiendo la segunda estrategia propuesta para rebordeado de agujeros mediante SPIF.

81

# Notación

---

FLD	<i>Forming Limit Diagram</i> (diagrama límite de conformado)
FFL	<i>Fracture Forming Limit</i> (límite de conformado por fractura)
FLC	<i>Forming Limit Curve</i> (curva límite de conformado)
HER	<i>Hole Expansion Ratio</i> (ratio de expansión de agujero)
LFR	<i>Limit Forming Ratio</i> (ratio de conformado límite)
SPIF	<i>Single-point Incremental Forming</i> (conformado incremental mono-punto)
EF	Elementos finitos
MEF	Modelos de elementos finitos
CNC	Control Numérico por Computador



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Contexto

En el campo de la ingeniería de fabricación siempre se busca optimizar la rentabilidad industrial de los procesos, esto se consigue alcanzando un equilibrio entre tiempo dedicado, teniendo en cuenta tanto la preparación como la realización del proceso, y beneficio global del lote fabricado. Además, estos aspectos se ven altamente influenciados por el destino del proceso estudiado, si está orientado a las producciones de grandes lotes o a la fabricación de diversas piezas con características parecidas, pero de las cuales no se requiere un número elevado de unidades.

Convencionalmente en la industria el rebordecado de agujeros se ha efectuado mediante estampación, donde una chapa con un agujero previamente mecanizado es fijada por los bordes exteriores y es doblada y estirada circunferencialmente (formando así la pestaña del agujero rebordecado) por la acción de un punzón contra una matriz que le da la forma final. Este proceso se adecua a la producción de grandes lotes de la misma pieza, pues la realización de punzones y matrices impone serias limitaciones en cuanto a la flexibilidad del proceso, pues conllevan serias inversiones en tiempo y dinero.

En este contexto, el presente trabajo estudia un método innovador de conformado de chapa, aplicado concretamente al rebordecado de agujeros. El método se denomina conformado incremental de chapa en su variante mono-punto, conocido por sus siglas en inglés: SPIF, *single-point incremental forming*. El proceso se basa en deformar localmente una chapa de forma plástica siguiendo una trayectoria definida en una máquina CNC hasta conseguir la forma final deseada.

A pesar de la clara ventaja en cuanto a flexibilidad, debido a la naturaleza incremental del proceso, se pueden esperar unos tiempos de fabricación mayores que en los métodos convencionales, por tanto, sería un proceso idóneo para lotes de piezas bajos o medios, dando lugar a unos precios competentes en el mercado.

A bote pronto, según qué aplicación, se observa que en términos económicos el proceso que nos ocupa puede ser bastante favorable, pero más allá de esto, el conformado incremental da lugar a nuevos horizontes tecnológicos, aumentando la capacidad de conformado plástico del material y permite estudiar el comportamiento del material a lo largo del proceso de manera más precisa. Sin embargo, como se verá a lo largo del desarrollo de este trabajo, conseguir uniformidad en las piezas no es sencillo sin hacer un sacrificio en tiempo de fabricación, lo que repercute en la viabilidad del proceso.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el estudio numérico del rebordecado de agujero por SPIF mediante el método de los Elementos Finitos. Para ello se ha utilizado el software comercial Abaqus/CAE 2017. Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

- Revisión bibliográfica de los trabajos de investigación dedicados al rebordecado por SPIF, en particular los publicados por los directores de este trabajo.
- Calibración y verificación de los modelos de EF (MEF), realizados en trabajos anteriores para el estudio del rebordecado de agujeros por SPIF, con los correspondientes ensayos experimentales.
- Desarrollo de scripts en Python mediante "Abaqus scripting" para la automatización de las tareas de generación de modelos y obtención de resultados para su análisis posterior. Estos scripts serán especialmente útiles para el estudio de la influencia de parámetros geométricos de la pieza a fabricar o del proceso, como el radio del punzón.
- Análisis mediante los MEF obtenidos de diversas estrategias multi-etapa para la optimización del proceso de rebordecado de agujero desde el punto de vista de la homogeneización de las deformaciones inducidas en el material.

### **1.3 Estructura del documento**

Para comprender la necesidad y las ventajas e inconvenientes del proceso de rebordeado de agujeros mediante SPIF, el capítulo 2 representa los procesos de rebordeado de agujeros que predominan en la industria, para ser consciente del potencial y las debilidades del innovador proceso que ocupa este proyecto, así como también se repasarán los principales factores que influyen en el conformado incremental de forma general. El capítulo se completa con la revisión bibliográfica de los trabajos de investigación dedicados al rebordeado de agujero por SPIF.

El capítulo 3 presenta con detalle el trabajo realizado con el software de elementos finitos, tanto la generación de los modelos como la gestión y obtención de resultados.

El capítulo 4 expone la verificación de los modelos de elementos finitos con piezas cónicas y chapas con agujeros rebordeados de aluminio 7075-O fabricadas en trabajos anteriores.

El capítulo 5 analiza numéricamente la capacidad para generar geometrías cónicas y las propiedades de estas mediante un programa de EF, proponiendo estas geometrías como la primera etapa de un proceso de rebordeado de agujero circular multi-etapa. Además, se propondrán dos estrategias para una segunda etapa y se realizará un estudio preliminar de estas.

En el capítulo 6 se proponen dos estrategias diferentes para el comienzo de una segunda etapa de SPIF y se realiza un estudio de conformabilidad del material para comparar ambas estrategias.

Por último, el capítulo 7 presenta las principales conclusiones de este trabajo y posibles desarrollos futuros.

# 2 REBORDEADO DE AGUJEROS

## 2.1 Procesos convencionales

Tradicionalmente los conformados de chapa se realizan mediante la fijación a compresión de las láminas, normalmente metálicas, en una matriz, para que sean dobladas mediante la acción de un punzón, que posee la forma deseada para cada aplicación, en un solo movimiento de éste, Fig. 2.1 [27], de tal forma que la chapa se adapta a la forma del punzón y de la matriz.

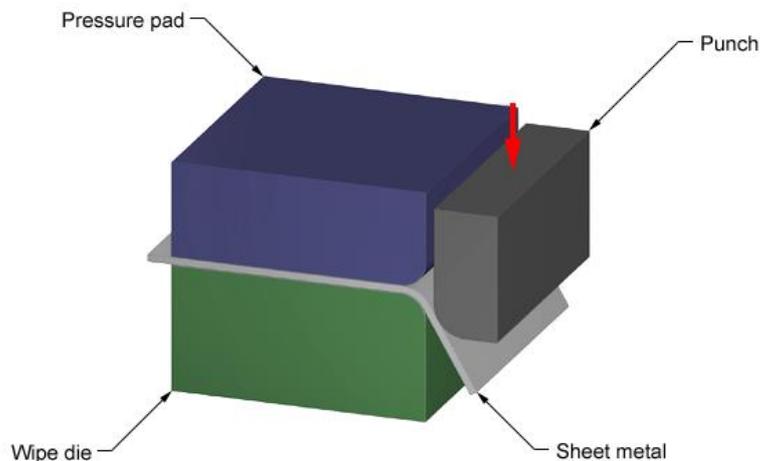


Figura 2.1 Esquema de un proceso simple de moldeado de chapa.

Las operaciones de rebordeado de agujeros se pueden llevar a cabo para la fabricación de geometrías diversas, ya sea para reforzar el borde del agujero o para proporcionar una sujeción adicional en las uniones de tubos. Este trabajo en concreto, se centrará en el estudio de rebordeado de agujeros circulares. Para este caso, si se realizara el rebordeado mediante estampado, el equipo tendría la siguiente apariencia Fig. 2.2 [7].

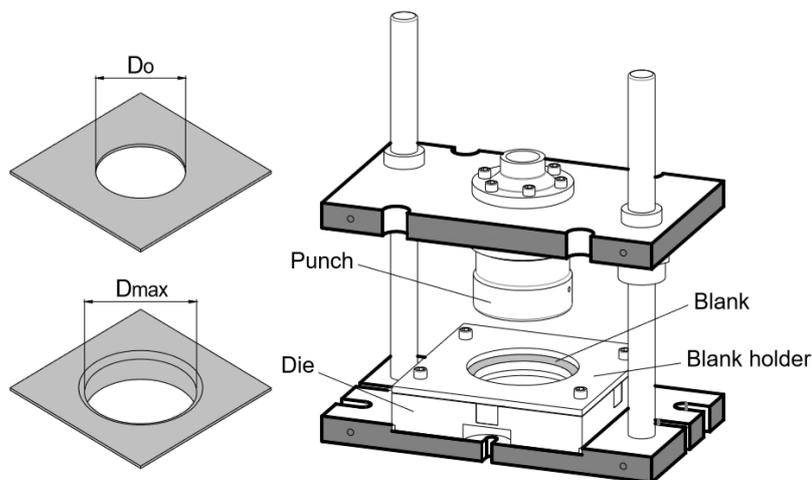


Figura 2.2 Proceso de rebordeado de agujero circular mediante estampación, pieza inicial y final junto al equipo necesario para la operación.

Como se propone en [4] podemos clasificar en dos categorías los parámetros que caracterizan este proceso, parámetros del material y parámetros geométricos. En cuanto al material se trata, gracias a la ley de

endurecimiento por deformación  $\bar{\sigma} = Y + c\bar{\epsilon}^n$ , se puede conocer o predecir la fuerza necesaria que se debe aplicar así como la fuerza máxima que se requerirá en el proceso. Yamada [8] demostró además la relación existente entre el valor de los esfuerzos circunferenciales dados en la pared del agujero y las constantes que definen la ley de endurecimiento, que aumenta con  $n$  y decrece con  $Y$ .

En cuanto a factores geométricos, Tang [9] analizó la influencia de la forma del punzón, la cual es bastante relevante a la hora producir la deformación, esto queda reflejado en las fuerzas que habría que aplicar según el tipo de punzón manteniendo constantes todos lo demás parámetros del proceso, Fig. 2.3 [9]. El hecho de que la fuerza a aplicar tenga que ser mayor repercutirá en la capacidad de deformación del material en dicho proceso concreto, promoviendo un fallo prematuro por deformaciones locales y aparición de cuellos.

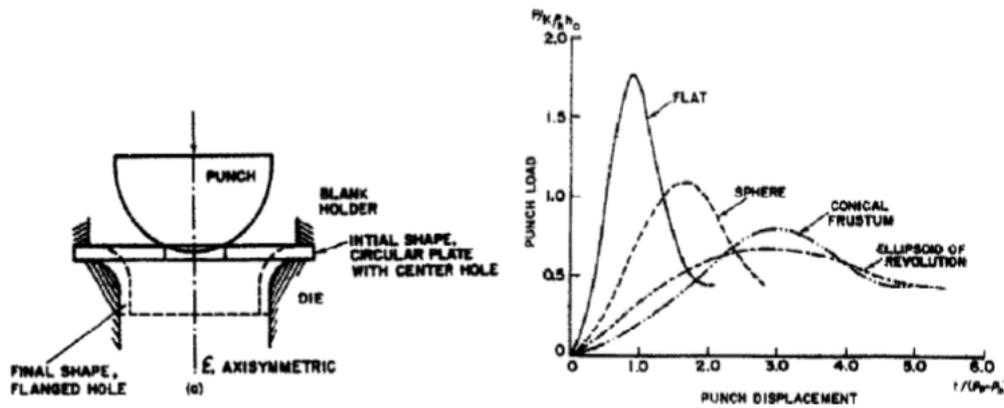


Figura 2.3 Sección del proceso de estampado (izquierda) y grafica para la comparación entre la fuerza aplicada en el proceso y la geometría del punzón usado (derecha).

Otro factor que se debe tener en cuenta a la hora de realizar estampaciones de este tipo es la fuerza de fijación que se emplea en la lámina a deformar, si esta no es suficiente, superior a la fuerza de reacción que se produce conforme el punzón comienza a deformar la chapa, la zona de sujeción sufrirá un arqueado leve como determino Krichen [10], imagen superior de la Fig. 2.4 [10].

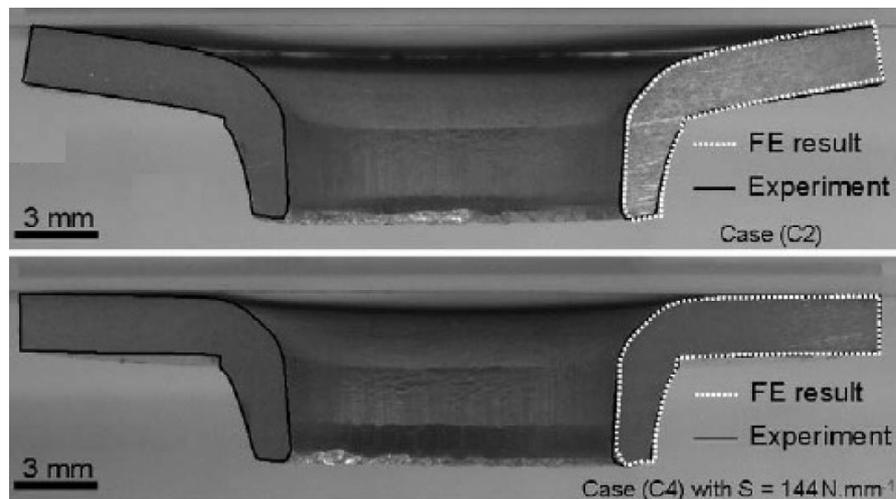


Figura 2.4 Detalles de las piezas ensayadas analizar el efecto de la fuerza de sujeción.

Más allá de los factores vistos previamente, que marcan las fuerzas que deben intervenir en el proceso, un aspecto geométrico con una elevada repercusión en este proceso es la ratio holgura-espesor. De esto depende en gran medida que la pieza final sea competitiva en el mercado, pues define las características finales que va a tener la pared del agujero, como el grado de deformación del material y la uniformidad de la pared. Llamamos holgura al espacio entre la matriz y el punzón y la ratio se obtiene dividiendo la holgura entre el espesor de la lámina a deformar. Esta ratio debe ser menor a la unidad para que se produzca el efecto de planchado, representado en la Fig. 2.5 [11], lo que significa que hay continuo contacto entre punzón, chapa y matriz. Controlando esta ratio, teniendo en cuenta la existencia de una ratio crítica, Kacem [11], concluyó que se puede controlar, la longitud

final de la pared del agujero, el adelgazamiento sufrido en la pared, así como la fuerza máxima del proceso, haciendo de este proceso uno fiable donde se puede asegurar la validez ingenieril de la pieza. Incluso en estudios posteriores [12], declaró que el efecto de planchado evita la aparición de grietas y pospone el fallo gracias a los esfuerzos de compresión que se sufren en la pared, las grietas y huecos tienden a cerrarse.

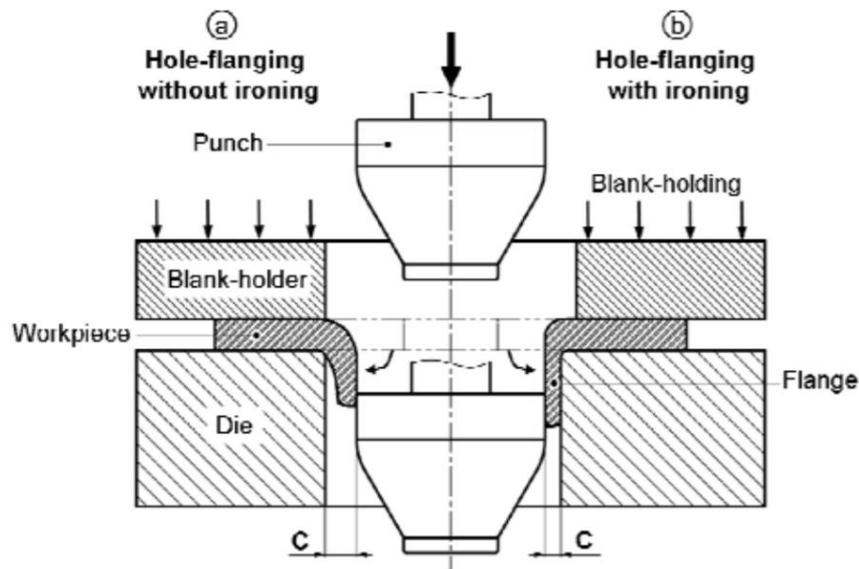


Figura 2.5 Estampado convencional con planchado (derecha) y sin planchado (izquierda).

Hasta ahora se ha hablado de aspectos que conciernen únicamente al proceso de estampación, ahora se revisarán parámetros que conciernen también a procesos incrementales pues estudian la capacidad de deformación plástica del material que se consigue en el proceso.

Como se comentó en la introducción, el rebordeado de agujeros se basaba en doblar y estirar circunferencialmente una chapa con un agujero previamente mecanizado, evidentemente el agujero previo tendrá unas dimensiones menores al agujero rebordeado final, como está esquematizado en la Fig. 2.2. En general y como parece lógico en este tipo de prácticas, para un mismo tamaño de agujero rebordeado (mismo tamaño de punzón en procesos de estampación) cuanto menor sea el agujero previo mayor será la longitud del flanco rebordeado, a pesar de que influyen otros factores en la longitud final de la pared, como el planchado, pero manteniendo las demás características del proceso constantes la afirmación anterior es cierta.

Sin embargo, aumentar en gran medida la longitud de la pared rebordeada no es sencillo, pues minimizar el agujero previo maximiza la posibilidad de fallo. En estampación, como Huang investigó [13], también haciendo uso de herramientas numéricas, al reducir las dimensiones del agujero previo, la excesiva reducción del espesor, que llegaba a su máximo en la periferia del agujero rebordeado, llegaba a producir el fallo de las piezas. Más allá de esto, el autor quiso medir la capacidad de deformación plástica que el proceso ofrecía y comenzó a usar el término de LFR (Limit Forming Ratio), Ratio de Conformado Limite, el cual hace alusión al máximo ratio de expansión del agujero que se puede lograr sin que se produzcan fallos en la pieza. La ratio de expansión del agujero vendría dada por el diámetro final, o diámetro del punzón, dividido entre el diámetro inicial o diámetro del agujero inicial.

$$LFR = HER_{max} = \frac{D_{f,max}}{D_{o,min}} \quad (2.1)$$

Los autores demostraron que el parámetro LFR no depende del diámetro del punzón, sin embargo, la forma si tiene una repercusión notable sobre el LFR, es decir, sobre la capacidad de deformar plásticamente la lámina en el proceso, así como la fuerza máxima que se alcanzara también está influenciada por la forma del punzón.

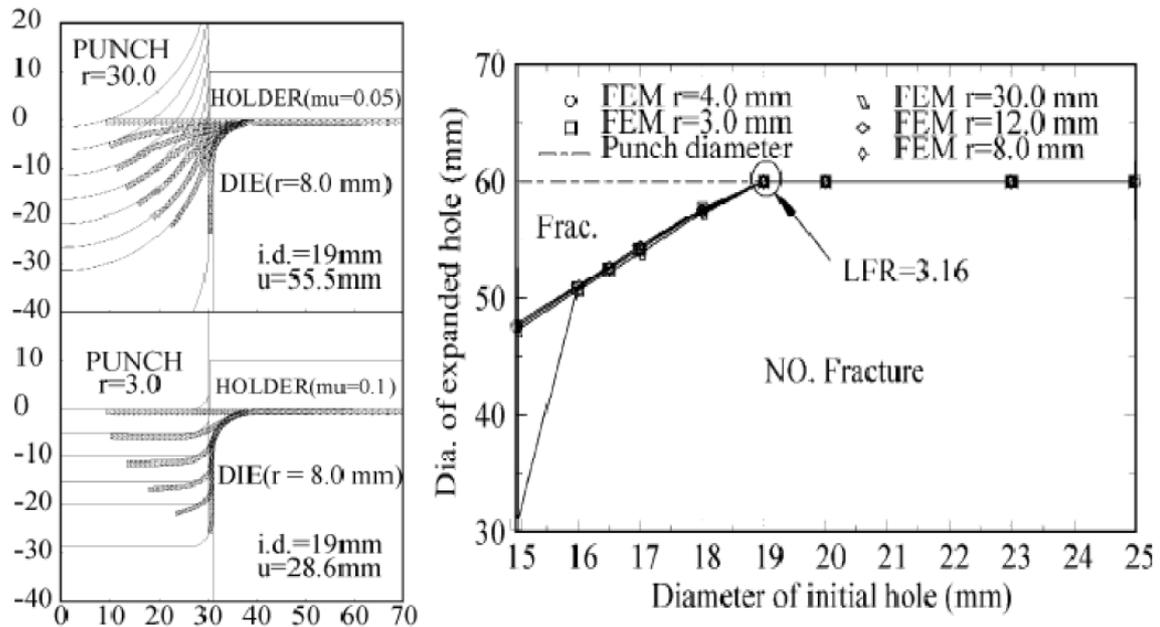


Figura 2.6 Diagrama de fallo según la ratio de apertura del agujero y el radio de acuerdo de los punzones.

Una vez llegados a este punto, donde se tienen unas nociones básicas de los procesos convencionales para la elaboración de rebordecados de agujeros, en concreto agujeros circulares, se va a introducir la técnica de conformado incremental mono punto. Resulta importante comentar algunas características del estampado clásico, pues se va a estudiar una técnica relativamente novedosa que podría relevar al estampado para según qué aplicaciones y de este modo se podrá comparar y tener en cuenta las ventajas y desventajas de este proceso novel.

## 2.2 Conformado de chapa mediante SPIF

Este proceso, internacionalmente denominado como SPIF (single point incremental forming) (conformado incremental mono-punto), tiene numerosas aplicaciones pues al basarse en la deformación local de la chapa, las características finales de la pieza, tanto geométricas como técnicas, vendrán influenciadas en gran medida por la estrategia definida para la trayectoria de la herramienta, adicionalmente también influirán las condiciones del ensayo, como fricción, velocidad de deformación y geometría de la herramienta. El rebordecado de agujeros es tan solo una aplicación más de esta técnica, teniendo múltiples vertientes gracias a la ya nombrada flexibilidad en la fabricación que ofrece este proceso, llegando a ser muy útil por ejemplo en la fabricación de elementos biomédicos como placas craneales [14].

Aparte de la flexibilidad que posee este proceso, uno de los puntos más fuertes de esta técnica de conformado de chapa por SPIF tecnológicamente hablando es el aumento en la capacidad de deformación plástica sin que el ejemplar sea dañado o capacidad de conformado plástico (Formability). Normalmente esta característica se ha estudiado mediante el FLD (Forming limit diagram), Diagrama de conformado límite puede llamarse. El FLD para conformado de láminas metálicas muestra en el eje de abscisas la deformación en la segunda dirección principal en el plano y en el eje de ordenadas la deformación sufrida en la dirección principal en el plano, de esta forma puede ubicarse dentro del diagrama cualquier estado tensional, pues en la chapa la tercera dirección principal suele encontrarse a lo largo del espesor. Adicionalmente pueden ubicarse en el diagrama ciertas curvas que dividan el espacio tensional, como la curva FLC (Forming limit curve), curva de conformado límite, la cual marca la frontera entre las zonas de deformación estable e inestable, donde comenzaría la formación de cuellos que llevarían la pieza al fallo y otra de las curvas que define el FLD es la FFL (Fracture forming limit), la cual divide el espacio de deformaciones entre zona sin grietas, segura y zona donde los estados de tensión, en concreto por modo I de fallo, darían lugar a grietas en la pieza. Para estampados convencionales donde las fuerzas se aplican sobre toda la zona a deformar, cruzar la FLC provoca la formación de cuellos lo que lleva a un estado de deformación inestable que rápidamente acabará cruzando la FFL y por tanto el fallo se habrá producido. Para adaptar completamente el diagrama al proceso SPIF, Isik [15], determinó una tercera curva la cual determina el fallo de la pieza por esfuerzos cortantes, modo II y la cual denominó Shear-FFL (Límite de conformado por fractura por tensiones de cizalladura).

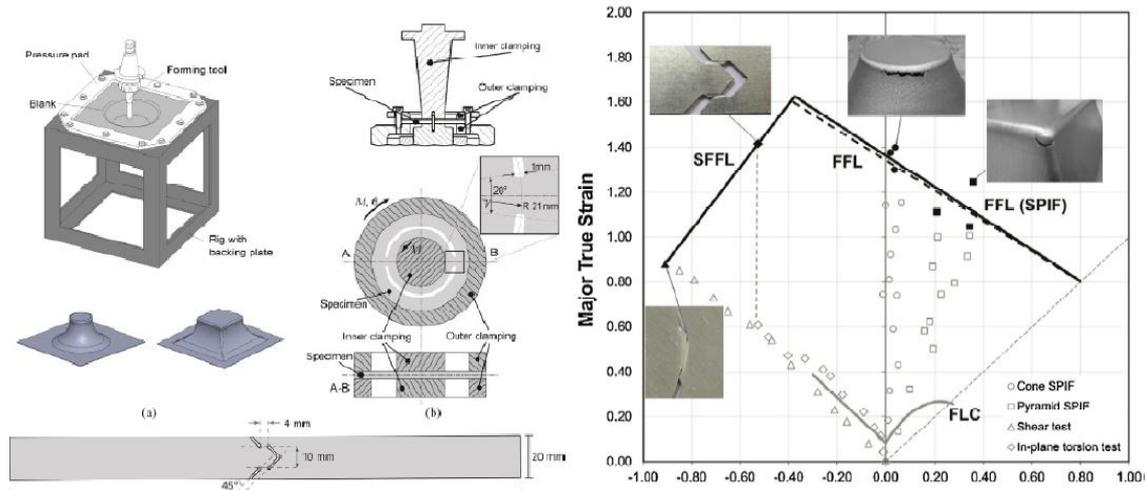


Figura 2.7 Equipo y geometrías ensayadas (izquierda) y Diagrama de conformado límite adaptado (derecha).

Este proceso, como hasta ahora ya se ha comentado varias veces en este documento, ofrece un aumento en la capacidad de deformación plástica, lo cual supone nuevos horizontes tecnológicos y numerosos autores han investigado el porqué de este fenómeno, intentando dar con los factores que lo producen.

Silva [16], intentó arrojar luz sobre este tema llevando a cabo un estudio de la influencia del radio de la herramienta en la generación de la estricción del material en el proceso. Concluyó con que el uso de radios de herramienta elevados generaba un aumento en la FLC respecto a la utilizada en estampación, es decir, permitía que el material estuviera sometido a mayores estados de tensión sin entrar en un estado de deformación inestable, además se localizaba de forma fiable la zona donde se producirá el fallo por la aparición de la estricción. Y en el caso de radios de herramienta pequeños, no se llega a producir esta zona de adelgazamiento excesivo donde se concentran las deformaciones, por tanto, no se puede predecir el lugar de rotura y el fallo llega a producirse por fractura dúctil sin que aparezcan estricciones.

En estudios posteriores otros autores llegaron más allá en el estudio del aumento de en la capacidad de deformación plástica que este proceso ofrece, y fue Centeno [17] el que afirmó dicho aumento, resultado de la evasión de estricciones o su formación retardada en cuanto a los métodos tradicionales, viene controlado por un extenso rango de variables intrínsecas al proceso más allá del radio de la herramienta, como el paso de la herramienta en la máquina CNC o las condiciones de fricción.

Por otro lado, en estampación, se observó cierta relación entre la capacidad de deformado plástico y algunas propiedades del material. Fratini [18] decidió investigar la influencia de estas propiedades llevando a cabo una serie de ensayos y estudiando la evolución de las curvas FLC y FFL bajo condiciones de deformación plana. Concluyó que, para operaciones de prensado, los parámetros más influyentes del material eran el coeficiente de endurecimiento por deformación y la anisotropía normal, sin embargo, en procesos de conformado incremental el coeficiente de endurecimiento por deformación tiene el mayor impacto si se habla de la capacidad de deformar el material plásticamente durante el proceso. Haciendo un análisis de estos resultados, Borrego [4] explica que, puesto que los procesos de SPIF se basan en el estiramiento y reducción del espesor de forma local, que la capacidad de deformación plástica aumente al aumentar el coeficiente de endurecimiento está en concordancia con el hecho de que este coeficiente indique de una manera indirecta la capacidad del material de soportar estiramientos (adelgazamientos) sin sufrir colapso plástico.

Más allá de las propiedades del material, varios autores, como Hussain [20] y Silva [22] realizaron experimentos para probar la influencia del espesor de la lámina metálica a deformar en el proceso, concluyeron que el espesor claramente influía en la capacidad de deformación plástica mediante la repercusión de éste sobre el fenómeno de anisotropía.

En investigaciones posteriores, Hussain [21], llega más lejos aún y determina que existe una relación entre el espesor y el tamaño de la herramienta para encontrar el punto óptimo de capacidad de deformado plástico en el proceso, es decir, dado un espesor, se debe encontrar el radio preciso que nos permita mayor capacidad de deformado plástico. En el caso de que el espesor tenga un valor elevado en comparación con el radio de la

herramienta puede desembocar en fallo debido al enclavamiento de la herramienta en la pieza.

Como refleja Borrego en [4], se sabe y se ha comentado anteriormente, que, debido a la naturaleza incremental del proceso, las tasas de producción que pueden lograrse son bajas, pero esta no es la única repercusión del proceso incremental. Otras consecuencias de conformar las piezas mediante deformaciones locales son la calidad superficial de la pieza final, la cual se ve claramente penalizada, así como la alta dependencia entre la capacidad de deformado plástico del proceso y las condiciones de fricción que en este se dan. Por supuesto las condiciones de fricción están ligadas a varios aspectos del proceso como la forma y tamaño de la herramienta, las condiciones impuestas a la máquina CNC, así como, evidentemente, la lubricación.

A pesar de que en este estudio y modelos de EF se utilizará la forma de herramienta más básica, hemisférica (forma de hemisferio o media esfera) y fija, sin rotación, debe saberse que una disminución en el radio (o superficie de contacto) aumentará la capacidad de deformado plástico, sin embargo, rebajará la calidad de la superficie final, como afirmó Cawley [23]. La superficie de contacto se controlará con el tamaño de la herramienta más que con su forma y más adelante se estudiará con detalle cómo se lleva a cabo la deformación local de la lámina.

Lu [25] se centró en analizar el acabado superficial, sacando conclusiones como que la calidad de la superficie después de pasar por un proceso SPIF siempre empeoraba, especialmente si se usan herramientas rígidas y no con rodamientos para que la cabeza de la herramienta ruede sin deslizar. Además, también declaró que los esfuerzos cortantes que se producen a lo largo del espesor son producto de las condiciones de fricción del experimento.

En cuanto al tamaño de la herramienta, hay que volver a remitirse a Hussain [21], el cual enunciaba que la elección del tamaño de la herramienta debía hacerse en consonancia con el espesor de la lámina metálica, pues a pesar del aumento en la capacidad de deformación que proporciona una herramienta de pequeño tamaño, gracias a la predominancia de efectos de doblado sobre estirado, la elección de una herramienta de pequeño radio unida a un espesor notable puede desembocar en un fallo prematuro debido a la incrustación de la herramienta en el metal.

Por último y a pesar de haber dicho ya que solo se tendrá en cuenta en este trabajo herramientas fijas, el efecto que la rotación de la herramienta produce en la pieza resultante van a ser comentados. En general la rotación de la herramienta repercute en un mejor acabado superficial y aumenta la generación de calor en el proceso, y también reduce las fuerzas del proceso, todo esto en dependencia de la velocidad de rotación.

Es interesante saber que autores como Xu [24] trabajaron en cabezales de herramientas texturizadas mediante laser para crear una serie de micro-canales intermitentes y que actúen como reservorio de refrigeración. Con esto se evita uno de los principales problemas del uso de altas velocidades de rotación y es la recristalización del material al alcanzar temperaturas elevadas, lo cual puede producir una variación en las características mecánicas de la pieza final. De tal forma, aunque esta variable del proceso no se vaya a tener en cuenta, sí que se debe ser conscientes de que existen posibilidades de mejora.

Para finalizar este apartado, se hablará de la influencia de los distintos parámetros que se fijan en la máquina CNC a utilizar en procesos SPIF.

**Avance:** Este parámetro afecta principalmente a las condiciones de fricción, degradando el efecto de la lubricación y por tanto afecta a la calidad superficial final. Esto se volverá relevante para velocidades de avance altas, de otra forma es un parámetro con poca relevancia tecnológica para el proceso.

**Profundidad de corte:** Según Borrego [4], se encuentran distintas versiones sobre el efecto de la profundidad de pasada en la literatura, de hecho, se contradicen en cuanto al efecto sobre la capacidad de deformado plástico en el proceso. Sin embargo, todos coinciden en que la fuerza necesaria es directamente proporcional a la profundidad de corte, por lo tanto, este parámetro estará limitado por la máxima fuerza alcanzable por la máquina CNC.

**Trayectoria de la herramienta:** La estrategia más típica seguida en máquinas CNC es la estrategia de ‘altura-z’, es decir contornear a una cierta altura constante y cuando se ha realizado un ciclo completo (360°) se baja al siguiente nivel para repetir la operación, esta estrategia sería la reflejada en la parte izquierda de la Fig. 2.8. Siguiendo esta trayectoria se aumentan las probabilidades de fallo en los puntos donde se realiza la bajada [3], pudiendo darse la incrustación de la herramienta o la rotura de la pieza. Para evitar el problema de la estrategia anterior se suele utilizar un recorrido helicoidal, como el mostrado en la derecha de la imagen.

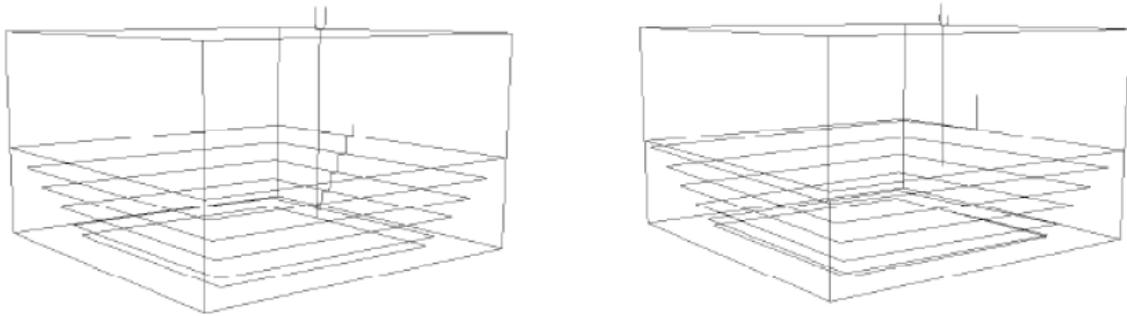


Figura 2.8 Trayectorias básicas de la herramienta para procesos SPIF. Estrategia z-level o escalonada (izquierda) y estrategia helicoidal (derecha).

## 2.3 Rebordeado de agujeros circulares por SPIF

Desde el nacimiento de este innovador método, el cual se ha estado caracterizando hasta ahora y del cual destaca su flexibilidad, por la ausencia de matriz y por consiguiente sus bajos costes de producción, se han estado haciendo estudios para optimizar el proceso y conocer los avances tecnológicos que este método ofrece.

### 2.3.1 Primeras estrategias multi-etapa

Los estudios sobre la técnica SPIF se han basado tradicionalmente en la capacidad para recrear geometrías donde la demanda de deformación plástica no era muy elevada, sin embargo, estudios relativamente nuevos, cuyos autores fueron Cui and Gao [1], muestran la capacidad de este método para llevar a cabo rebordeados de agujeros circulares, proceso en el cual el material es sometido a una deformación plástica notable, sobre todo en la zona periférica del agujero final.

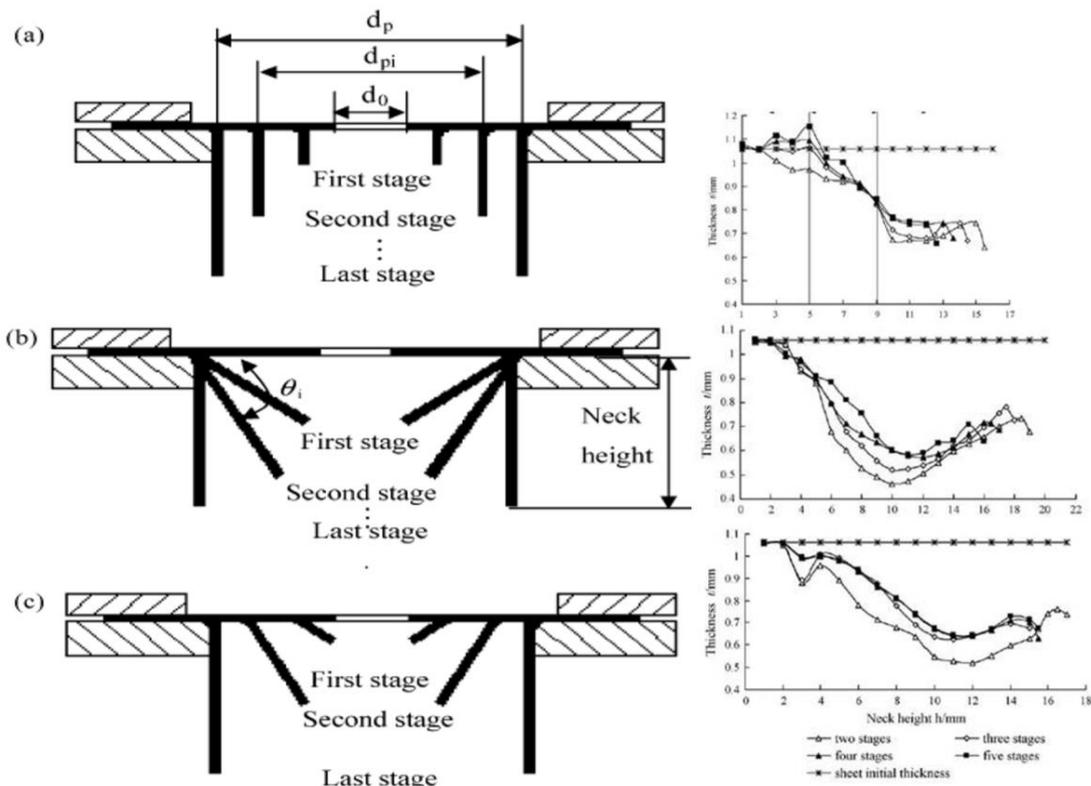


Figura 2.9 Estrategias multi-etapa para el rebordeado de agujeros circulares mediante SPIF (izquierda). Espesor a lo largo flanco del agujero rebordeado (derecha).

Estos primeros estudios que se realizaron sobre rebordeado de agujeros buscaban optimizar el método investigando distintas estrategias, todas ellas con varias etapas, como se muestran en la imagen. Puesto que esta

operación necesita un nivel de deformado plástico superior al necesario para conformar troncos de cono o pirámide, la capacidad de deformado plástico es una de las variables que más se tendrá en cuenta durante el estudio, la cual Cui and Gao [1] deciden medir mediante el parámetro LFR (Limit forming ratio), ya descrito para operaciones rebordado por estampación (se recuerda que el parámetro LFR era la mayor ratio de ampliación del agujero que podía conseguirse sin producir defectos en la pieza) . Los resultados de esta primera investigación llevaron a la conclusión que la estrategia 'a' de la Fig. 2.9 es la que proporciona un mayor LFR y además ofrece un espesor de la pared más uniforme, aunque se obtiene un adelgazamiento menor en la zona del flanco cercana a la chapa y un adelgazamiento más pronunciado y uniforme conforme se acerca el borde exterior del flanco. Dada la naturaleza del proceso parece lógico evaluar la capacidad de deformación plástica que el proceso ofrece mediante el LFR, es decir, mediante la capacidad de agrandar el agujero inicial, sin embargo, otros autores han preferido utilizar como herramienta de medida para la capacidad de conformado el FLD (Forming limit diagram, Diagrama de conformado limite). La cual parece más apropiada para evaluar al detalle el proceso, localizar las zonas de fallo y tener un conocimiento más profundo del estado del material en cada zona de la pieza final.

A pesar de las indudables ventajas que esta alternativa a los procesos de prensado ofrece, el rebordado de agujeros mediante SPIF en varias etapas tiene un serio inconveniente en términos de tiempo de realización. Teniendo esto en cuenta se han realizado algunos intentos de efectuar el proceso a altas velocidades mediante el uso de herramientas rotativas, como los de Bambach [26].

Otros autores, se centran en elaborar nuevas estrategias donde se reduzcan el número de etapas, lo que repercute en una mejora en el tiempo de fabricación.

### **2.3.2 Proceso en una sola etapa**

En estudios como los de Borrego [2-4], se refleja y analiza la capacidad de realizar el rebordado de agujeros circulares en una sola etapa mediante SPIF. Más allá de estos estudios, se encuentra poca información sobre rebordado de agujeros mediante SPIF en una etapa.

A la derecha de la Fig. 2.9 puede observarse la distribución de espesor a lo largo de la pared rebordada, comenzando a vislumbrar uno de los principales problemas técnicos de este proceso, la falta de uniformidad en el espesor, con un adelgazamiento excesivo en algunas zonas del flanco rebordado, lo que limita la vida útil de la pieza y la hace más proclive a fallos. De hecho, en estudios posteriores a los realizados por Borrego [4], Morales-Palma ha desarrollado investigaciones [5] en busca de estrategias de dos etapas que permitan uniformizar el espesor en operaciones de rebordado de agujeros circulares mediante SPIF sin que suponga un aumento excesivo en el tiempo de fabricación.

Puesto que la realización del rebordado en una etapa mediante SPIF resulta de especial interés, por su rentabilidad en términos temporales, resulta interesante analizar las tensiones que sufre el material a lo largo de este proceso, con el objetivo de localizar los puntos débiles del proceso y poder remediarlos introduciendo las menores etapas adicionales.

En el rebordado de agujeros en una sola etapa hay una clara diferencia en el proceso de deformación del material a lo largo del ensayo con respecto a este mismo proceso llevado a cabo en más etapas u otras aplicaciones de este método SPIF, como conos o pirámides truncadas, donde los ángulos de las paredes con respecto a la superficie de la chapa que se buscaban eran menores o en el caso de la Fig 2.10 [6], ángulos  $\alpha$  mayores que cero, a los buscados en el rebordado de agujero, donde se busca una pared a  $90^\circ$  con respecto a la superficie de la lámina inicial.

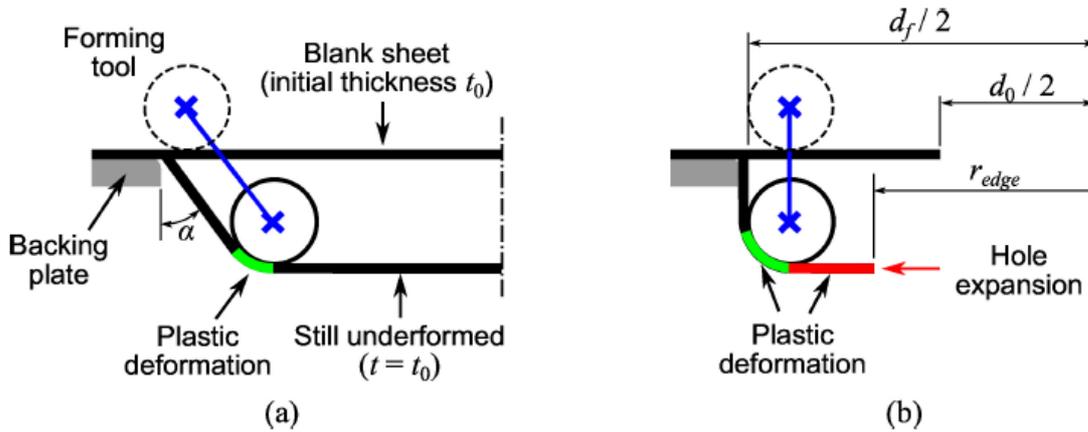


Figura 2.10 Esquema axisimétrico de operaciones SPIF con ángulo de flanco inclinado (a) y con flanco con rebordeado circular(b).

Representado en la Fig. 2.10 (a) se muestra el proceso de deformación de los típicos procesos de SPIF, donde el ángulo con la perpendicular a la superficie de la lámina indeformada es notable, en ese tipo de procesos, como se expresa en [6], el material únicamente se deforma en el momento que entra en contacto con la herramienta y el adelgazamiento de esta zona de material puede predecirse con facilidad con la ley del seno [6]. Sin embargo, en el caso del rebordeado de agujeros, como se muestra en la Fig. 2.10 (b) conforme baja la herramienta se produce una expansión del agujero, lo cual hace que el material no solo se deforme cuando está en contacto con la herramienta, sino que todo el material que se encuentra entre la herramienta y el borde del agujero está siendo sometido a un esfuerzo tanto radial como circunferencial, deformándose plásticamente. Esto repercute en el adelgazamiento del material en la superficie de contacto con la herramienta, donde dichas fuerzas que expanden el agujero están siendo transmitidas. Este proceso se entiende mejor mediante lo que en [6] llaman un análisis de membrana para la operación de rebordeado de agujero en una sola etapa, Fig. 2.11.

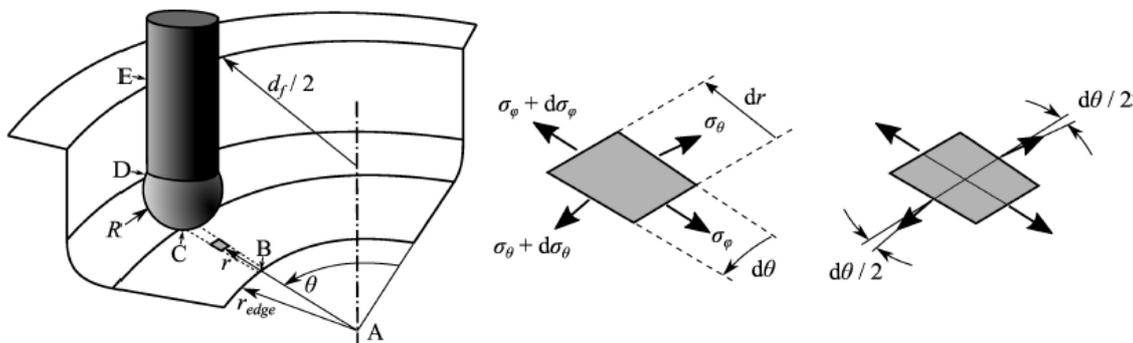


Figura 2.11 Esquema del flanco del agujero durante el proceso de deformación, donde las distintas zonas se encuentran diferenciadas por A, B, C, D. Análisis diferencial de esfuerzos en la zona del material que aún no ha entrado en contacto con la herramienta donde se representan el meridional o radial y el esfuerzo circunferencial,  $\sigma_\phi$  y  $\sigma_\theta$  respectivamente y los cuales se pueden identificar con  $\sigma_2$  y  $\sigma_1$ .

Tras un simple equilibrio de fuerzas a lo largo de la dirección radial en la zona B-C, Fig. 2.11 y aplicar las consideraciones necesarias para simplificar la expresión se obtiene:

$$\frac{d\sigma_\phi}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_\phi}{r} \quad (2.2)$$

Aplicando seguidamente el criterio de Tresca,  $\sigma_1 - \sigma_3$  debe ser igual a  $\sigma_Y$ , e integrando se obtiene la expresión del esfuerzo radial:

$$\sigma_\phi = \sigma_Y \left(1 - \frac{r_B}{r}\right) \quad (2.3)$$

Mediante esta expresión se puede hallar el valor del esfuerzo radial en C, Fig. 2.11. Este esfuerzo es el principal causante del adelgazamiento en la zona de D-C, Fig. 2.11, según Silva [22], pues en sí, el adelgazamiento de la

zona de contacto entre la herramienta y la pieza tiende a contrarrestar el aumento de dicho esfuerzo, manteniendo el producto  $t \cdot \sigma_{\phi}$  constante [6].

Por tanto si se analiza la evolución del espesor durante los primeros instantes del proceso, en el ejemplo mostrado en la Fig. 2.12 (a) se correspondería con los primeros 10 mm de bajada de la herramienta, cuando el agujero aún no ha sufrido una expansión notable y por tanto las tensiones que se producen en el punto C alcanzan su máximo, en estos primeros momentos del proceso de deformación, los espesores en el punto C sufrirán un adelgazamiento notable, sumado al adelgazamiento que sufre el material en contacto con la herramienta, hacen que en el punto D se alcance un espesor crítico, llegando a una situación como la mostrada en la Fig. 2.12 (a), donde se localizarían los fallos si los hubiera, según las condiciones del ensayo. En la Fig. 2.12 (b) se observa claramente la dirección de deformación sufrida en cada zona, y por tanto la dirección de los esfuerzos que han generado esa deformación, dejando claro que el adelgazamiento excesivo en la zona media del flanco o pared del agujero, zona c-b de la Fig. 2.12 (b), se debe a los esfuerzos en la dirección meridional.

Posteriormente, una vez el agujero se ha ensanchado lo suficiente, disminuirán los esfuerzos radiales, el espesor dejará de sufrir un adelgazamiento tan pronunciado y no se producirán fallos en la zona inferior de la pared del agujero, lo que sería la zona entre 11 y 24 mm en la Fig. 2.12 (a), donde los esfuerzos radiales se relajan y principalmente actúan tensiones circunferenciales como muestra la dirección de deformación en la zona 'a' de la Fig. 2.12 (b), donde las circunferencias de la superficie moteada se encuentran ligeramente achatadas.

Para paliar este adelgazamiento en procesos de reboreado en una etapa, según la expresión (2), las opciones son reducir el límite elástico o aumentar el radio del agujero inicial. Por otro lado, otra solución viable, la cual se propone en [6], es modificar la geometría de la zona C-B en una etapa previa al reboreado final de pared recta, y de esta forma disminuir el esfuerzo radial que supone la expansión del agujero. Esta alternativa, aunque aumentaría el tiempo de fabricación, seguiría siendo mejor que otros procesos de reboreado circular multi-etapa, y encontrando una primera etapa apropiada podría homogeneizarse el espesor en gran medida, mejorándose en gran medida las propiedades de la pieza final y retrasando el fallo de esta.

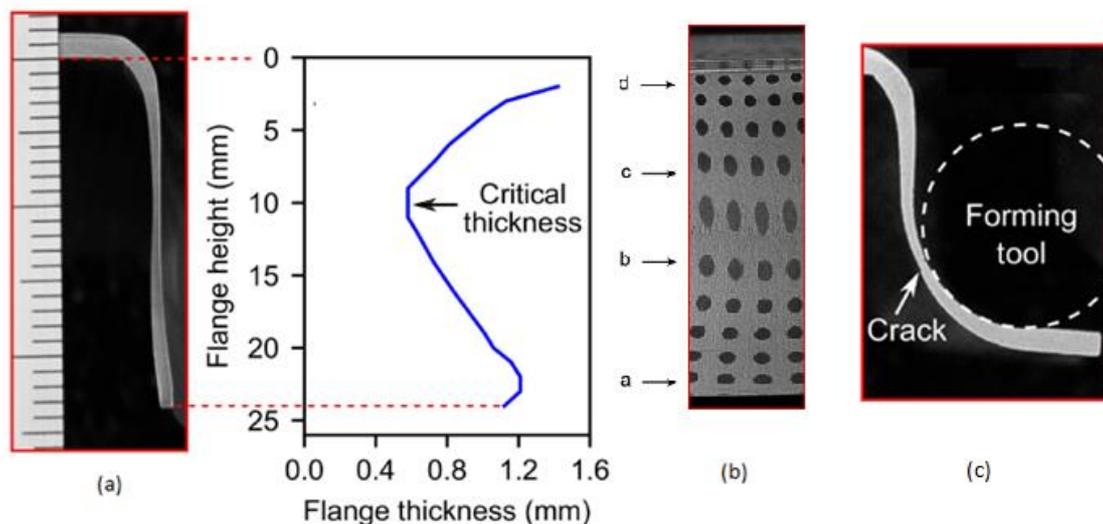


Figura 2.12 Sección y distribución de espesores de la pared del agujero de una pieza sin fallos(a); Sección de una pared del agujero cuando se produce el fallo, con superficie punteada previamente al ensayo para mostrar las deformaciones sufrida en la superficie exterior (b); Instante y zona crítica del proceso(c).

Se ha comentado anteriormente la importancia de escoger un tamaño de herramienta adecuado según el espesor de la lámina a deformar en cualquier proceso SPIF, concretamente para uno de los casos que ocupa este documento, el reboreado de agujeros en una sola etapa, se pueden ver perfectamente las ventajas e inconvenientes de utilizar un radio mayor o menor. En la Fig. 2.13 se muestran 3 láminas ensayadas y que desembocaron en fallo, esas tres láminas, y todas las que se mostrarán en este documento y que fueron ensayadas experimentalmente en [3], poseen un espesor en la situación indeformada de 1.6 mm.

Por tanto, para ver la relación espesor-tamaño de la herramienta se han utilizado radios de 6 mm 8 mm y 10 mm, Fig. 2.13.

El hecho de utilizar un radio de 6 mm inicialmente repercutirá en los esfuerzos generados en la lámina, en la

zona de contacto entre la herramienta y la pieza, los esfuerzos de doblado (bending) predominarán sobre los esfuerzos de estirado (stretching) y según enunciaba Hussain [21], esto supondría una mayor capacidad de deformación sobre el material, con el peligro de que la herramienta pudiera incrustarse parcialmente en el material, lo ocurre levemente para radios de 6 y 8 mm como se señala en la Fig. 2.13. Esta leve incrustación de la herramienta dificulta que el material fluya a lo largo del conformado, por tanto, favorece aún más el adelgazamiento de la zona crítica de la que se ha hablado en el apartado anterior, por tanto, el uso de estas herramientas de radio reducido puede llegar a ser contraproducente.

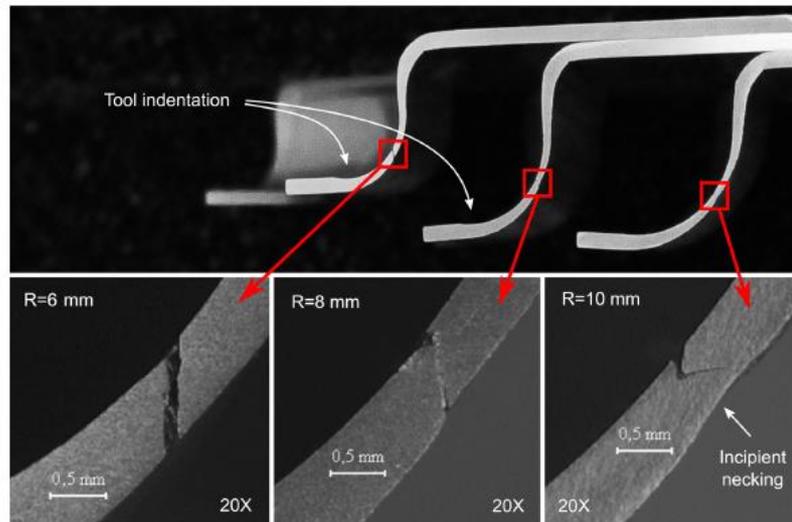


Figura 2.13 Sección transversal de ensayos con distintos tipos de radios de herramientas esféricas que alcanzaron el fallo.

Esta conclusión, abre la discusión sobre otra cuestión que también se ha comentado anteriormente y es sobre cuál sería la herramienta correcta para evaluar la capacidad de deformación plástica en el proceso.

Se sabe que convencionalmente en procesos de rebordeado de agujeros circulares por prensado o estampado se utiliza el HER para tener cierta consciencia del nivel de deformación que el material va a sufrir y el LFR, el máximo HER alcanzable, como la capacidad de deformación límite que puede darse en el proceso. Esto caracteriza bastante bien el umbral de deformación en el prensado, pues el material sometido a las mayores deformaciones se encuentra en la periferia del flanco rebordeado final, la zona 'a' de la Fig. 2.12 (b), y estas deformaciones estaban controladas por la ratio de expansión del agujero. Sin embargo, ya se ha analizado las deformaciones a lo largo de la pared rebordeada y se sabe que en la zona 'a' de la Fig. 2.12 (b), como muestra la misma imagen gracias a la superficie moteada, no se producen las mayores deformaciones en la periferia de la pared del agujero y por tanto usar el LFR como medidor de la capacidad de conformado plástico en procesos de rebordeado de agujeros por SPIF puede no ser correcto.

A esta misma conclusión llega Borrego [3], tras ensayar un lote de piezas en busca de los límites de conformado plástico según el tipo de herramienta, obtiene los siguientes resultados para el máximo HER:

R herramienta	$d_0(mm)$	$d_f(mm)$	$LRF(HER_{max})$
6	64.5	94.4	1.46
8	61	94.8	1.55
10	57.5	94.8	1.65

Tabla 2.1 Resultado experimentales con mayores HER en piezas sin fallos. Herramienta fija, sin rotación. Ensayos realizados en chapas de 1.6 mm de espesor.

Evidentemente, si el LRF fuera una buena herramienta para medir la capacidad de conformado plástico, no se alcanzaría el máximo de este valor para herramientas de mayor radio, lo cual va en contra de las conclusiones

de Hussain [21]. Todo esto refuerza lo que esperábamos después de analizar el proceso de deformación, por tanto el LFR queda descartado como medidor del nivel de deformación plástica que sufre el material en el proceso, a pesar de que el HER evidentemente influye en el nivel de deformación alcanzado. Sin embargo, otros parámetros que Borrego [3], mide durante el ensayo comentado anteriormente parecen cuadrar bastante bien con el nivel de deformación plástica que sufre el material. A pesar de que para mayores radios de herramienta, se puedan alcanzar mayores ratios de expansión del agujero inicial, hay un parámetro que no se ha tenido en cuenta en procesos convencionales, pues no variaba para un HER dado. Este parámetro es la longitud de la pestaña rebordeada, pues para un HER dado, los esfuerzos circunferenciales sufridos por el material deberán ser similares y son los esfuerzos meridionales o radiales los que producen que según el radio de la herramienta la pieza falle o no. Por tanto, con radios pequeños, que como ya se ha dicho aumentan la capacidad de deformación del material, obtendremos pestañas rebordeadas de mayor longitud para un mismo HER, de las que se conseguirían con radios superiores. Este razonamiento iría en consonancia con lo enunciado por Hussain [21], y efectivamente los ensayos realizados por Borrego [3], lo secundan, Tabla 2.2, donde este autor mide el efecto de doblado de la herramienta mediante lo que denomina ratio de doblado y lo designa como el espesor de la chapa entre el radio de la herramienta, por tanto a menor radio de herramienta ( $R$ ), mayor será el ratio para una espesor dado, mayor será la predominancia de los efectos de doblado y la longitud de la pestaña rebordeada ( $h$ ) con respecto a la longitud inicial del material que conformara la pestaña ( $h_0 = d_f - d_0$ ) aumentará.

<b>R</b>	<b>HER(<math>d_f/d_0</math>)</b>	<b><math>d_0</math>(mm)</b>	<b><math>d_f</math>(mm)</b>	<b><math>t_0/R</math></b>	<b><math>h</math> (mm)</b>	<b>(<math>h/h_0</math>)</b>
<b>6</b>	1.46	64.5	94.4	0.27	23.6	0.789
<b>8</b>	1.46	65	94.7	0.2	19	0.640
<b>10</b>	1.46	65	94.8	0.16	17.8	0.597

Tabla 2.2 Resultado experimentales para diferentes ratios de doblado. Herramienta fija, sin rotación. Ensayos realizados en chapas de 1.6 mm de espesor.

Como puede apreciarse es bastante notable la influencia del efecto de doblado, llegando a variar más de un 30% la longitud de la pestaña rebordeada según la ratio de doblado en este concreto ensayo.

Merece la pena remarcar que hay otros factores aparte del HER y el radio de la herramienta que pueden influir en el nivel de deformación alcanzado por el material durante el proceso, como sería la rotación de la herramienta a altas velocidades, esta rotación alivia las condiciones de fricción y permite una mejor fluencia del material, evitando hasta cierto punto el incrustamiento leve que se produce con herramientas de pequeño radio y acaba proporcionando piezas con menores deformaciones plásticas así como una distribución de espesores más uniforme, según Borrego [3].

### 2.3.3 Proceso en dos etapas optimizado

Tras estudiar el trabajo de Borrego, el cual nos demuestra que existe la posibilidad de llevar a cabo rebordeados de agujeros mediante SPIF en una sola etapa, algo que en esta innovadora tecnología no se consideraba, y que es capaz de reducir el tiempo de fabricación con vistas a incorporar la fabricación incremental al mundo industrial. Sin embargo, el hecho de reducir el tiempo hasta conseguir un método competitivo en estos términos, tiene una influencia bastante seria en las características técnicas de la pieza final. Como podía verse en la Fig. 2.12, la distribución de espesores a lo largo del flanco de agujeros rebordeado en una sola etapa presenta una falta de uniformidad considerable, que deja este tipo de piezas fuera del mercado, pues alcanzarían el fallo con mucha mayor presteza que piezas fabricadas mediante estampación, por ejemplo, donde el planchado del flanco proporciona un espesor constante. Por este motivo Morales-Palma [5] buscó optimizar el método de rebordeado de agujeros por SPIF mediante la adición de una etapa, de tal forma que el tiempo requerido para la fabricación no aumente en exceso y las propiedades técnicas de la pieza mejoren notablemente.

En la Fig. 2.10 muestra que si el flanco del agujero es deformado con un ángulo leve con respecto a la superficie de la chapa, la única zona que se deforma es aquella en contacto con la herramienta y la ventajas teóricas son aún mayores pues el espesor del flanco con poca inclinación respecto a la superficie de la chapa debe ser uniforme siguiendo la ley  $t = t_0 \sin \alpha$  [5], esto suele ocurrir para otra aplicaciones SPIF. Sin embargo, como ya se explicó con anterioridad, realizar el rebordeado en una etapa supone generar un flanco a 90° y que se

generen fuerzas en el proceso de expansión de la zona cercana al agujero que deformen en exceso algunas zonas de este flanco.

Por tanto, Morales-Palma, tras estudios previos, propone una serie de estrategias en dos etapas Fig. 2.14 con el objetivo de evitar los instantes críticos del proceso, donde la expansión del agujero genera un adelgazamiento excesivo en el flanco. Se parte de la estrategia conocida que produce mejores resultados y luego se contemplan tres estrategias posteriores, la estrategia de partida fue desarrollada por Cui y Gao [1] y Bambach [26] también trabajó con trayectorias similares para estudiar la flexibilidad de métodos SPIF en el rebordeado de agujeros en chapas de acero.

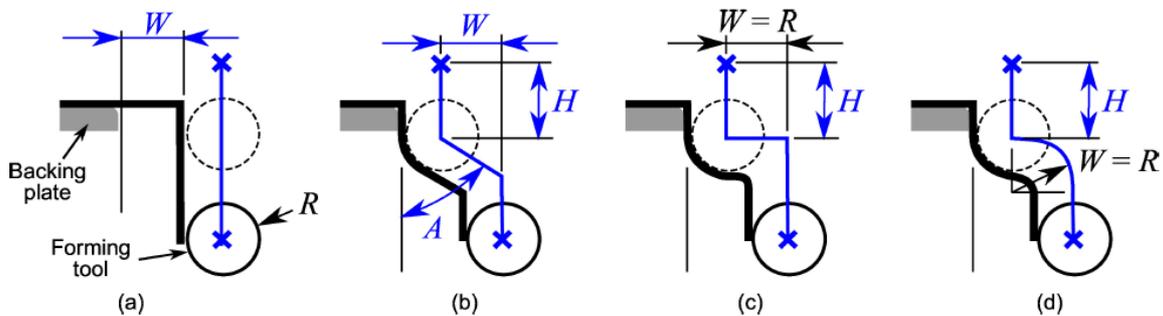


Figura 2.14 Se muestran las primeras etapas para las estrategias en dos etapas. (a) Estrategia de dos etapas propuesta por Cui y Gao. (b) Estrategia propuesta por Morales-Palma en [5]. (c) Prototipo de propuesta, sección parametrizada mediante 3 valores, (d) Estrategia final propuesta [6].

La propuesta de estas trayectorias tiene un motivo. En estudios previos, Morales-Palma [5], realizó un estudio numérico para la estrategia Fig. 2.14 (b) donde se analizaron 18 modelos con diferentes valores de los parámetros  $W$ ,  $H$  y  $A$ , resolviendo estos mediante un modelo de EF, utilizando Abaqus/Explicit, el mismo software que se emplea en este trabajo. Los resultados mostraron que el valor de los parámetros que mejores resultados generaba, es decir más homogeneidad proporcionaban al flanco rebordeado, eran  $A=80^\circ$  y un valor de  $W=R$ , mientras que para el valor de  $H$  se asumió que guarda dependencia con el material y la geometría del proceso. En vista de estos resultados y del elevado valor de  $A$ , nacen las otras dos estrategias propuestas Fig. 2.14 (c) y (d) donde se asigna un valor de  $A=90^\circ$  y en una se realiza una transición brusca del movimiento horizontal al comienzo de la segunda trayectoria cilíndrica de la primera etapa Fig. 2.14 (c) y una segunda estrategia, que resulta de mejorar la anterior, en la que este movimiento se encuentra suavizado mediante un radio de acuerdo de valor  $W$  Fig. 2.14 (d), esta será la que se estudiará.

Se generará un modelo de elementos finitos con un agujero inicial en la chapa de 64.5 mm y se utilizará una herramienta de 6 mm para deformar la chapa. Las trayectorias introducidas en el programa se generan mediante Python y están representadas en la Fig. 2.15, como puede verse la segunda etapa Fig. 2.15 (c) se trata de una etapa cilíndrica que comienza en el punto donde la primera realiza la transición circular. En la etapa intermedia entre la primera y la segunda, Fig. 2.15 (b), se sigue un recorrido que no genere colisiones y posibles fallos.

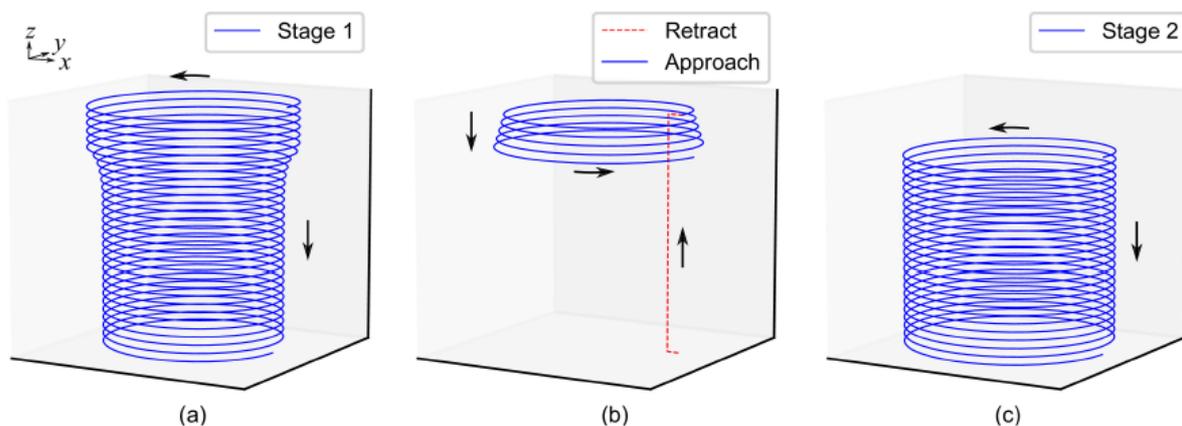


Figura 2.15 Trayectorias introducidas en el programa de EF para reproducir un proceso SPIF de rebordeado de agujero en dos etapas siguiendo la estrategia Fig. 2.14 (d).

Se simularán también modelos siguiendo la estrategia de trayectoria (a) de la Fig. 2.15 para realizar una comparación con los resultados que se obtengan mediante la estrategia propuesta. Para la estrategia (a) Fig. 2.15 se utilizarán valores de  $W=4,6, \text{ y } 8 \text{ mm}$ , como podemos ver en la leyenda de la gráfica Fig. 2.16 (a), valores que según Cui y Gao [1] se acercan considerablemente al valor óptimo para dicho parámetro. Por otro lado, para la estrategia Fig. 2.15 (d) se emplea primeramente un valor de  $H=R$  y adicionalmente se simulan modelos también con  $H=7 \text{ y } 8 \text{ mm}$ , para tener un marco de comparación. En la Fig. 2.16 se muestra el espesor a lo largo del flanco del agujero rebordado tanto en los modelos realizados en dos etapas como del modelo realizado en una sola etapa.

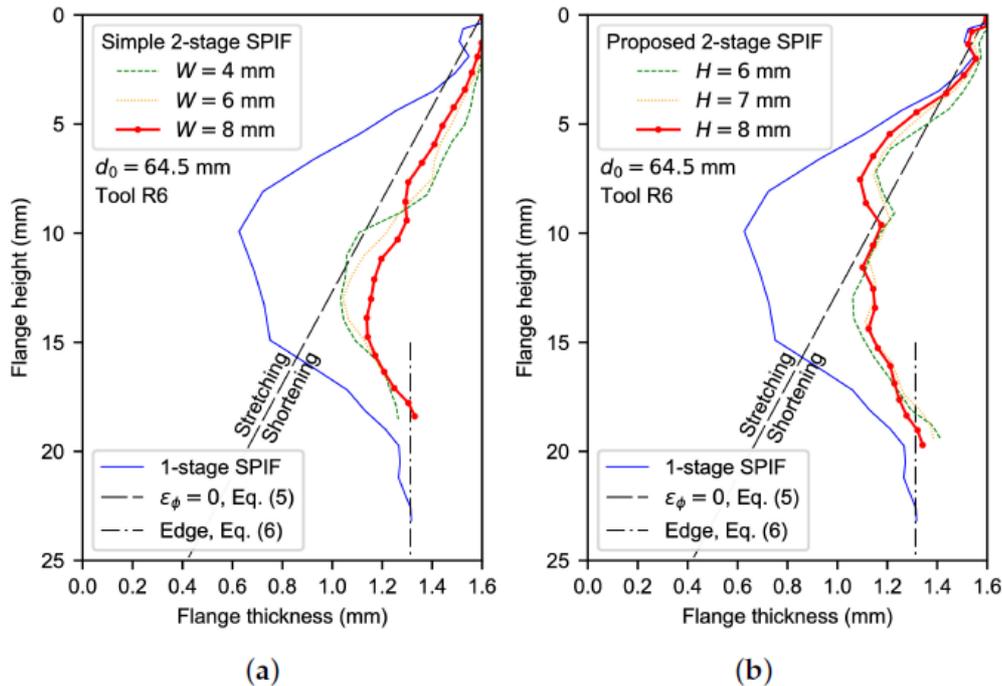


Figura 2.16 Distribución de espesores de las piezas simuladas en rebordado de agujeros mediante SPIF en dos etapas y comparación con la operación realizada en una etapa.

Puede verse como en la zona crítica consigue evitarse la reducción excesiva del espesor, llegando a ser esta casi un 50% menor en esa zona específica. Con la estrategia que propusieron Cui y Gao [1], Fig. 2.16 (a) la tónica de deformación se mantiene similar a la encontrada en modelos de una sola etapa, donde el espesor se va reduciendo hasta un punto crítico, a partir del cual el espesor vuelve a crecer hasta el final del flanco. Esto concuerda con los resultados que Cui y Gao [1] obtuvieron. La estrategia propuesta por Morales-Palma [6] sin embargo sufre una reducción de espesor notablemente más pronunciada al inicio del flanco para luego mantenerse y el flanco acaba recobrando espesor en la zona final. En este documento, teniendo en cuenta lo visto en el apartado previo donde se estudia el proceso de deformación del material en procesos de rebordado en una sola etapa mediante SPIF, se buscarán alternativas, sumando etapas al proceso, intentando buscar estrategias de deformación que permitan uniformizar el espesor a la vez que se intenta aumentar la capacidad de deformación plástica del material a lo largo del proceso. Para ello, durante esta investigación también se intentará comprender aún mejor el proceso de deformación y la influencia que tiene el agujero inicial en las deformaciones y tensiones que se producen a lo largo del proceso.

Según explica Morales-Palma [5], el adelgazamiento excesivo que encontramos para piezas realizadas en una etapa y también en mediante la estrategia propuesta en la Fig. 2.15 (d), se debe a la resistencia del borde del agujero inicial a ser circunferencialmente agrandado, lo que repercute en tensiones en la zona de contacto que hacen que esa zona del material se estire en la dirección meridional, es decir, radial. Por tanto, Morales-Palma es capaz de medir este estiramiento meridional del flanco mediante la línea 'Stretching-Shortening' que se aprecia en la Fig. 2.16, de tal forma que si la reducción en el espesor hace que se alcancen valores de la zona 'Stretching' significará que la resistencia del agujero a ser ensanchado circunferencialmente ha producido un estiramiento en el flanco en la dirección radial. Analizando las gráficas, vemos como la estrategia de perfiles rectos, propuesta por Cui y Gao [1] es capaz de evitar ese estiramiento en el flanco, mientras que la propuesta en el documento [5] no evita ese factor.

Sin embargo, la estrategia propuesta por Morales-Palma acaba generando un espesor más uniforme, alrededor de los 1.1-1.2 mm. Las diferencias encontradas en los modelos cuando se varían levemente el valor de las variables pueden ser despreciadas, pues los valores del espesor apenas llegan a variar un 10%, y se asume  $H=R$  como variable óptima para esta estrategia.

En busca de corroborar los resultados obtenidos mediante el análisis numérico llevado a cabo mediante un software de elementos finitos, Morales-Palma ensayó un modelo en el laboratorio, con los mismos parámetros que en la simulación, herramienta de 6 mm junto a una lámina de aluminio AA7075 de 1.6 mm de espesor y un agujero inicial de 64.5 mm y con unos parámetros para generar la estrategia  $H=W=R$ . Se llegaron a realizar dos ensayos, con diferencias entre ellos menores al 2%.

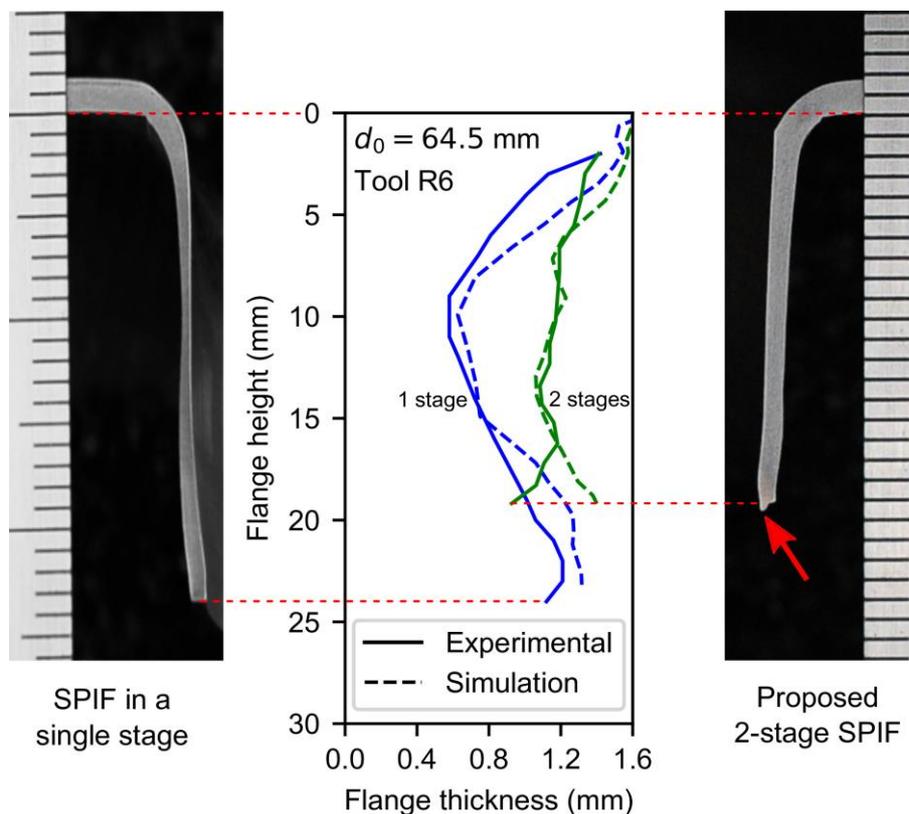


Figura 2.17 Resultados experimentales y numéricos para reboreado de agujero circular mediante SPIF en una y dos etapas.

Los resultados experimentales obtenidos en [6] se asemejan con bastante precisión a lo previsto numéricamente con la excepción del borde exterior del flanco reboreado, donde encontramos una anomalía debida a la formación de lo que parece una rebaba. Esta rebaba parece encontrarse también en la pieza fabricada en una etapa, pero de forma más liviana. A parte de la zona inferior del flanco, los resultados obtenidos numéricamente se ajustan extraordinariamente bien en el proceso de dos etapas, mejor incluso de lo que se ajustan los resultados numéricos en el proceso SPIF de una etapa.

Hay que recordar que en el diseño de la primera etapa de las dos que se ejecutan para producir una mejora en la distribución de espesores, el tamaño de la herramienta juega un papel importante, a mayor tamaño tenga la herramienta, mayor deberán ser los parámetros que definen la geometría intermedia. De hecho, los valores óptimos de los parámetros en términos de uniformidad en la solución son  $H=W=R$  [6].

Es remarcable el hecho de que en la Fig. 2.17 se está utilizando para la comparación dos chapas con el mismo agujero inicial que se reborea circularmente con la misma dimensión ( $d_f = 95.8 \text{ mm}$ ) en ambos casos. Sin embargo, para la operación en una etapa se trata del caso límite, no su pueden realizar operaciones con HER superiores, por el contrario, puede apreciarse que el flanco realizado en dos etapas posee un nivel de deformación bastante menor.



# 3 MODELADO NUMÉRICO DEL PROCESO

---

## 3.1 Automatización con Abaqus Scripting

El programa de Elementos Finitos que se utilizará para la construcción del modelo será Abaqus. Generalmente este tipo de programas tienen una interfaz bastante intuitiva que te permite ir introduciendo las características del modelo paso a paso, la geometría de las piezas que intervienen, las propiedades del material, las secciones de las piezas, condiciones de contorno, trayectorias a seguir, etc. Sin embargo, también proporcionan una segunda opción de interacción con el programa, mediante comandos escritos en el lenguaje de programación de Python adaptado para el programa en concreto, se denominará a este lenguaje como ‘Abaqus scripting’. A diferencia de la interfaz, el uso de comandos o scripts para interactuar con Abaqus es mucho más abstracto y complejo, sin embargo, aporta una repetitividad al proceso de generación de modelos muy útil en casos como el que ocupa este documento, donde la disposición general de los ensayos que pretendemos reproducir no varía y solo se busca alterar algunas características y parámetros entre un ensayo y otro. Esto hace referencia a que, tanto las condiciones de contacto, como los elementos de fijación de la chapa, como las formas de los elementos se mantendrán constantes para todos los procesos de SPIF que estudiemos y solo variarán los valores de los diámetros de los agujeros iniciales, radios de la herramienta y trayectorias seguidas por esta.

Además de poder introducir los comandos en la consola de Abaqus, también existe la posibilidad de que se lean directamente de un archivo alojado en el directorio de guardado de Abaqus.

Por tanto, el objetivo de usar los comandos de Abaqus es conseguir generar unos archivos de texto, scripts, que permitan la generación instantánea del modelo al ser leídos, donde las variables que definen las características de este, sean fácilmente modificables. Del mismo modo que se puede obtener un archivo que genere el modelo, también pueden realizarse otros que nos permitan obtener los resultados del modelo, y graficarlos de forma inmediata. Esto supondrá un increíble ahorro de tiempo para investigaciones de este tipo, donde todavía no se conocen los límites del proceso y gran número de diferentes modelos están siendo probados.

La metodología a seguir para entender el funcionamiento de estos archivos es bastante básica. Cuando se realiza cualquier tipo de operación en la interfaz de Abaqus, este genera un archivo de texto tipo ‘JNL’ con el comando de ‘Abaqus scripting’ correspondiente a la operación realizada, de forma que se pueden ir conociendo los diferentes comandos a medida que se genera un modelo mediante la interfaz. Más allá, los valores numéricos introducidos en la interfaz, en los comandos de los archivos de texto pueden sustituirse por variables que sean definidas, por ejemplo, en otro script o al inicio del script que generara el modelo, para una mayor claridad y rapidez a la hora de definir los parámetros del modelo.

Unos archivos de este tipo fueron generados para procesos de SPIF en una sola etapa por Morales-Palma [5], además consigue elaborar unos archivos limpios y ordenados identificando las partes del código repetitivas y sustituyéndolas por variables simples. En este caso se hará uso de ellos, modificándolos cuando sea necesario. La organización básica de los archivos es la siguiente:

- **Carpeta de entrada (input/):** Esta carpeta debe alojarse junto a los dos archivos de Python en el directorio de guardado de Abaqus. En ella se encuentran los archivos de texto con información que se debe introducir en el modelo como son las leyes de comportamiento, tanto elástica como plástica además de los archivos referidos a la trayectoria de la herramienta.
- **Archivo de variables (variables.py):** En este archivo, que se trata de un script de Python, se define absolutamente todos los datos requeridos por Abaqus para generar el modelo, desde los directorios en donde se encuentran los datos a introducir en el modelo, Fig. 3.1, como la ley de comportamiento

y las trayectorias a seguir por la herramienta, a toda la información relativa a las dimensiones del modelo y el mallado de este, además de incluir una función para leer datos de los archivos.

- **Archivo de modelo (model.py):** Este archivo, model.py, debe ejecutarse después del archivo de variables pues recogerá la información de este para utilizarla en la generación del modelo. En este archivo se encuentran todos los comandos necesarios para la construcción total del modelo referidos a las variables alojadas en el archivo anterior. Parece correcto mostrar algunos de estos comandos que conforman el script mientras se explican los diferentes aspectos que deben definirse en Abaqus para obtener un modelo completo y resoluble, además se aprovechara para mostrar cómo se debe trabajar con estos archivos, por si fuese útil para posibles investigaciones futuras.

```
7 workdir      = 'D:/Mario/TFG/ABAQUS/SavingDirect/'
8 workdir      = 'D:/Mario/TFG/ABAQUS/SavingDirect/2019-02_Python/Abaqus_HF-SPIF-1stage/'
9
10 inputdir     = workdir + 'input/'
11 outputdir    = workdir + 'output/'
12 analysisdir  = workdir + 'analysis/'
13 reportsdir   = workdir + 'analysis/rpt/'
14 figuresdir   = workdir + 'analysis/png/'
15
16 abaqus_model = 'HF-SPIF-1stage'
17 jobname      = 'HF-SPIF-1stage-1'
18 odb_filename = jobname + '.odb'
19
20
21 file_toolpath_0 = workdir + 'input/toolpath-0-SI.dat' # Global coordinates of the tooltip initial position
22 file_toolpath_X = workdir + 'input/toolpath-X-SI.dat' # Local coordinates
23 file_toolpath_Y = workdir + 'input/toolpath-Y-SI.dat'
24 file_toolpath_Z = workdir + 'input/toolpath-Z-SI.dat'
25 file_toolpath_intervals = workdir + 'input/toolpath-intervals.dat'
26 file_material_elastic = workdir + 'input/AA70750-Elastic-SI.txt'
27 file_material_plastic = workdir + 'input/AA70750-Hollomon340n175-SI.txt'
```

Figura 3.1 Extracto del archivo de variables.py de ‘Abaqus scripting’, creación de variables con la información de los directorios para introducción y extracción de información del modelo.

- **Archivo de obtención de resultados (results.py):** Este archivo también debe ejecutarse conjuntamente con el archivo variables.py y contiene los comandos necesarios para obtener la información o imágenes de los modelos resueltos a través del módulo de visualización de resultados de Abaqus, en distintos instantes temporales o en distintas zonas del flanco.
- **Carpeta de salida(output/) y análisis de datos (analysis/):** Carpeta utilizada para alojar los resultados de las simulaciones con Abaqus y de los informes y gráficas para su posterior análisis, respectivamente.

## 3.2 Creación del modelo

Se crea un modelo nuevo con el nombre deseado dentro de un archivo ‘CAE’ de Abaqus.

```
83 md = mdb.Model(name=abaqus_model)
```

Figura 3.2 Extracto del archivo de ‘Abaqus scripting’ generado por Domingo, comando para la generación del modelo con el nombre registrado en las variables ‘abaqus\_name’.

Salta a la vista que el extracto de código mostrado en la Fig. 3.2 es la línea 83 del archivo, las líneas superiores se utilizan para recoger la información sobre la ley de comportamiento y la trayectoria de la herramienta mediante una función definida para ello en el archivo de variables, además de para pasar los

datos recibidos del archivo de variables al sistema internacional cuando es necesario.

Si se hubiese generado el modelo desde la interfaz de Abaqus el archivo 'JNL' asociado a ese modelo habría escrito lo siguiente:

```
mdb.Model(name='HF-SPIF-1stage')
```

Figura 3.3 Comando para la generación del modelo 'HF-SPIF-1stage'.

Sin embargo, cuando se genere el modelo se tendrá la información del nombre del modelo en el archivo variables.py. Adicionalmente, se iguala a la variable md para simplificar el código, pues el lenguaje de Python para Abaqus parece estar encadenado, se verá claro en las imágenes del código. Todo comando que vaya a modificar o a incluir información adicional al modelo que hemos creado llevará delante esa línea de código (mdb.Model(name='HF-SPIF-1stage')) y posteriormente añadirá la línea de código que aporta la información nueva. Sustituir una serie de comandos que van a repetirse a lo largo del código por una variable es algo que Morales-Palma utilizará numerables veces para que el código se vea más claro y entendible. En el siguiente punto se verá esto más claro.

El orden de acciones que se mostrará a continuación no es el único que puede seguirse, pero evidentemente ciertos aspectos del modelo deben definirse antes que otros, aquí se muestra un orden lógico a seguir.

### 3.3 Definición de piezas

El modelo consta de tres partes, como muestra la Fig. 3.4.

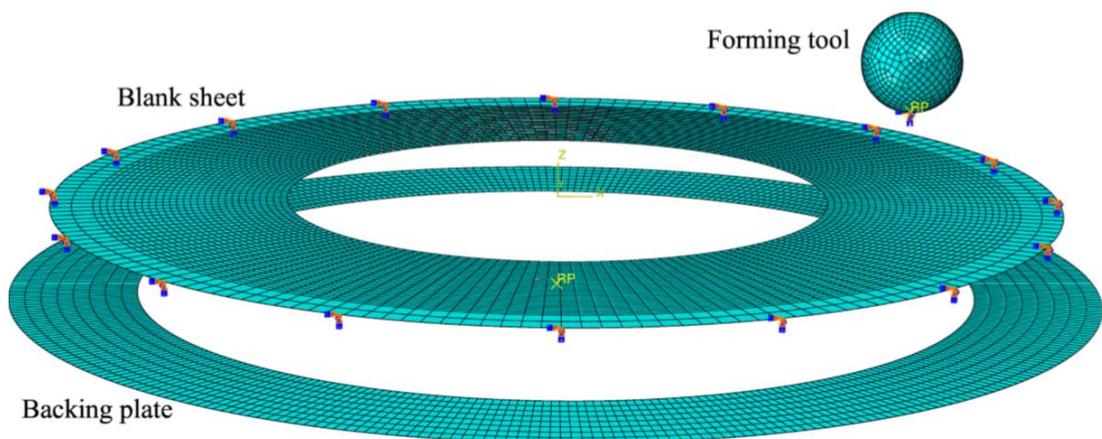


Figura 3.4 Piezas del MEF.

- a) Chapa: Se trata de una lámina circular que en rebordeado de agujeros siempre lleva un agujero inicial. Los valores  $d_{ext}$  y  $d_0$  que definan las dimensiones de la chapa se encuentran evidentemente en el archivo de variables.  $d_{ext} = 120 \text{ mm}$  y se mantendrá constante para los distintos modelos que simularemos. Como puede verse en la Figura 3.11, continua la concatenación de comandos, en este caso se debe crear un boceto ('sketch') donde se definan las dimensiones de la lámina. Puede verse como este 'sketch' también se resume en una variable, 'sk' en este caso, e incluye la variable md al inicio, unida por un punto al resto del comando, de tal forma se asocia el 'sketch' a dicho modelo. Los valores  $d_{ext}$  y  $d_0$  que definan las dimensiones de la chapa se encuentran evidentemente en el archivo de variables. En la variable 'sheet' se encuentra resumido el comando que crea y referencia la

parte, que también posee la variable *md* al inicio. Cuando se use la variable ‘sheet’ antes de un comando, este comando irá dirigido a modificar o complementar esta parte del modelo ‘*abaqus\_model*’. A esta lámina se le aplican las propiedades de parte deformable y en 3D como se aprecia en la línea 88 Fig. 3.5, además de definirse el nombre. Justo después de crear la parte, se define el tipo de elemento que se le asociará, esto ocurre en la línea 89. Dentro de elementos 3D deformables, Abaqus ofrece la opción Base Shell, este tipo de elemento se utiliza para láminas de pequeño espesor, como es este caso. El espesor de esta parte se definirá en la sección que se le asignará a esta parte, donde también se definen las propiedades del material. De la línea 94 a la línea 113 Fig. 3.5 se definen particiones que deben hacerse en la chapa para poder definir las semillas del mallado, para obtener un mallado uniforme, además también serán necesarias estas particiones para crear las condiciones de contorno. Las distintas zona de una parte donde se quiere ejecutar alguna acción, desde un partición a imponer condiciones de contorno o asignar un tipo de sección se definen en el programa mediante lo que llama ‘.getSequenceFromMask((# ))’ como vemos en las líneas 102 o 111 Fig. 3.5, la zona en si se define por lo que se encuentra dentro del paréntesis precedido por una almohadilla. Cuando apliquemos cualquier característica (ya sea el número de semillas para el mallado que debe tener cierta línea o la zona sobre la que aplicar las condiciones de contorno) sobre cierta zona, se generará un valor de ‘.getSequenceFromMask’ para dicha zona. Por ejemplo la partición circular exterior que se realiza entre las líneas de código 105 y 112 Fig. 3.5, se caracteriza por un ‘.getSequenceFromMask((#3 ))’. Con estos valores hay que tener mucho cuidado cuando se varíen ciertas características del modelo, pues podrían cambiar e inducir a error. La única forma de obtenerlos es mediante la ejecución de la operación mediante la interfaz y observando el archivo ‘JNL’. La dimensión del círculo exterior se mantendrá constante para todos los modelos a simular y será  $d_{particion\_ext} = d_{ext} - 10\text{ mm} = 110\text{ mm}$ .

```

85  ### PARTS ###
86  ### PART: Sheet ###
87  sk = md.ConstrainedSketch(name='__profile__', sheetSize=0.200)
88  sheet_circle_int = sk.CircleByCenterPerimeter(center=(0.0, 0.0), point1=(d0/2, 0.0))
89  sk.CircleByCenterPerimeter(center=(0.0, 0.0), point1=(d_ext/2, 0.0))
90  sheet = md.Part(dimensionality=THREE_D, name='Sheet', type=DEFORMABLE_BODY)
91  sheet.BaseShell(sketch=sk)
92  del sk
93  # line partition
94  sk = md.ConstrainedSketch(gridSpacing=0.01128, name='__profile__', sheetSize=0.45131, transform=
95      sheet.MakeSketchTransform(sketchPlane=sheet.faces[0], sketchPlaneSide=SIDE1, sketchUpEdge=sheet.edges[1],
96      sketchOrientation=TOP, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
97  sheet.projectReferencesOntoSketch(filter=COPLANAR_EDGES, sketch=sk)
98  sk.Line(point1=(0.0, d_ext/2), point2=(0.0, -d_ext/2))
99  sk.VerticalConstraint(addUndoState=False, entity=sk.geometry[4])
100 sk.PerpendicularConstraint(addUndoState=False, entity1=sk.geometry[3], entity2=sk.geometry[4])
101 sk.CoincidentConstraint(addUndoState=False, entity1=sk.vertices[3], entity2=sk.geometry[3])
102 sheet.PartitionFaceBySketch(faces=sheet.faces.getSequenceFromMask(['[#1 ]', ]), ), sketch=sk, sketchOrientation=
103     TOP, sketchUpEdge=sheet.edges[1])
104 del sk
105 # circular partition: outer edge
106 sk = md.ConstrainedSketch(gridSpacing=0.01128, name='__profile__', sheetSize=0.45131, transform=
107     sheet.MakeSketchTransform(sketchPlane=sheet.faces[0], sketchPlaneSide=SIDE1, sketchUpEdge=sheet.edges[1],
108     sketchOrientation=TOP, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
109 sheet.projectReferencesOntoSketch(filter=COPLANAR_EDGES, sketch=sk)
110 sk.CircleByCenterPerimeter(center=(0, 0), point1=(0, d_particion_ext/2))
111 sheet.PartitionFaceBySketch(faces=sheet.faces.getSequenceFromMask(['[#3 ]', ]), ), sketch=sk,
112     sketchOrientation=TOP, sketchUpEdge=sheet.edges[1])
113 del sk

```

Figura 3.5 Extracto del archivo ‘*model.py*’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la generación de la chapa.

- b) Matriz: Representa al utillaje en el ensayo real y está modelado, de nuevo, como una corona circular de diámetros  $plate_{d_{ext}} = 130\text{ mm}$  y  $plate_{d_{int}} = 100\text{ mm}$ . Puesto que en el ensayo de laboratorio el utillaje puede considerarse sólido rígido se ha decidido definir esta parte como sólido rígido discreto, opción que pone Abaqus disponible para elementos que no

vayan a ser deformados, es decir, que su dureza sea muy superior a la del elemento ensayado. A esta parte se le asocia un punto de referencia para controlar su posición y condiciones de contorno, este punto se define en el centro de las circunferencias que definen la corona circular. La metodología de trabajo con ‘Abaqus scripting’ no varía con respecto a la pieza anterior.

- c) Herramienta: Se define como una esfera, del mismo tipo de elemento rígido que el plato de apoyo, cuyo radio variará según el modelo que simulemos y se definirá en el archivo de variables.

### 3.4 Definición del material

Los datos del aluminio 7075-O fueron determinados experimentalmente por Borrego et al. [4]. Constan de las leyes de comportamiento elástico (módulo de Young y coeficiente de Poisson) y plástico, además del espesor de la chapa y la densidad del material. Todos estos datos son leídos de los archivos de entrada. Una vez que se introduce la información del material, se crea una sección para elemento tipo Shell (lámina) la cual se define como homogénea y se le asocia un espesor  $t_0 = 1.6 \text{ mm}$ . Después simplemente se define a qué partes les corresponde la sección. En este caso, como se dijo, la herramienta y la matriz se han definido como elementos sólidos, por tanto, no requieren sección y solo debe asociarse la sección a la chapa.

```

189  ### MATERIAL AND SECTION ###
190  # t0
191
192  md.Material(name='AA7075-O')
193  md.materials['AA7075-O'].Elastic(data_elastic)
194  md.materials['AA7075-O'].Plastic(data_plastic)
195  md.materials['AA7075-O'].Density(table=(Al_density, ), )
196
197  # Section
198  md.HomogeneousShellSection(idealization=NO_IDEALIZATION,
199      integrationRule=SIMPSON, material='AA7075-O', name='Section-AA7075-O',
200      numIntPts=5, poissonDefinition=DEFAULT, preIntegrate=OFF, temperature=
201      GRADIENT, thickness=t0, thicknessField='', thicknessModulus=None,
202      thicknessType=UNIFORM, useDensity=OFF)
203
204  # Assign section
205  sheet.SectionAssignment(offset=0.0, offsetField='', offsetType=MIDDLE_SURFACE,
206      region=Region(faces=sheet.faces.getSequenceFromMask(mask=('[#3f ]', ), )),
207      sectionName='Section-AA7075-O', thicknessAssignment=FROM_SECTION)

```

Figura 3.6 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del material y sección y asignación de esta.

### 3.5 Mallado

Para generar un mallado uniforme simplemente se fija el número de particiones que habrá en los bordes o el tamaño de los elementos en estos bordes, líneas 237-242 Fig. 3.7, cuando se tienen definidos los suficientes bodes, se ejecuta el comando de el mallado, línea 243 Fig. 3.7. Con las particiones que se realizaron a la chapa se seleccionan los medios arcos de circunferencia que resultan de intersección de la línea de partición con el diámetro interior y la segunda partición de forma circunferencial cerca del exterior ( $d_{particion\_ext} = d_{ext} - 10 \text{ mm} = 110 \text{ mm}$ ) y se les impone un número de semillas para el mallado, este número se recoge del archivo de variables y según se haya fijado, si mallado fino o grueso, el número de particiones cada  $90^\circ$  puede ser de 45, si es mallado grueso, o 90, si se necesita una malla mas fina. Luego

se selecciona la línea de partición acotada por la partición exterior circunferencial y el agujero interior, y se impone un tamaño a los elementos de esa línea. El tamaño de estos elementos puede ser de 0.4 o 0.8 mm, según el grosor deseado en la mala, al igual que con las particiones circunferenciales, este valor se recoge del archivo de variables.

```

235  ### MESH ###
236  # Mesh sheet
237  sheet.seedEdgeByNumber(constraint=FIXED, edges=sheet.edges.getSequenceFromMask(
238  ['#355'], ), ), number=2*n_el_arc90)
239  sheet.seedEdgeByNumber(constraint=FIXED, edges=sheet.edges.getSequenceFromMask(
240  ['#a0'], ), ), number=n_el_partition)
241  sheet.seedEdgeByNumber(constraint=FIXED, edges=sheet.edges.getSequenceFromMask(
242  ['#a'], ), ), number=n_el_radial)
243  sheet.generateMesh()

```

Figura 3.7 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente al mallado de la chapa.

La herramienta y la matriz también se mallan, pero este mallado es menos relevante y no es necesario el nivel de uniformidad que se requiere en la chapa, pues no se deformarán. La metodología de mallado en la misma.

### 3.6 Ensamblaje de piezas

Hasta ahora se han definido los diferentes componentes del problema que se busca resolver con Abaqus pero es en este apartado donde se construye el problema, donde se ponen las tres partes que un mismo espacio donde interaccionarán. De aquí en adelante se seguirán definiendo factores necesarios para el correcto funcionamiento del modelo pero dentro de este problema que hemos ensamblado. Basicamente lo unico que se hace en este apartado es localizar las diferentes piezas en un mismo espacio tridimensional. A la chapa no es necesario aplicarle ningun desplazamiento ni rotacion, pues conviene por simplicidad que se mantenga el centro de esta pieza en el origen de coordenadas.

```

261  ### ASSEMBLY ###
262
263  assbl = md.rootAssembly
264  assbl.DatumCsysByDefault(CARTESIAN)
265  sheet1 = assbl.Instance(dependent=ON, name='Sheet-1', part=sheet)
266  plate1 = assbl.Instance(dependent=ON, name='Plate-1', part=plate)
267  tool1 = assbl.Instance(dependent=ON, name='Tool-1', part=tool)
268
269
270
271  assbl.rotate(angle=90.0, axisDirection=(1.0, 0.0, 0.0),
272  axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0), instanceList=('Tool-1', ))
273  assbl.rotate(angle=90.0, axisDirection=(1.0, 0.0, 0.0),
274  axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0), instanceList=('Plate-1', ))
275  assbl.translate(instanceList=('Plate-1', ), vector=(0, 0, -t0/2 - part_offset))
276
277  assbl.translate(instanceList=('Tool-1', ), vector=data_tooltip_loc)

```

Figura 3.8 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente al ensamblaje de las piezas en el modelo.

A la herramienta se le aplica un giro de 90° con respecto al eje X, esto es debido a que la posición de los sólidos discretos en Abaqus se controla mediante puntos de referencia asociados a estos e interesa que el

punto de referencia de la herramienta, que se encuentra en la superficie de esta se encuentre en la zona inferior de la herramienta, será el primer punto que entre en contacto con la chapa, por eso aplicamos ese giro, para encontrar la posición deseada del punto de referencia con respecto a la herramienta (sino no tendría sentido girar una esfera). A la matriz también se le aplica un giro de  $90^\circ$  con respecto al eje X para mantener paralelos el plano de la chapa y la matriz apoyo y además se le aplica una traslación en z negativa de la mitad del valor del espesor. Por último se realiza un traslación sobre la herramienta para llevarla a la posición inicial de la trayectoria, el valor de dicha posición (alojado en la variable 'data\_tooltip\_loc') se lee de los archivos de entrada mediante la función definida en el archivo de variables. En este punto una vez ubicada las partes del modelo, para que el problema esté completo, quedan por definir tanto las fuerzas como las condiciones de contorno y de contacto entre los elementos, el orden en que definamos estos tres aspectos es indiferente.

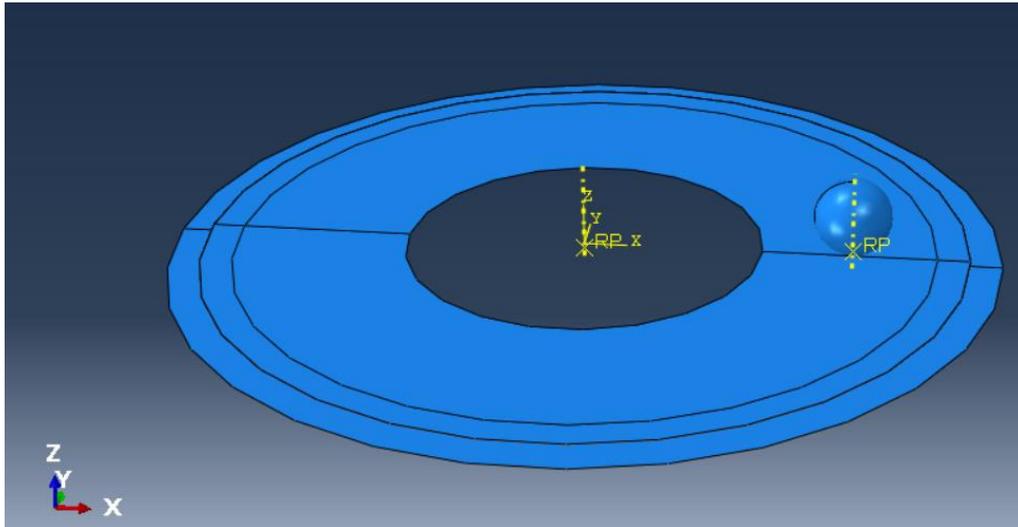


Figura 3.9 Imagen del visor de Abaqus, se muestran las distintas partes ensambladas, la herramienta situada en la posición inicial.

### 3.7 Definición de “Steps”

Los ‘steps’ en Abaqus definen las fases en las que se divide el proceso. Para cada fase se definen parámetros como el tiempo total de la fase y el incremento de tiempo para el cálculo de las variables del proceso. Posteriormente, las cargas y condiciones de contorno se definirán para cada fase de forma explícita: en la fase ‘Initial’, que se crea por defecto, se restringirá el movimiento de la matriz, mientras que el movimiento del punzón se aplicará en la fase siguiente. Cuando creamos un ‘Step’ nuevo, aparte de poder modificar algunos factores en relación con los procesos matemáticos internos del programa, hay que elegir el ‘Step’ precedente, para marcar en que momento comienza el ‘Step’ creado. El hecho de encontrarse en un ‘Step’ avanzado no significa que las fuerzas alojadas en los anteriores ‘Steps’ hayan dejado de aplicarse, y esto es un factor a tener en cuenta, pues existe la posibilidad de prorrogar cualquier ‘Step’ a través de los posteriores, lo cual se debe decidir según las fuerzas que estén definidas en dicho ‘Step’. Básicamente cuando se tienen varias etapas en la simulación, se definirán las condiciones de contorno en el ‘Step Initial’ y se prorrogan a todos los ‘Steps’ mientras que para cada etapa del proceso se define un ‘Step’ propio, donde se encontrarán las fuerzas referentes a esa etapa, este ‘Step’ deberá ser desactivado para el siguiente ‘Step’ referente des una etapa posterior, donde las fuerzas aplicada varían.

Adicionalmente Abaqus cuenta con la posibilidad de permitir al usuario qué variables desea que sean recogidas en la solución, pues ofrece una amplia variedad de ellas y si todas fueran recogidas el tamaño de los archivos de la solución serían mucho más elevados. Por tanto la elección de las variables a recopilar en la solución se hace mediante ‘FieldOutputRequest()’, línea 293 en la Fig. 3.10, y se encuentra asociado a

un cierto 'Step'. Puesto que la explicación del código y modelo se está centrando en el rebordeado de agujeros en una sola etapa, se define un único 'Step' adicional al que se denominará como 'SPIF in a single stage'. En las variables que se desean obtener en la solución son: 'S' tensión, 'LE' deformación logarítmica, 'PE' deformación plástica, 'PEEQ', deformación plástica equivalente, 'U' desplazamiento, 'RF', 'RT' y 'RM' corresponden a fuerzas y momentos de reacción, 'STH' espesor, 'COORD' coordenadas globales.

También en el 'FieldOutputRequest()' se encuentra la variable 'numIntervals', línea 295 en la Fig. 3.10, esta variable controla cada cuantos incrementos se recogerán y guardarán los datos de las variables del 'FieldOutputRequest()' pues se recoge la evolución temporal de todas estas variables. En procesos como el que está siendo estudiado, si se recoge la información de cada incremento el tamaño del archivo de solución puede llegar a los 100 Gb según el modelo y puede dificultar la investigación de estos procesos mediante EF, por tanto se reduce el número de veces que se recoge la información para trabajar con archivos de entre 10 y 20 Gb.

Por último, con respecto a que se podían definir aspectos relativos a los métodos numéricos de resolución, puede verse como el 'Step' creado es 'ExplicitDynamicsSteps', lo cual significa que se resolverán los problemas numéricos mediante Dinámica Explícita, lo cual tiene una ventaja en términos de tiempo de computación, pues al ser un caso cuasiestático el que se está tratando, los términos de inercia pueden ser despreciados y esto permite aplicar lo que se llama 'Mass Scaling'. La metodología de esta estrategia es escalar tanto la masa, o densidad, como la velocidad del ensayo por factores del orden de  $10^4$  y  $10^2$  respectivamente, produciendo un efecto muy positivo en términos de tiempo computacional, sin que la solución se vea prácticamente afectada.

```
287  ### STEPS ###
288
289  step1 = md.ExplicitDynamicsStep(name='SPIF in a single stage',
290      previous='Initial',timePeriod=time)
291  step1.setValues(scaleFactor=time_factor)
292
293  md.FieldOutputRequest(createStepName='SPIF in a single stage',
294      name='F-Output-1',variables=('S', 'LE', 'PE', 'PEEQ', 'U', 'STH', 'COORD'),
295      numIntervals=n_intervals)
```

Figura 3.10 Extracto del archivo 'model.py' de 'Abaqus scripting', parte del código referente a la creación del 'Step'.

### 3.8 Definición de los contactos

Las condiciones de contacto que se aplican son básicas, se define el contacto normal y tangencial, manteniendo las características que el programa aplica por defecto e imponiendo un coeficiente de rozamiento de 0.1. Las condiciones de contacto no tienen excesiva relevancia debido a que se trata de un proceso cuasiestático. Una vez se definen estas condiciones de contacto hay que definir entre qué superficies se darán los contactos definidos, lo único que debe tenerse en cuenta es que Abaqus requiere que se marquen una superficie del contacto como 'Esclava' y otra superficie como 'Maestra'. Simplemente debemos marcar como 'Maestra' la superficie que no vaya a deformarse, o que sea más dura, mientras que como 'Esclava' se marcará la superficie que vaya a deformarse por el contacto de la superficie 'Maestra'. Como es evidente las superficies 'Esclavas' serán las de la chapa, y las superficies 'Maestras' serán tanto la herramienta como la matriz, Fig 3.11.

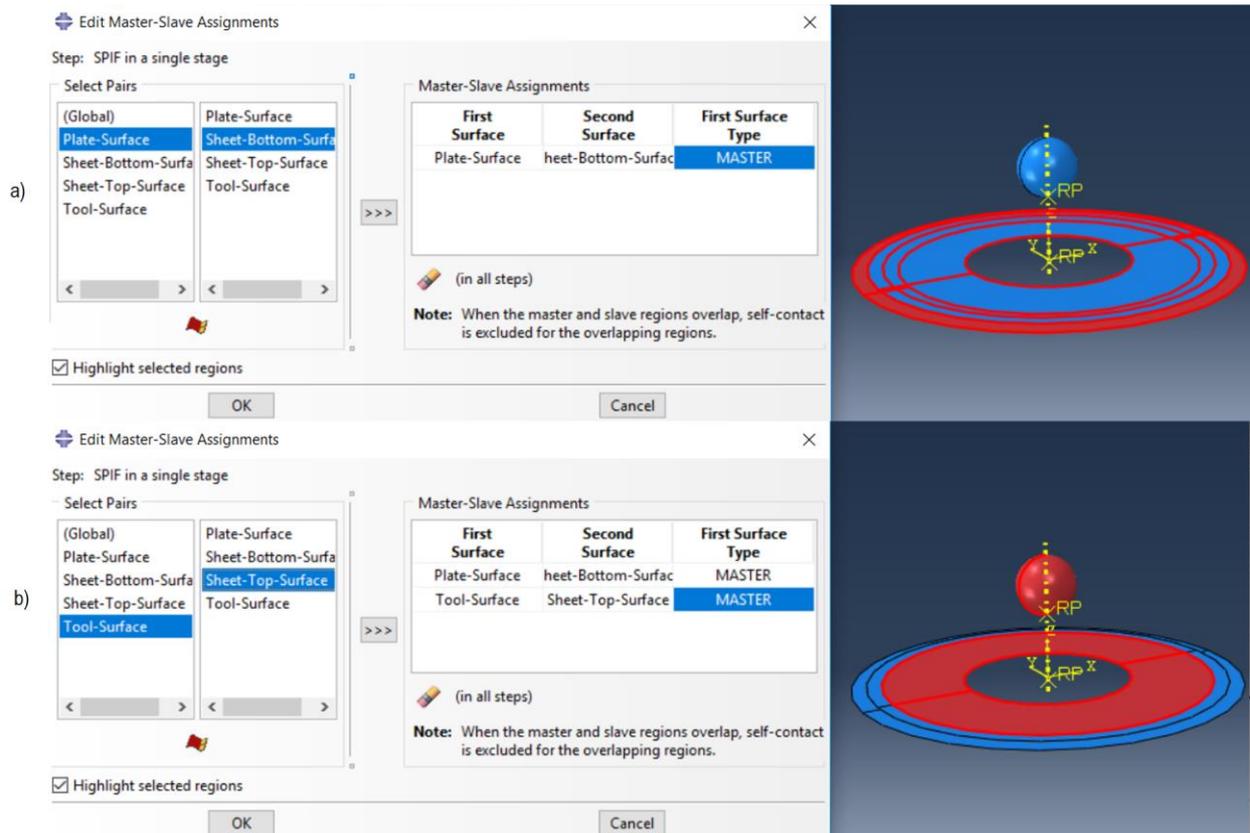


Figura 3.11 Definición de los tipos de superficies (Master-Slave) en la interacción en la interfaz de Abaqus.

```

309  ### CONTACTS ###
310  sheet_top_surf = md.rootAssembly.Surface(name='Sheet-Top-Surface',
311      side1Faces=sheet1.faces.getSequenceFromMask(['#5'], ), )
312  sheet_bottom_surf = md.rootAssembly.Surface(name='Sheet-Bottom-Surface',
313      side2Faces=sheet1.faces.getSequenceFromMask(['#f'], ), )
314  tool_surface = md.rootAssembly.Surface(name='Tool-Surface',
315      side1Faces=tool1.faces.getSequenceFromMask(['#1'], ), )
316  plate_surface = md.rootAssembly.Surface(name='Plate-Surface',
317      side1Faces=plate1.faces.getSequenceFromMask(['#3'], ), )
318  sheet_int = md.ContactExp(createStepName='SPIF in a single stage', name='Contact-Sheet')
319  sheet_int.includedPairs.setValuesInStep(stepName='SPIF in a single stage', useAllstar=ON)
320  sheet_int.contactPropertyAssignments.appendInStep(assignments=((GLOBAL, SELF,
321      'Contact-Properties'), ), stepName='SPIF in a single stage')
322  sheet_int.surfaceOffsetAssignments.appendInStep(assignments=((sheet_top_surf,
323      SPOS), (sheet_bottom_surf, SNEG), (tool_surface, ORIGINAL),
324      (plate_surface, ORIGINAL)), stepName='SPIF in a single stage')
325  sheet_int.masterSlaveAssignments.appendInStep(assignments=((sheet_top_surf,
326      tool_surface, SLAVE), (sheet_bottom_surf, plate_surface, SLAVE)),
327      stepName='SPIF in a single stage')

```

Figura 3.12 Extracto del archivo 'model.py' de 'Abaqus scripting', parte del código referente a la definición de las diferentes superficies y las condiciones de contacto entre éstas.

### 3.9 Condiciones de contorno

Se hará uso de las condiciones de contorno que ofrece Abaqus para modelar tanto las condiciones de contorno reales de nuestro problema con las fuerzas que intervienen a lo largo del proceso. Se ofrece una gran variedad de condiciones de contorno posibles, desde magnéticas o eléctricas a mecánicas, y dentro de las condiciones de contorno mecánicas encontramos también gran variedad, como condiciones de simetría

o antisimetría, de empotramiento, de desplazamiento y rotación y más que no serán necesarias. Se define en el ‘Step: Initial’ las condiciones de contorno de empotramiento para las tres partes del modelo.

```

330  ### BOUNDARY CONDITIONS ###
331
332  # Initial
333  md.EncastreBC(createStepName='Initial', name='BC-1-Encastre-Sheet',
334               region=Region(edges=sheet1.edges.getSequenceFromMask(mask=['#240'], ), ))
335  md.EncastreBC(createStepName='Initial', localCsys=None, name='BC-2-Encastre-Plate',
336               region=Region(referencePoints=plate_ref_point))
337  md.EncastreBC(createStepName='Initial', name='BC-3-Encastre-Tool',
338               region=Region(referencePoints=(tool1.referencePoints[2], )))

```

Figura 3.13 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la definición de las condiciones de contorno.

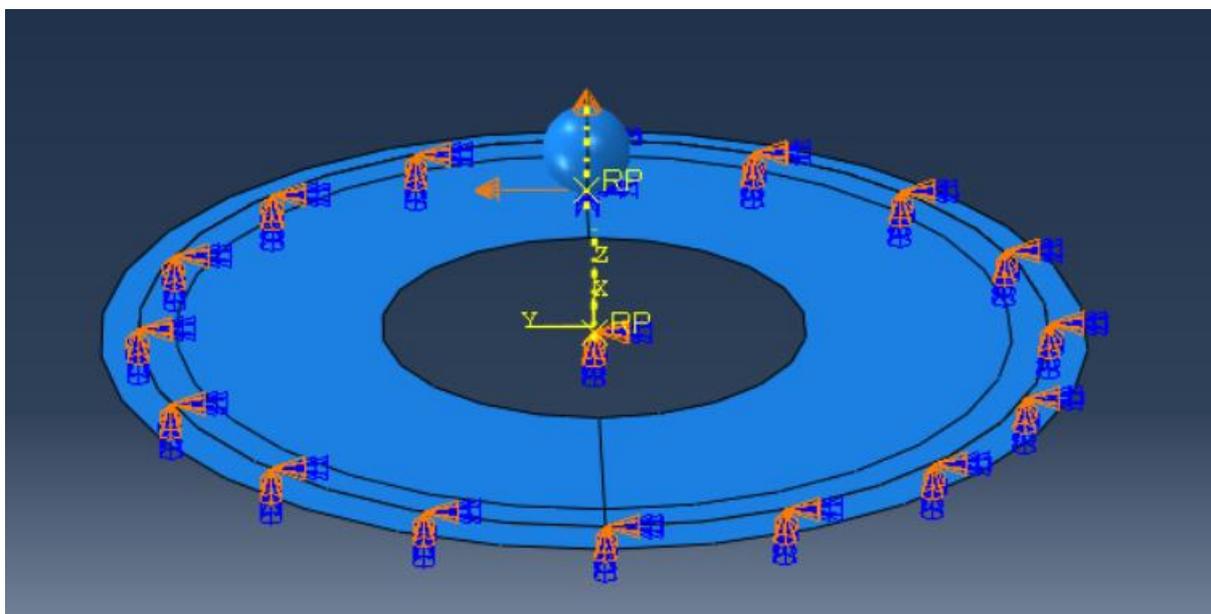


Figure 3.14 Condiciones de contorno visualizadas en la interfaz de Abaqus.

En el segundo ‘Step’: ‘SPIF in a single stage’ se desbloquea la herramienta y realiza el movimiento. Como se puede ver por ejemplo en la línea 345 Fig. 3.15, perteneciente a la condición de contorno sobre la herramienta para eliminar los grados de libertad de rotación y evitar esta rotación, en las condiciones de contorno de desplazamiento y rotación se pueden elegir los grados de libertad sobre los que se quiere influir con dicha condición de contorno. Por tanto, para introducir la trayectoria de la herramienta, como se ve en las líneas 350, 355 y 360, respectivamente para las coordenadas ‘x’, ‘y’, ‘z’, cada condición de desplazamiento solo influye sobre una coordenada y se está imponiendo sobre esta coordenada un desplazamiento unidad, no una variable. Esto se debe a que previamente a la definición de la condición de desplazamiento, Abaqus permite la opción de crear amplitudes introduciendo parejas de valores. La condición de desplazamiento en vez de ser un valor constante en el tiempo, con esta amplitud que se asocia a la condición de desplazamiento varía el valor de este desplazamiento según el tiempo. El uso de amplitudes está restringido a ‘Steps’ que no sean ‘Initial’.

Abaqus ofrece un amplio abanico de amplitudes, pero se hará uso de las amplitudes tabulares, es decir, se introducen pareja de valores tiempo-desplazamiento, y ese desplazamiento después será multiplicado por el valor dado en la condición de contorno, en este caso, valor unidad. De las amplitudes, es decir las trayectorias de la herramienta, se hablará más adelante pero simplemente remarcar cómo hay una amplitud para cada coordenada asociada a cada condición de desplazamiento donde solo se influye sobre dicha coordenada, así se consigue la trayectoria de la herramienta deseada.

```

340 # STEP 1: Un-encastre and move tool
341 md.boundaryConditions['BC-3-Encastre-Tool'].deactivate('SPIF in a single stage')
342 md.DisplacementBC(amplitude=UNSET, createStepName='SPIF in a single stage',
343     distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF, localCsys=None,
344     name='BC-4-NoRotation-Tool', region=Region(referencePoints=(tool1.referencePoints[2], )),
345     u1=UNSET, u2=UNSET, u3=UNSET, ur1=0.0, ur2=0.0, ur3=0.0)
346 md.TabularAmplitude(data=data_toolpath_X, name='Amp-X', smooth=SOLVER_DEFAULT, timeSpan=STEP)
347 md.DisplacementBC(amplitude='Amp-X', createStepName='SPIF in a single stage',
348     distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF, localCsys=None,
349     name='BC-5-Move-Tool-X', region=Region(referencePoints=(tool1.referencePoints[2], )),
350     u1=1.0, u2=UNSET, u3=UNSET, ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET)
351 md.TabularAmplitude(data=data_toolpath_Y, name='Amp-Y', smooth=SOLVER_DEFAULT, timeSpan=STEP)
352 md.DisplacementBC(amplitude='Amp-Y', createStepName='SPIF in a single stage',
353     distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF, localCsys=None,
354     name='BC-6-Move-Tool-Y', region=Region(referencePoints=(tool1.referencePoints[2], )),
355     u1=UNSET, u2=1.0, u3=UNSET, ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET)
356 md.TabularAmplitude(data=data_toolpath_Z, name='Amp-Z', smooth=SOLVER_DEFAULT, timeSpan=STEP)
357 md.DisplacementBC(amplitude='Amp-Z', createStepName='SPIF in a single stage',
358     distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF, localCsys=None,
359     name='BC-7-Move-Tool-Z', region=Region(referencePoints=(tool1.referencePoints[2], )),
360     u1=UNSET, u2=UNSET, u3=1.0, ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET)

```

Figura 3.15 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la asignación de trayectorias a la herramienta.

### 3.10 Definición de “Jobs”

A la hora de resolver un modelo, Abaqus crea un ‘Job’, un ‘trabajo’ donde se recogen todas las propiedades del modelo que se desea resolver en el momento de la creación de este, de tal forma que las modificaciones posteriores en el modelo no influirán a dicho trabajo. Se puede ver como opciones relativas a la computación también están disponibles. Una vez el trabajo se encuentra creado, este se presenta para ser resuelto (‘Submit job’), el programa estudia el modelo y si se encuentran todos los aspectos necesarios para comenzar la resolución, esta se pone en marcha. El trabajo se abortará si se producen inestabilidades o errores durante la resolución.

```

367 ### JOB AND CALCULATE ###
368 precision = DOUBLE # SINGLE or DOUBLE
369 mdb.Job(atTime=None, contactPrint=OFF, description='', echoPrint=OFF,
370     explicitPrecision=precision, getMemoryFromAnalysis=True, historyPrint=OFF,
371     memory=90, memoryUnits=PERCENTAGE, model=abaqus_model, modelPrint=OFF,
372     multiprocessingMode=DEFAULT, name=jobname, nodalOutputPrecision=SINGLE,
373     numCpus=num_CPUs, numDomains=num_CPUs, queue=None, scratch='',
374     type=ANALYSIS, userSubroutine='', waitHours=0, waitMinutes=0)

```

Figura 3.16 Extracto del archivo ‘model.py’ de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del ‘Job’.

### 3.11 Optimización mediante la opción “RESTART”

Una vez se conocen las diferentes características que componen un MEF, se va a proponer una forma de trabajo con Abaqus para la investigación de estrategias SPIF en varias etapas. Como se ha comentado, el rendimiento computacional requerido para la resolución de modelos SPIF es bastante alto, y si no se trabaja con ordenadores verdaderamente potentes, el tiempo de resolución de los modelos puede ser un contratiempo serio a la hora de investigar nuevas estrategias de conformado y buscar la optimización del proceso, del mismo modo la cantidad de datos generados es muy elevada y se puede tener problemas de memoria de almacenamiento. Para paliar

estos factores negativos, los cuales serían aún más críticos a la hora de estudiar estrategias de conformado por SPIF multi-etapa, se emplea la opción ‘restat’ para el tipo de ‘trabajo’ que ofrece Abaqus, Fig. 3.17. El objetivo es poder utilizar un modelo donde se resuelvan únicamente la primera o las primeras etapas y utilizarlo como punto de inicio para probar diferentes estrategias para etapas posteriores. Así se evita que tenga que resolverse todo el modelo cada vez que se ensaya una estrategia diferente, ahorrando de este modo tiempo y espacio de almacenamiento.

La metodología para llevarlo a cabo se explicará seguidamente, pero debe saberse que este nuevo ‘trabajo’ se generará mediante la lectura de un nuevo archivo de ‘Abaqus scripting’ que se ha desarrollado, el cual se ha denominado ‘model\_2.py’ y esta particularizado para realizar la segunda etapa del proceso.

```

147  ### JOB AND CALCULATE ###
148  precision = DOUBLE # SINGLE or DOUBLE
149  mdb.Job(atTime=None, contactPrint=OFF, description='', echoPrint=OFF,
150         explicitPrecision=precision, getMemoryFromAnalysis=True, historyPrint=OFF,
151         memory=90, memoryUnits=PERCENTAGE, model=abaqus_model, modelPrint=OFF,
152         multiprocessingMode=DEFAULT, name=job_name,
153         nodalOutputPrecision=SINGLE, numCpus=num_CPUS, numDomains=num_CPUS,
154         queue=None, scratch='', type=RESTART, userSubroutine='', waitHours=0,
155         waitMinutes=0)

```

Figura 3.17 Extracto de archivo model\_2.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del ‘Job’.

Para poder usar la opción ‘restart’ se debe tener al menos un ‘trabajo’ tipo ‘analysis’, Fig. 3.16 y línea 68 Fig. 3.18, resuelto dentro del archivo ‘.cae’, línea 66 Fig. 3.18. Este primer ‘trabajo’ define el punto de inicio del ‘trabajo’ tipo ‘restat’ y se puede elegir cual ‘step’ del primer ‘trabajo’ servirá como punto inicial del nuevo trabajo, línea 70 Fig. 3.18. De tal forma que, particularmente en nuestro modelo, el segundo ‘trabajo’ será un reinicio del primero a partir del ‘step’ definido después de que la herramienta complete la primera etapa y donde se define una trayectoria para que la herramienta vuelva a la posición inicial el cual se ha denominado ‘SPIF retract’. Hay que aclarar que el ‘step’ se incluye en el modelo reiniciado y temporalmente la nueva resolución comienza después de este ‘step’.

```

66  openMdb(abaqus_model)
67  md = mdb.models[abaqus_model]
68  job_name_rest= abaqus_model+'-1'
69  job_name= abaqus_model + '-2'
70  md.setValues(restartJob= job_name_rest , restartStep='SPIF retract')

```

Figura 3.18 Extracto de archivo model\_2.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación del ‘Job’.

Abaqus permite añadir o modificar algunas características al modelo, el cual ha sido ya resuelto en un ‘trabajo’ tipo ‘analysis’, de forma previa a la creación del ‘trabajo’ tipo ‘restart’, mediante la creación de ‘Steps’ adicionales, de tal forma que no se puede modificar nada relacionado con el ‘Emsamblaje’ del modelo, es decir, introducir geometrías o modificar condiciones de contacto, sin embargo, sí permite cambiar las condiciones de contorno y, por consiguiente, en lo que respecta a SPIF, la trayectoria de la herramienta.

Una vez esté definido el trabajo que va a ser reiniciado y el ‘step’ desde el cual se reiniciará, simplemente deben definirse nuevos ‘steps’ en los que se desactivarán las antiguas trayectorias, Fig. 3.19 líneas 115, 124, 133, y se impondrán nuevas, las cuales representarán la trayectoria de la herramienta en esta segunda etapa. Se definen dos nuevos ‘steps’, uno para mover la herramienta al punto inicial de la trayectoria si fuera necesario, según el tipo de estrategia que vaya a seguirse en la segunda etapa, y otro para definir la trayectoria de la herramienta en la segunda etapa. Una vez se han definido las nuevas condiciones de contorno ya puede crearse el nuevo ‘trabajo’, Fig. 3.17.

```

114  ##BC for the 2 stage
115  md.boundaryConditions['BC-5-Move-Tool-X'].deactivate('SPIF second stage')
116  md.TabularAmplitude(data=data_toolpath2_X, name='Amp2-X',
117                      smooth=SOLVER_DEFAULT, timeSpan=STEP)
118  md.DisplacementBC(amplitude='Amp2-X', createStepName='SPIF second stage',
119                  distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF,
120                  localCsys=None, name='BC-5-Move2-Tool-X', region=Region(referencePoints=(
121                      mdb.models[abaqus_model].rootAssembly.instances['Tool-1'].referencePoints[2], )),
122                  u1=1.0, u2=UNSET, u3=UNSET, ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET)
123
124  md.boundaryConditions['BC-6-Move-Tool-Y'].deactivate('SPIF second stage')
125  md.TabularAmplitude(data=data_toolpath2_Y, name='Amp2-Y', smooth=SOLVER_DEFAULT,
126                      timeSpan=STEP)
127  md.DisplacementBC(amplitude='Amp2-Y', createStepName='SPIF second stage',
128                  distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF,
129                  localCsys=None, name='BC-6-Move2-Tool-Y', region=Region(referencePoints=(
130                      mdb.models[abaqus_model].rootAssembly.instances['Tool-1'].referencePoints[2], )),
131                  u1=UNSET, u2=1.0, u3=UNSET, ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET)
132
133  md.boundaryConditions['BC-7-Move-Tool-Z'].deactivate('SPIF second stage')
134  md.TabularAmplitude(data=data_toolpath2_Z, name='Amp2-Z',
135                      smooth=SOLVER_DEFAULT, timeSpan=STEP)
136  md.DisplacementBC(amplitude='Amp2-Z', createStepName='SPIF second stage',
137                  distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF,
138                  localCsys=None, name='BC-7-Move2-Tool-Z', region=Region(referencePoints=(
139                      mdb.models[abaqus_model].rootAssembly.instances['Tool-1'].referencePoints[2], )),
140                  u1=UNSET, u2=UNSET, u3=1.0, ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET)

```

Figura 3.19 Extracto de archivo model\_2.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la creación de las trayectorias para la segunda etapa.

### 3.12 Extracción de resultados

El objetivo por el cual se ha introducido información relativa a ‘Abaqus scripting’, es debido a la gran ventaja que ofrece en cuanto a optimización del tiempo cuando se trabaja con software de EF, y se anima a trabajar con esta herramienta en futuras investigaciones en este campo o similares.

Abaqus dispone de dos módulos, el módulo de generación de modelos, del cual se ha hablado en la sección anterior y el módulo de visualización de resultados. Los modelos generados en una sesión de Abaqus se almacenan en archivos ‘CAE’ al cual está asociado el archivo ‘JNL’ de ‘Abaqus scripting’, y cuando se genera un trabajo(‘Job’) la información de este se almacena en un archivo ‘ODB’ el cual se lee desde el módulo de visualización de resultados de Abaqus. A modo de apunte, el archivo ‘ODB’ es legible antes de que el trabajo se haya resuelto totalmente, y muestra hasta el instante temporal que se haya resultado hasta el momento, lo cual es útil para comprobar que el modelo que se ha realizado es correcto, así como las trayectorias introducidas.

Una vez se encuentra resuelto el trabajo y el archivo ‘ODB’ completo, se tienen múltiples opciones en la interfaz para obtener información sobre la solución y cada comando ejecutado en el módulo o interfaz de visionado se almacena en lenguaje ‘Abaqus scripting’ en un archivo ‘RPY’ con el mismo nombre del archivo ‘ODB’ visionado, de forma similar a lo que ocurría en la generación del modelo. Gracias a este archivo ‘RPY’ puede construirse el archivo ‘results.py’.

La extracción de resultados se realiza mediante la ejecución del archivo ‘results.py’, primeramente, debe abrirse el archivo ‘ODB’, línea 55 Fig. 3.20, cuyo nombre se recoge del archivo ‘variables.py’, que contiene el modelo resuelto y se cuadra la figura en la pantalla de visualización para obtener las imágenes, línea 73 Fig. 3.20, adicionalmente debe fijarse la variable que se desea mostrar en la imagen, líneas 64, 65 Fig. 3.20. La estructura de este archivo varía según nuestras necesidades a la hora de analizar la pieza, según nos interese la evolución temporal o las características finales de la pieza. Siempre que se abre un archivo ‘ODB’ se muestra el estado final de la pieza, por tanto, no haría falta definir el instante temporal si solo queremos analizar el estado final de la pieza.

```

55 o1 = session.openOdb(name=odb_filename)
56 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=o1)
57 session.viewports['Viewport: 1'].odbDisplay.display.
58     setValues(plotState=(CONTOURS_ON_DEF, ))
59
60 ### FINAL FRAME ###
61 image = file_prefix_image + '_end'
62 report = file_prefix_report + '_end.rpt'
63 # Plot sheet thickness: STH
64 session.viewports['Viewport: 1'].odbDisplay.setPrimaryVariable
65     (variableLabel='STH', outputPosition=INTEGRATION_POINT, )
66 session.viewports['Viewport: 1'].odbDisplay.contourOptions.setValues
67     (maxAutoCompute=OFF, maxValue=0.001601, minAutoCompute=OFF, minValue=0.0006)
68 session.viewports['Viewport: 1'].view.setValues
69     (nearPlane=0.34039, farPlane=0.584284, width=0.12236, height=0.0600637,
70     cameraPosition=(-0.380799, -0.23464, -0.123521), cameraUpVector=
71     (0.0564402, 0.0357163, 0.997767), viewOffsetX=-0.00475415, viewOffsetY=-0.00272785)
72 print "Image to file: ", image
73 session.printToFile(fileName=image, format=PNG, canvasObjects=
74     (session.viewports['Viewport: 1'], ))

```

Figura 3.20 Extracto de archivo results.py de ‘Abaqus scripting’, parte del código referente a la apertura del archivo del cual se quiere obtener información y a la toma de imágenes.

Si por el contrario nos interesa la evolución temporal puede definirse una función, Fig. 3.21, o un bucle ‘for’ o ‘while’ que vaya generando datos e imágenes cada intervalo temporal que marquemos, estos intervalos se encuentran definidos como ‘frames’ en Abaqus. Es importante controlar el nombre de los archivos cuando se desea analizar la evolución temporal, los nombres de estos se generan de forma previa a la extracción de datos e incorporan el ‘frame’ al que pertenecen dichos datos, línea 123 y 127 Fig. 3.21.

De esta forma pueden extraerse todas las variables que se hayan marcado en el ‘FieldOutputRequest( )’, en concreto en la imagen 3.21 se muestra únicamente la variable Espesor (‘STH’), línea 132 Fig. 3.21, por motivos de claridad en la explicación, pero se podrían incluir todas las variables que se deseen dentro de la misma función o bucle y que estas se introduzcan en el mismo ‘report’. Otro aspecto a resaltar en cuanto a la extracción de resultados se refiere, y como se aprecia en la línea 132 Fig.3.21, es el ‘path’ (camino) al que se encuentran asociadas las variables obtenidas. El ‘path’ representa un numero de elementos o nodos de los cuales la información es obtenida y plasmada en el ‘report’. Los ‘path’ que se definen en este caso van en la dirección radial, a lo largo del flanco y la forma de definir estos puede variar. Una de las formas mas simples, la cual se utiliza ha utilizado en esta ocasión, es definir el ‘path’ en la situación indeformada mediante una lista de puntos, líneas 132 y 133 Fig. 3.21, y es el programa el que asocia estos puntos con el elemento o nodo mas adecuado, el ‘path’ debe estar definido de forma previa.

A todos estos archivos que contienen la información cruda, se les suma un archivo de Python, donde se trabaja con los módulos de ‘Numpy’ y ‘Matplotlib’ para leer la información de los informes fácilmente y poder graficarla de forma que sea analizable. De esta forma se obtendrán todos los resultados de los modelos de EF que se realicen a lo largo de este trabajo.

```

120 ### FRAME fr ###
121 def save_report(step, frame):
122     if step=='SPIF stage 1':
123         str_fr = '_stage1_%05d' % frame
124     #if step=='SPIF stage 2':
125     #     str_fr = '_stage2_%05d' % frame
126     image = file_prefix_image + str_fr
127     report = file_prefix_report + str_fr + '.rpt'
128
129     session.viewports['Viewport: 1'].odbDisplay.setFrame(step=0, frame=frame)
130     session.viewports['Viewport: 1'].odbDisplay.setPrimaryVariable
131         (variableLabel='STH', outputPosition=INTEGRATION_POINT, )
132     xySTH = session.XYDataFromPath(name='STH', path=pth2,includeIntersections=False,
133         pathStyle=PATH_POINTS, numIntervals=10,shape=UNDEFORMED, labelType=TRUE_DISTANCE)
134
135     print "Image to file: ", image
136     session.printToFile(fileName=image, format=PNG, canvasObjects=(session.viewports['Viewport: 1'], ))
137     print "Report to file: ", report
138     session.writeXYReport(fileName=report, appendMode=OFF, xyData=(xySTH))

```

Figura 3.21 Comandos para el archivo results.py de 'Abaqus scripting', código referente a la extracción de información según el instante temporal.



# 4 VERIFICACIÓN DEL MODELO MEDIANTE RESULTADOS EXPERIMENTALES

## 4.1 Caracterización del material

Para llevar a cabo un buen diseño y análisis de procesos SPIF mediante simulaciones numéricas lo primero es tener un conocimiento profundo del comportamiento del material. Para los ensayos que se van a realizar se han utilizado las leyes de comportamiento para el aluminio AA7075-O que halló Borrego et al. [4] para su tesis doctoral.

Para el desarrollo de esta ley de comportamiento se realizaron varios ensayos para tener información del comportamiento del material según los niveles de deformación sufridos.

Se comenzó por una serie de ensayos de tracción, para determinar la zona elástica y plástica hasta una deformación ingenieril de 0.12, se realizaron 3 ensayos para cada dirección (0°, 45° y 90°) y así tener una idea del comportamiento anisótropo del material, el cual es prácticamente despreciable, asumiendo la isotropía del material se reduce la complejidad del MEF y se aceleran las simulaciones, además como se ha comprobado que los coeficientes de anisotropía de Lankford obtenidos experimentalmente no difieren en exceso con un comportamiento isotrópico, confirma Borrego et al. [2], sobre todo en trabajos como de Lui et al.[29] y Durante et al. [30], se confirman que tener en cuenta la anisotropía del material no resulta determinante para el proceso de SPIF. Adicionalmente se llevan a cabo dos test adicionales para obtener una ley de comportamiento que abarque altos niveles de deformación. Este proceso exige una alta demanda en cuanto a deformaciones, y gracias al ensayo de compresión y a la suposición de isotropía antes comentada, ha sido posible obtener una ley de comportamiento para introducir en el MEF definida hasta valores de deformaciones cercanos a 1.2, Fig. 4.1.

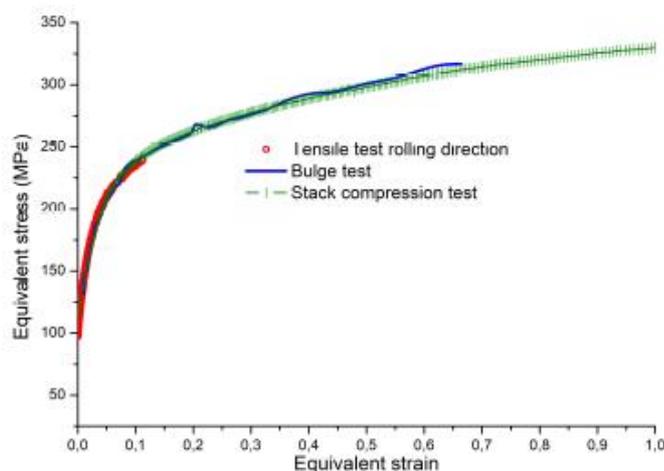


Figura 4.1 Gráfica tensión-deformación con los resultados de los tres ensayos realizados para generar la ley de comportamiento para AA7075-O.

Además de obtener una ley de comportamiento, en pos de ser capaces de analizar las deformaciones a lo largo del flanco y de controlar o medir el fallo de la pieza se deben obtener las curvas para el FLD. Para determinar estas curvas FLC y FFL para lámina de aluminio AA7075-O y espesor 1.6 mm Borrego realizó ensayos de Nakazima.

En los ensayos de Nakazima, se utilizaron piezas de distintas geometrías para generar distintos estados tensionales; tensión uniaxial, usando una lámina estrecha, estado de tensión plana, ensayando una lámina rectangular, tensión biaxial y equibiaxial, ensayando láminas circulares. Gracias a un software de correlación de imágenes digitales fueron capaces de conocerse las deformaciones principales que se dan sobre las piezas ensayadas, a las cuales se les aplica una les aplica el estado de tensión mediante la acción de un punzón, como puede verse en Fig. 4.2. El ensayo fue realizado siguiendo la norma ISO correspondiente, donde se detallan factores como la velocidad del punzón, a 1 mm/s, y se tiene especial cuidado en evitar la fricción construyendo un sistema tribológico entre el punzón y la lámina compuesto por tres capas de vaselina y dos capas de teflón intercaladas entre sí. Adicionalmente se sigue la metodología propuesta por Martínez-Donaire et al [31] para hallar el comienzo de la formación del cuello, finalmente la curva FLC obtenida para el material ensayado presenta la típica forma de V típica de materiales dúctiles. Por otro lado, para determinar la curva FFL, se detecta mediante el software de procesamiento de imágenes el punto exacto de inicio de la grieta y a posteriori el espécimen es cortado transversalmente y el espesor es medido en la zona de rotura para hallar las deformaciones principales en el punto de rotura. Varios especímenes del mismo tipo fueron ensayados para comprobar la consistencia de la solución, del mismo modo se añade un intervalo de dispersión del 10% teniendo en cuenta la incertidumbre de la determinación empírica.

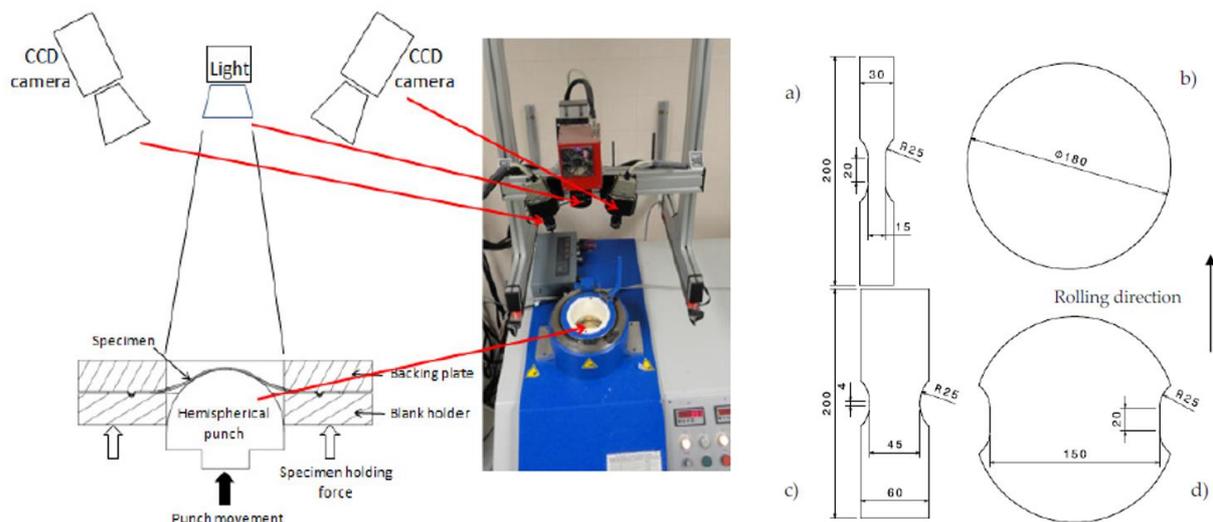


Figura 4.2 Disposición del ensayo de laboratorio para realizar ensayos de Nakazima y generar la información (izquierda). Distintas geometrías ensayadas en los ensayos de Nakazima para generar distintas situaciones tensionales (derecha).

Adicionalmente Borrego et al., analizaron unos ensayos de estiramiento y doblado para analizar la influencia del radio del punzón en el fallo por estricción en operaciones de prensado convencionales, la cuales no son estudiadas en este documento, sin embargo guarda cierta relación con la formación de cuellos en SPIF, que como se vio con radios de herramienta pequeña, la estricción llegaba a evitarse completamente y con radios superiores se lograba posponer, razonamientos que encajan con los resultados de este ensayo, a pesar que la estricción es inevitable en operaciones tradicionales. La Fig. 4.3 muestra el FLD del material con las curvas FLC para el fallo por estricción y FFL por fractura.

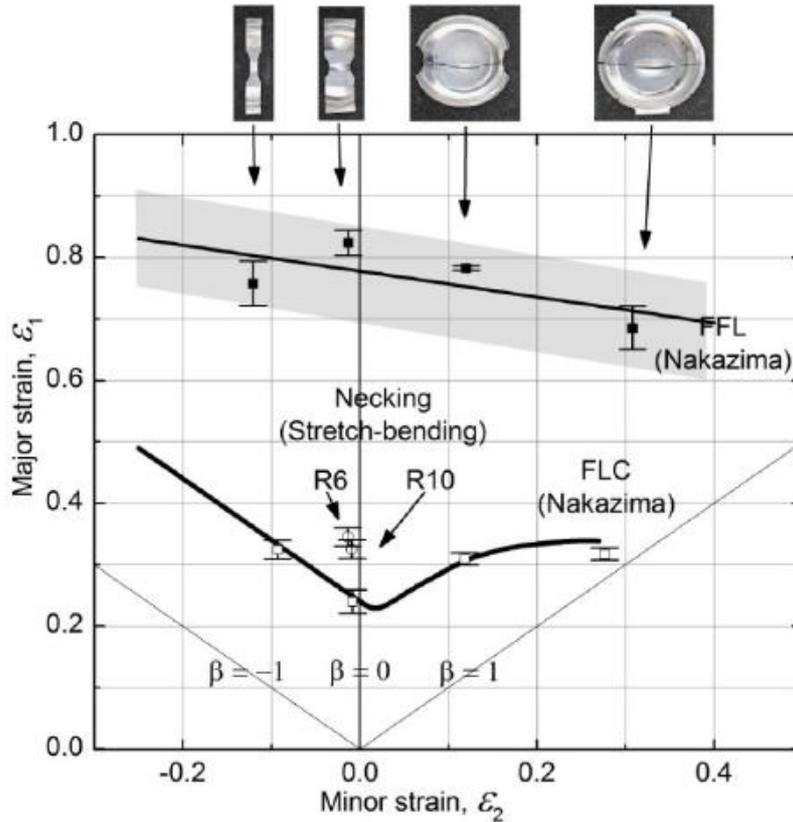


Figura 4.3 Diagrama de conformado límite (FLD) para AA7075-O.

## 4.2 Ensayos experimentales empleados y adaptación del modelo

Haciendo uso de los resultados de los ensayos experimentales que Borrego et al. [3] realizaron, se va a realizar un estudio para analizar la capacidad de Abaqus para reproducir fielmente la operación de rebordeado de agujeros mediante SPIF, así como para medir los errores. Se reproducirán tanto las condiciones del ensayo, así como la trayectoria de la herramienta y se compararán los resultados de las distintas variables medidas en los ensayos experimentales. Adicionalmente haciendo uso de investigaciones previas, se realizará un segundo estudio para analizar el comportamiento del MEF frente a deformaciones estables, pero de valor muy elevado.

Se han elegido como ensayos a reproducir los siguientes:

- Rebordeado de agujero circular en una sola etapa con agujero inicial 56 mm y agujero rebordeado de 95.8 mm, realizado con una herramienta de 10 mm de radio. Ensayo fallido.
- Rebordeado de agujero circular en una sola etapa con agujero inicial 58 mm y agujero rebordeado de 95.8 mm, realizado con una herramienta de 10 mm de radio. Ensayo completado satisfactoriamente.
- Rebordeado cónico en una sola etapa con una pendiente de 64° en una chapa sin agujero y un diámetro final de 95.8 mm en la base del cono, realizado con una herramienta de 6 mm de radio. Ensayo completado satisfactoriamente.

Se han optado por los dos primeros ensayos estudiados pues representan el horizonte tecnológico del proceso para rebordeado de agujero mediante SPIF en una etapa, lo cual sirve como un elemento adicional para la comparación entre simulación numérica y ensayo experimental y de gran importancia.

Por otro lado, el tercer modelo que se estudiará representa el cono rebordeado mediante SPIF experimentalmente con mayor ángulo de pared, cuyo flanco, pese a haber sido rebordeado satisfactoriamente alberga unas deformaciones superiores a las marcadas por las FFL en el FLD.

La disposición del ensayo experimental para el rebordeado de agujeros mediante SPIF en una etapa es la que se muestra en la Fig. 4.4, donde se puede ver la herramienta esférica, el plato de apoyo circular y la chapa ya rebordeada circularmente. El modelo que proponen Morales-Palma et al. [5] y que se ha adoptado se adapta

notablemente bien a esta disposición, donde la brida de agarra ('blank holder') se ha sustituido por una condición de contorno de encastre.

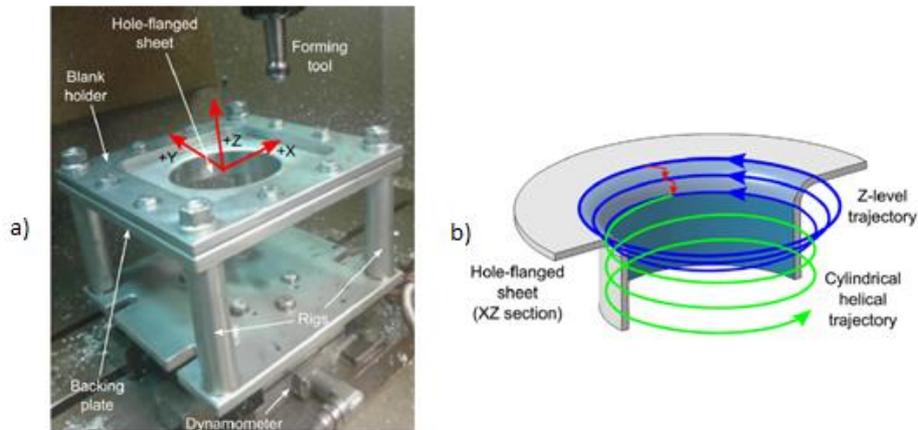


Figura 4.4 Imagen de la disposición en el ensayo de laboratorio con el agujero ya rebordeado (derecha). Esquema de la trayectoria y la pieza final (izquierda).

Una vez se tiene un modelo en Abaqus semejante al ensayo real, debe obtenerse la trayectoria. Como se aprecia en la Fig. 4.4 (b), la trayectoria utilizada consta de dos partes, una parte inicial que sigue la estrategia 'z-level' que ya se ha comentado anteriormente, donde a la vez de bajar en vertical también se reduce el radio levemente para crear un pequeño radio de curvatura antes de empezar con una estrategia helicoidal cilíndrica para la mayor parte del rebordeado. La trayectoria se generó a través del programa CATIA, y se han obtenido las componentes 'x', 'y', 'z' de ésta directamente del autor del ensayo. Se trata de una trayectoria que tiene 19438 incrementos en total, contando con una primera etapa de aproximación y con la retirada de la herramienta al terminar el proceso. Sin embargo, la trayectoria original no contiene la evolución temporal de las coordenadas, pero sí se sabe, que en los ensayos la máquina funcionó a una velocidad de 1000 mm/min, por tanto, imponiendo esa velocidad entre los distintos incrementos se obtiene la dependencia temporal de las coordenadas con facilidad, además se sigue aplicando el 'Mass Scaling' explicado en el apartado 'Creación de Steps' del capítulo anterior.

La disposición de laboratorio del ensayo experimental del rebordeado cónico mediante SPIF es similar a la empleada en el rebordeado de agujeros y las trayectorias para este ensayo también se obtuvieron mediante CATIA, en este caso si se dispone de la dependencia temporal a la cual aplicamos directamente el 'Mass Scaling', la herramienta se desplaza también a una velocidad de 1000 mm/min en este ensayo y sigue una estrategia 'z-level' con un número total de 1666308 incrementos, Fig. 4.5.

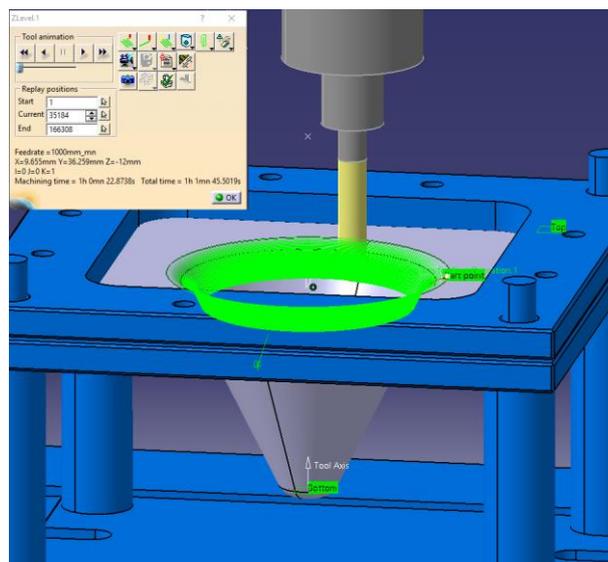


Figura 4.5 Simulación y generación de trayectoria para el ensayo de laboratorio mediante CATIA para rebordeado cónico mediante SPIF.

### 4.3 Comparación de resultados

En la sección ‘Rebordeado de agujeros’ se comentaron las herramientas que suelen usarse para evaluar este tipo de procesos. Puesto que en procesos como este, incrementales, la deformación del material es más compleja que en procesos convencionales, ya que en estos procesos no se llega a planchar (ironing) el material de los flancos, se decidió que el HER, a pesar de ser un parámetro que ofrece a grandes rasgos una idea del nivel de deformación que el material sufrirá durante el proceso, no proporcionaba todo el detalle necesario, sin embargo, se cuenta con herramientas más potentes para analizar las deformaciones a lo largo del proceso y a lo largo de flanco rebordeado, esta herramienta, la cual ya se ha nombrado numerosas veces, es el Diagrama de Conformado Limite (FLD), el cual se obtiene gracias a los ensayos de Nazakima que Borrego et al. [2] realizaron.

#### 4.3.1 Rebordeado de agujero de diámetro inicial 56 mm

Primeramente, van a analizarse los modelos de rebordeado de agujero mediante SPIF en una sola etapa. La primera comparación que se realizará entre simulación numérica y ensayo experimental será mediante el FLD, donde definiendo un camino (‘path’) en dirección vertical a lo largo del flanco rebordeado puede verse el nivel y estado de deformación del material en cada zona del flanco. La segunda comparación se realizará mediante las fuerzas verticales que intervienen en el proceso, las cuales, debido a las oscilaciones de ésta, naturales del proceso incremental, van a ser complejas de reproducir numéricamente, sumado a la incertidumbre en la medición experimental. Sin embargo, lo que se busca es una semejanza entre los valores medios, para tener una noción de las fuerzas que intervendrán en el proceso experimental cuando éste se esté diseñando y probando mediante esta herramienta de EF. Este parámetro es relevante en el diseño de operaciones SPIF pues la fuerza máxima requerida en el proceso no debe superar a la fuerza máxima alcanzable por la máquina. En los ensayos se utilizó una máquina CNC cuya fuerza máxima aplicable es 4 KN.

En el caso del ensayo experimental las fuerzas se recogen mediante un dinamómetro, como se señala en la Fig. 4.4 (a). Por otro lado, en la simulación numérica la fuerza vertical se obtiene mediante la reacción que sufre el punto de referencia de la herramienta. Debe de recordarse que en la simulación se ha realizado lo que se conoce como ‘Mass Scaling’ para reducir el tiempo de computación, gracias a que la resolución numérica se realizará mediante el método explícito. Para realizar este ‘Mass Scaling’ se multiplica la velocidad y la masa por valores de  $10^2$  y  $10^4$  respectivamente, por tanto para poder comparar las fuerzas, se necesita dividir los valores temporales por el coeficiente de escalado de la velocidad. La masa por otro lado no influye en los datos recogidos, pues los términos de inercia que podrían influir en la fuerza son despreciables ya que puede considerarse un proceso cuasiestático.

La simulación numérica del rebordeado en una sola etapa mediante SPIF con agujero inicial de 56 mm, no logra resolverse debido a deformaciones excesivas, lo cual cuadra perfectamente con la realidad. Además, podemos ver que el momento en el que la simulación se vuelve inestable la geometría de la chapa se aproxima bastante a la geometría de la chapa real cuando esta rompe.

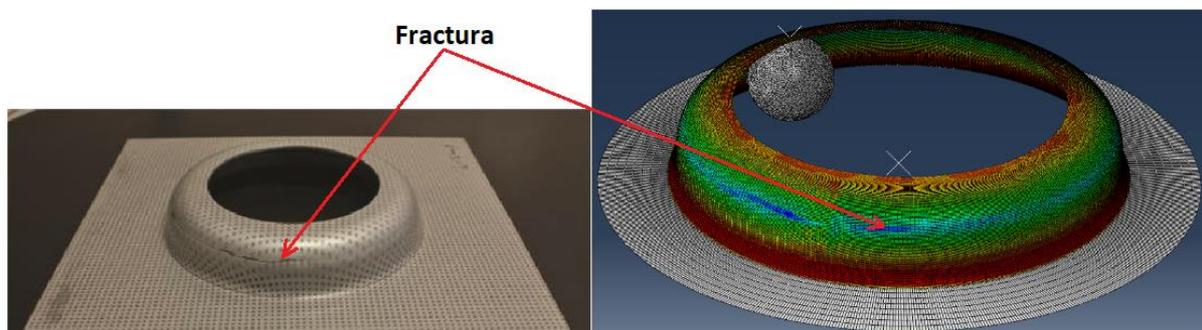


Figura 4.6 Imágenes de operaciones fallidas de rebordeado de agujeros circulares mediante SPIF en una sola etapa. Ensayo de laboratorio (derecha). Simulación mediante EF, se encuentra representado el campo de espesores de la pieza, donde el color azul representa un adelgazamiento excesivo (0.4 mm aprox.), punto donde se desarrolla la inestabilidad en la resolución.

- Análisis de deformaciones en el FLD.

El estado de deformación del material en el ensayo experimental se obtiene a través de un software de captación

y correlación digital de imagen denominado ARGUS, gracias a la superficie punteada la chapa. En la situación inicial, todos los puntos son círculos y según como estos se deformen el software es capaz de calcular las deformaciones que se generan en el material. Puesto que se están midiendo las deformaciones en la superficie exterior, los resultados que sacamos de la simulación también estarán referidos a dicha superficie, la exterior. Esto es bastante sencillo al utilizar el elemento tipo Shell, el programa te permite seleccionar la superficie de la que deseas que los datos sean obtenidos.

Se debe tener en cuenta que los datos obtenidos del ensayo experimental son calculados mediante la imagen macroscópica de la superficie, por tanto, se esperan unos datos más suavizados que los que pueden obtenerse de forma numérica, de un modelo de EF, donde se han resuelto un alto número de problemas elásticos. Adicionalmente en aquellos puntos del flanco donde ocurre la bajada en el primer tramo de la trayectoria de la herramienta, con estrategia  $z\_level$ , las deformaciones sufren cierta distorsión. Por tanto, se analizará el flanco de agujero rebordado en busca del punto de inicio de la rotura, como puede apreciarse en la Fig. 4.7 (a), señalado con la fecha roja, y se analizan las deformaciones a lo largo del flanco por el camino ('path', el cual se encuentra representado en la Fig. 4.7 (a), pero en la situación inicial, previa a la deformación) que contiene a dicho punto de rotura. Este camino se encuentra 20 grados en la dirección de giro negativa, como se muestra en la imagen. Se obtienen unos resultados bastante semejantes a los medidos en el punto de rotura de la pieza experimental. Estos resultados difieren levemente en las deformaciones en la segunda dirección principal, la cual es el estiramiento circunferencial, sin embargo, las tensiones en la dirección principal se encuentran muy bien reproducidas, estas son las que suelen inducir al fallo. Adicionalmente se puede ver que para procesos de rebordado de agujeros mediante SPIF en una sola etapa la curva obtenida mediante los ensayos de Nakazima, la cual se denomina como FFL (Fracture Forming Limit), que marca el límite de conformado plástico por fallo por fractura, reproduce correctamente el comportamiento del material, en este caso concreto, con mucha precisión.

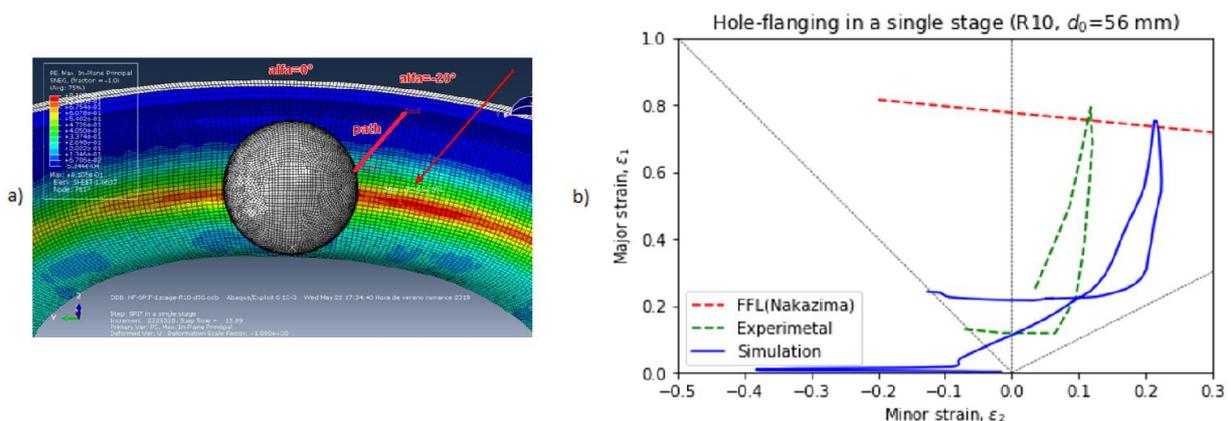


Figura 4.7 (a) Imagen del visor de Abaqus del ensayo numérico fallido de rebordado de agujero circular de agujero inicial de 56 mm de diámetro, donde se representan, en la posición indeformada, los puntos de la pieza analizados. (b) Representación del estado de deformación del material en los puntos analizados mediante el uso del Diagrama de Conformado Límite (FLD).

- Análisis de fuerzas.

La fuerza obtenida de la resolución numérica del modelo, sufre unas serias oscilaciones, asociadas al cálculo numérico y los movimientos incrementales, tal es la amplitud de estas, que resulta imposible obtener conclusiones claras sin realizarle a los resultados un filtrado.

Aplicando el filtro que ofrece Python mediante la función 'lowess()', obtenemos una curva extremadamente suavizada, cuya tónica se ajusta notablemente a la de la fuerza experimental. Esta función realiza una robusta regresión ponderada localmente para el suavizado de dispersiones de puntos, lo cual encaja con este caso.

Sin embargo, pueda parecer que mediante este filtrado tan severo se ha perdido gran parte de la información, por si este fuera el caso, también se va a realizar un filtrado más simple, donde se reduzca la amplitud tan severa de las oscilaciones, sin suavizar radicalmente la curva. Este filtrado se realizará mediante una media deslizando de 20 valores. En esta ocasión se ha realizado un programa en Python en vez de hacer uso de una función de librería, debido a la simpleza de la operación.

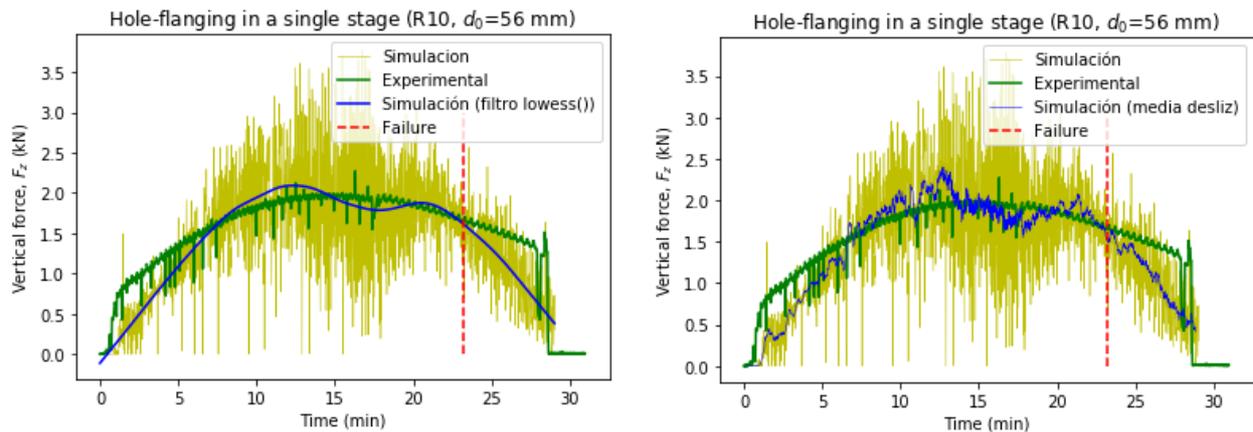


Figura 4.8 Comparación de las fuerzas, obtenidas experimental y numéricamente, que intervienen en el proceso de reboreado de agujero circular mediante SPIF en una etapa para un agujero inicial de 56 mm de diámetro. Dos tipos de filtros para la fuerza son mostrados.

Basándose en la fuerza ya filtrada, se ve que, teniendo en cuenta el alto número de factores que pueden hacer que la fuerza experimental y simulada difieran, ambas curvas son bastante semejantes, resaltando que el valor de la fuerza en el punto de fallo de la pieza parece casi coincidir en ambos casos. Sin embargo, en otras zonas se pueden encontrar discrepancias de hasta 0.5 kN, especialmente en la filtración mediante media deslizante, donde, cerca de la zona de máxima fuerza experimental, pero varios minutos antes de que se alcance este punto, la fuerza obtenida mediante la simulación sufre un pico cercano a 2.5 kN, mientras que en el ensayo de laboratorio la fuerza (sin contar algunas oscilaciones) no asciende de 2 kN. Esto puede llegar a ser un problema cuando se encuentren fuerzas cercanas al máximo de la máquina con la que se vaya a trabajar, de todas formas, deben de evitarse situaciones así, y emplear máquinas más potentes si se diera el caso. Otra principal discrepancia entre el ensayo y la simulación es el instante de rotura, gracias a la comparación mediante la FLD se ve que las zonas de rotura sufrían unas deformaciones similares, es decir, que el material se encuentra en unas condiciones similares, sin embargo, en la simulación, este estado se alcanza prácticamente 5 minutos antes que en el laboratorio. A pesar de todo, con vistas generales, puede decirse que el proceso de reboreado de agujero mediante SPIF mono-punto para piezas en las que se alcanza la rotura es capaz de reproducirse, analizarse e investigarse satisfactoriamente mediante un modelo de EF.

#### 4.3.2 Reboreado de agujero de diámetro inicial 58 mm

En cuanto al modelo cuyo agujero inicial era de 58 mm, simulación de este se resuelve satisfactoriamente, no se ve abortada por deformaciones excesivas, primer punto para validar la simulación, pues el ensayo experimental se completó también sin que la pieza sufriera fallos.

- Análisis de deformaciones en el FLD.

La metodología para examinar las deformaciones a lo largo de flanco reboreado es similar a la seguida en el modelo anterior, de agujero inicial de diámetro 56 mm. Se evita incluir en el camino que a analizar el punto donde la herramienta realiza las bajadas durante el tramo de estrategia z-level y se decide trabajar con el camino de elementos que se encuentra a 15 grados en la dirección de giro negativa, mostrado en la imagen, de nuevo el camino se muestra en la situación indeformada.

Puede apreciarse como la tónica de deformación en ambos casos es similar, aunque en esta ocasión encontramos mayores discrepancias en las deformaciones a lo largo de la dirección principal. Mientras que de forma experimental se midieron unas deformaciones cercanas a 0.6 en la simulación se aproximan a 0.45, a pesar de todo, siguen siendo unos resultados bastante positivos.

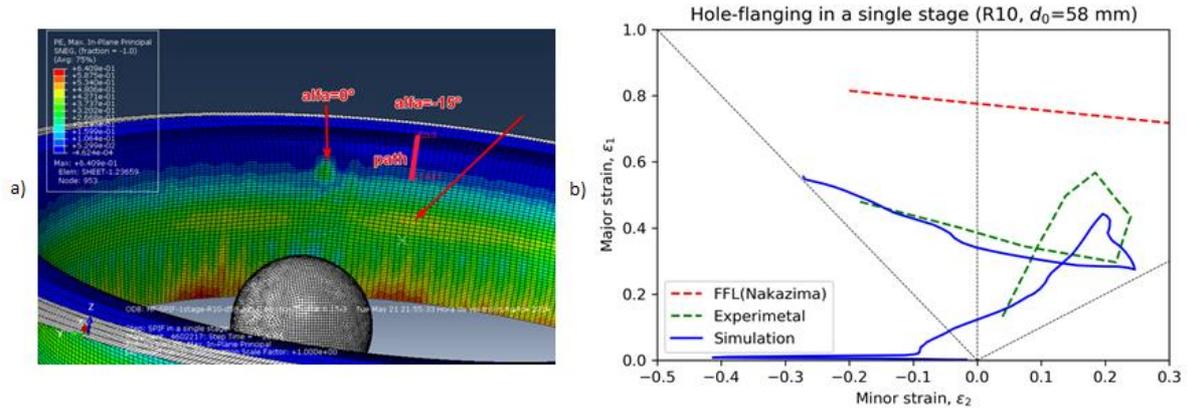


Figura 4.9 (a) Imagen del visor de Abaqus del ensayo numérico satisfactorio de rebordeado de agujero circular de agujero inicial de 56 mm de diámetro, donde se representan, en la posición indeformada, los puntos de la pieza analizados. (b) Representación del estado de deformación del material en los puntos analizados mediante el uso del Diagrama de Conformado Límite (FLD).

- Análisis de fuerzas.

Se aplican de nuevo los mismos filtrados sobre las fuerzas recogidas de la simulación numérica para poder realizar una comparación eficiente. Puede apreciarse que la zona de fuerzas máximas se reproduce bastante bien numéricamente, con menos anomalías que en el modelo de agujero inicial de diámetro 56 mm, encontrándose una discrepancia máxima de 250 N en el caso del filtrado mediante la media deslizante de 20 elementos.

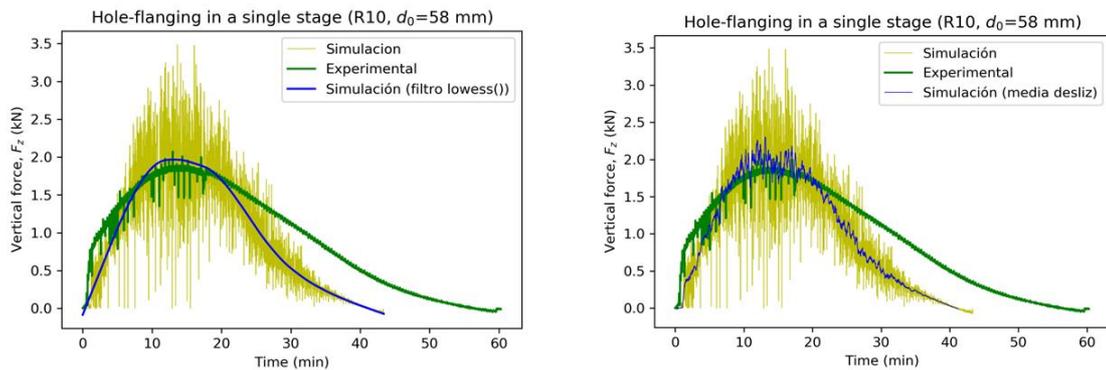


Figura 4.10 Comparación de las fuerzas, obtenidas experimental y numéricamente, que intervienen en el proceso de rebordeado de agujero circular mediante SPIF en una etapa para un agujero inicial de 58 mm de diámetro. Dos tipos de filtros para la son mostrados.

A pesar de que las fuerzas máximas se ajustan bastante bien a la realidad, al comienzo de la operación, y sobre todo, en la segunda parte del conformado, a partir de minuto 20 del ensayo aproximadamente, la fuerza que obtenemos de la simulación se aleja bastante de la fuerza recogida en el laboratorio, llegando a alcanzarse errores de más del 50%, aspecto que se comparte con la comparación para el modelo de agujero inicial de 56 mm de diámetro en zonas cercanas al fin del ensayo. Este error, más que un error en la reproducción de las fuerzas, parece estar asociado a la escala temporal. Podría ser producto del ‘Mass Scaling’ aplicado para reducir el tiempo computacional y rentabilizar la herramienta de EF, sin embargo, parece asociado al hecho de que la dependencia temporal de la trayectoria se ha obtenido numéricamente, aplicando una velocidad de 1000 mm/min entre punto y punto del recorrido, mientras que para el ensayo de laboratorio realizado por Borrego et al. [3] la dependencia temporal de las coordenadas de obtenía mediante el uso del software Catia® Fig. 4.11 (a), en dicho programa se le impuso una velocidad de 1000 mm/min a la herramienta al realizar las trayectorias en espiral y circunferenciales, sin embargo, como se muestra en la Fig. 4.11 (b), líneas azul y amarilla, para suavizar las bajadas en la trayectoria escalonada, además de disminuir la velocidad de la herramienta hasta 60 mm/min, se efectúa un movimiento para evitar las incrustación de la herramienta, lo que aumenta el tiempo en el que la herramienta se encuentra con una velocidad menor a la fijada en el MEF. Hay que tener en cuenta que la

trayectoria escalonada ocupa entre un 20-25% del proceso, del mismo orden que el desfase temporal, aunque no hay una relación directa pues la trayectoria escalonada se efectúa previamente a alcanzar las fuerzas máximas y el desfase temporal parece encontrarse mayormente una vez pasado el tramo de fuerzas máximas. Este podría ser el origen del desfase temporal que se encuentra en los resultados.

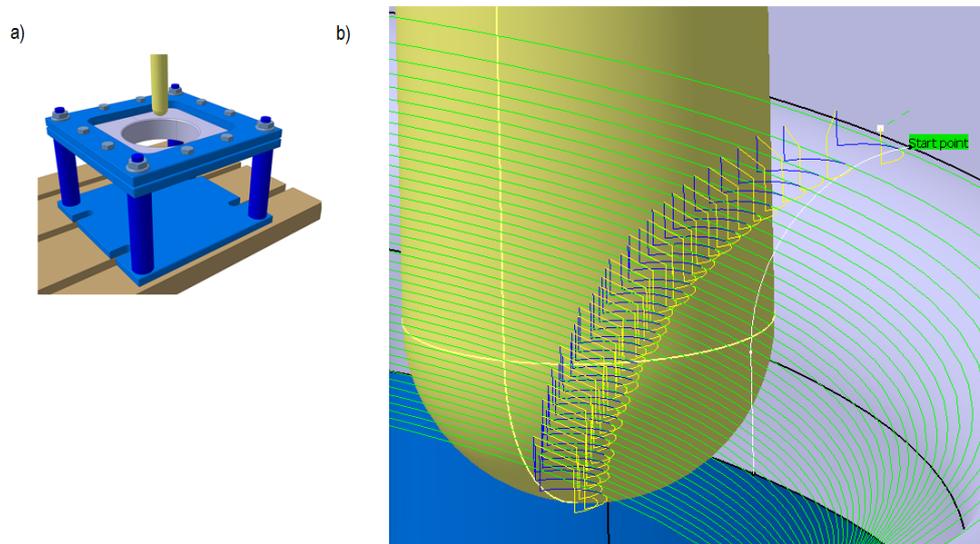


Figura 4.11 Imagen del modelado en Catia y la trayectoria generada para el ensayo de laboratorio.

Una vez se ha analizado detenidamente el caso de rebordeado de agujeros mediante SPIF en una sola etapa, podemos decir que el proceso se reproduce de forma suficientemente fiel mediante EF, y que esta es una herramienta útil para el análisis de este tipo de procesos, siendo conscientes y habiendo ubicado los posibles fallos o diferencias entre la simulación numérica y la realidad. Más allá de los fallos encontrados, se ha obtenido que tanto geometría como las deformaciones en el instante de fallo son muy similares en ambos casos, así como la fuerza máxima, factores de alta relevancia a la hora de diseñar operaciones de rebordeado de agujeros mediante SPIF.

### 4.3.3 Conformado de un cono de ángulo 64°

Ahora se procederá a analizar el tercer modelo estudiado, el conformado de conos. En este caso, en el ensayo experimental se alcanzan deformaciones superiores a las marcadas por la FFL obtenida por Borrego et al.[3] sin que se produzcan fallos en la pieza, lo cual teóricamente no se consideraba posible, sin embargo, en el conformado incremental, mediante la supresión de la estricción del material, y según el tipo de geometrías que se busquen, alcanzar dichas deformaciones superiores a la FFL es posible, como muestra la imagen generada por el software ARGUS, utilizado para obtener las deformaciones en el ensayo de laboratorio, Fig. 4.12 (a), en la cual se muestran las deformaciones ingenieriles. Este software fue utilizado también por Borrego et al. [3,4] para obtener la ley de comportamiento del material y la curva FFL a partir de los ensayos de Nakazima. En la simulación también se consigue obtener un flanco sin defectos geométricos y no se producen inestabilidades durante la solución, sin embargo, se encuentra un campo de deformaciones (reales, no ingenieriles) exageradamente elevado, Fig. 4.12 (b).

Mediante la fórmula (4.1) donde ambas deformaciones deben introducirse en tanto por uno, se obtiene que en el flanco se dan unas deformaciones máximas de 0.95.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (4.1)$$

El trabajo realizado en EF para la adaptación del modelo expuesto en el capítulo 3 a modelos sin agujero se detalla en el capítulo posterior, esta parte se centrará en el análisis de resultados y la comparación con los obtenidos experimentalmente.

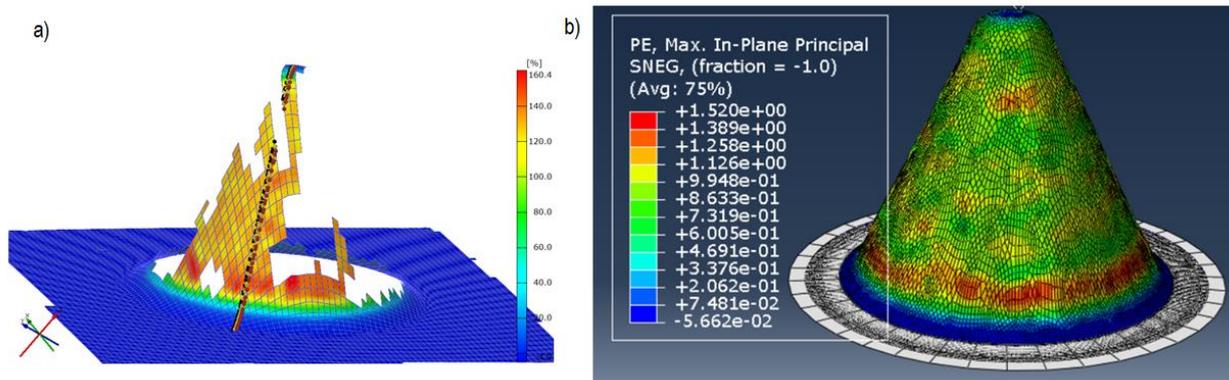


Figura 4.12(a) Imagen generada por el software ARGUS donde se muestran las deformaciones ingenieriles. (b) Imagen del visor de Abaqus donde se muestran las deformaciones en la dirección principal.

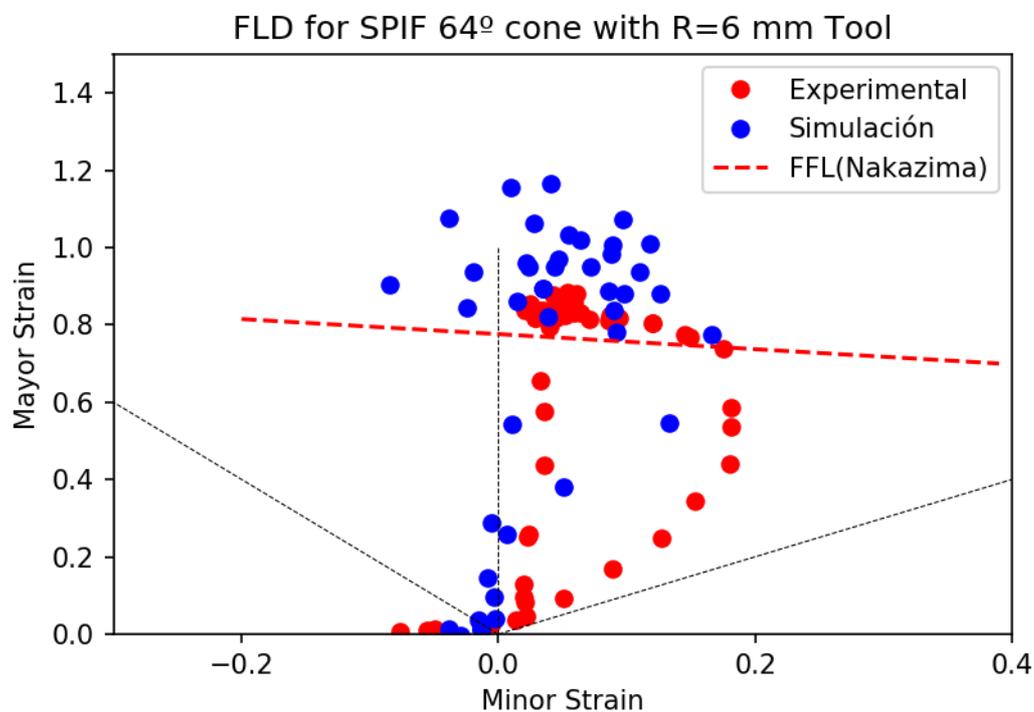


Figura 4.13 Deformaciones a lo largo del flanco en la operación de rebordeado cónico a 64° mediante SPIF. Resultados experimental y numérico.

El hecho de que la simulación se resuelva sin incidentes y el flanco posea una apariencia circunferencialmente homogénea es un buen indicio, sin embargo, se observa una clara sobreestimación de los valores de las deformaciones en la zona cercana a la base del cono. Si se observa la Fig. 4.12 (a) las deformaciones en la base del cono no varían en exceso con deformaciones a lo largo del flanco, siendo estas de un valor aproximado a 0.81-0.85, mientras que, en los resultados numéricos, la diferencia entre las deformaciones en la base de la pieza y a lo largo del cono son mucho más notables. En los resultados de la simulación se encuentran deformaciones a lo largo del flanco de un valor similar a los experimentales, existiendo algunas zonas con valores algo superiores, los cuales están asociados al mismo error que sobreestima las deformaciones en la base del cono, que llegan a un máximo de 1.52, leyenda de la Fig. 4.12 (b) y Fig. 4.13. Esto es debido a que el material utilizado posee una curva tensión-deformación que sigue la ley de Voce, lo cual quiere decir, que para valores de deformación elevados la tensión es prácticamente constante, de hecho, la ley introducida en el MEF posee valores de deformación hasta un máximo de 1.18 y a partir de ese valor el modelo considera que la curva tensión deformación es horizontal. Por este hecho, es extremadamente complejo calibrar el modelo de elementos finitos para que prediga con exactitud los valores de las deformaciones en un proceso tan complejo como SPIF, donde se producen numerosos incrementos donde el material se encuentra ya con unos niveles de deformación

elevados, y es probable que se produzcan errores al resolver el problema elástico en cada incremento, cuya entrada es el desplazamiento, marcado por la herramienta. Estos errores cometidos al trabajar con altas deformaciones en un modelo de EF explicarían también la dispersión que encontramos en los valores máximos de las deformaciones obtenidas de la simulación.

Como ya se ha comentado, el cono de  $64^\circ$ , se resuelve experimentalmente de forma correcta, sin embargo, se encuentra muy cercano al fallo, aspecto que también ocurre en el modelo numérico.

Para terminar este capítulo se puede concluir en términos generales que los modelos de elementos finitos empleados son aptos para el estudio de otros procesos de SPIF similares sobre chapas de aluminio 7075-O.



# 5 ESTUDIO DE TRAYECTORIAS CÓNICAS

## 5.1 Planteamiento del problema

De acuerdo a los trabajos de Borrego et al. [3,4] y Morales-Palma et al. [5], el proceso de rebordeado de agujero circular mediante SPIF permite un aumento en la capacidad de conformado plástico, permitiendo alcanzar deformaciones alrededor de 0.7 en operaciones realizadas en una etapa, rompiendo si se alcanzan deformaciones superiores. El fallo en operaciones de una etapa se produce cuando entran en juego las tensiones generadas por la expansión del agujero, localizándose claramente un instante o geometría y zona crítica, Fig. 5.1 punto 'b' del diagrama, para el proceso, una vez superado, el modelo se completa satisfactoriamente. Las mayores deformaciones se localizan en dicha zona crítica variando notablemente a lo largo del flanco. Mediante estrategia en dos etapas, como la propuesta por Morales-Palma [5], se pueden obtener flancos rebordeados más uniformes evitando concentrar las mayores deformaciones en una zona concreta.

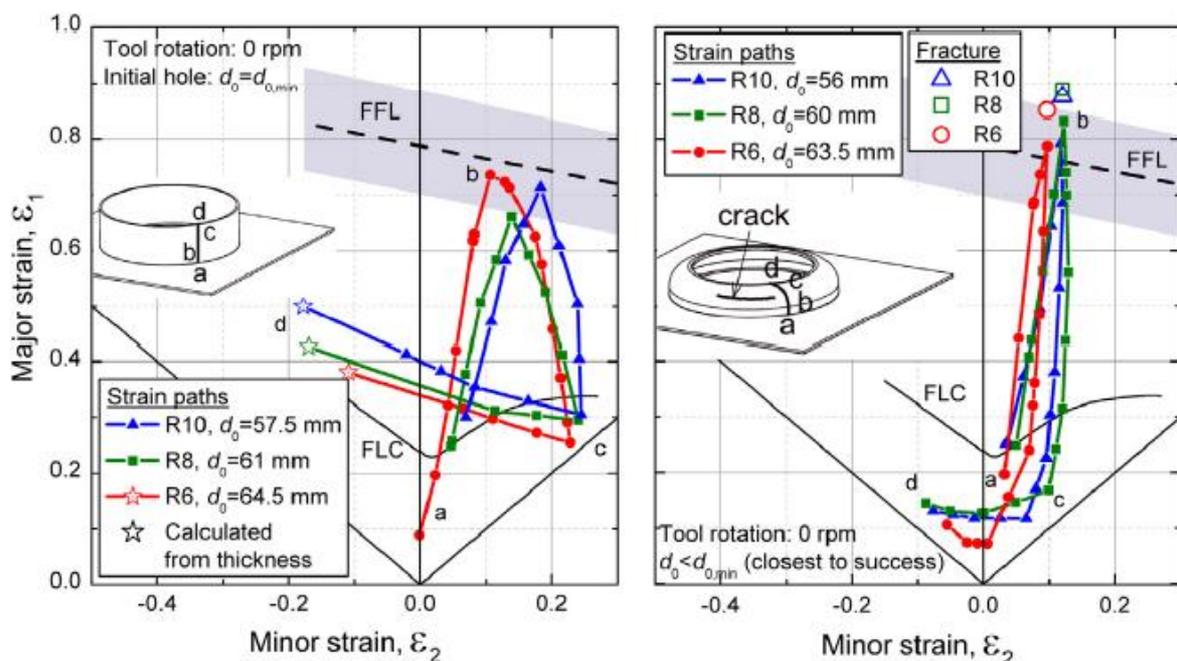


Figura 5.1 Diagramas de conformado límite (FLD) para ensayos experimentales de rebordeado de SPIF en una etapa, se representan los casos límite.

De las afirmaciones del apartado anterior se puede sacar la siguiente conclusión:

Aplicando una estrategia diferente para la trayectoria de la herramienta en procesos de dos etapas, evitando la configuración crítica (el fallo se produce con la geometría que se muestra en la Fig. 5.1 a la izquierda), quizás podrían obtenerse deformaciones superiores a 0.8 sin que la pieza rompa. Adicionalmente, en el análisis del proceso de deformación del material en rebordeado de agujeros mediante SPIF en una etapa, Morales-Palma [6] comentó la ley del seno para predecir el espesor de la pared del agujero si se rebordeaba con un ángulo leve con respecto a la superficie de la chapa. Aspecto interesante en el que puede que se esconda cierto potencial para esta técnica, y por tanto una primera etapa para obtener una geometría cónica y una distribución de espesores apropiada, podría ser útil para la elaboración de una estrategia multi-etapa.

Se centrará gran parte de esta investigación en el estudio de las trayectorias cónicas, teniendo en cuenta el factor comentado en el párrafo anterior, además se analizará la influencia del agujero inicial en este tipo de trayectorias mediante la comparación de modelos con y sin agujero, con ánimo de corroborar o desmentir el cumplimiento de la regla del seno para ángulos de flanco leves.

Con una primera etapa de este estilo se intenta obtener ventaja de poder conseguir curvar el flanco y aproximarlos a la que será su posición final sin producir adelgazamientos excesivos en el espesor, y consecuentemente evitar altas deformaciones en las zonas críticas, con el objetivo de ampliar el horizonte del proceso, permitiendo rebordear mediante SPIF piezas con HER superiores, gracias al uso de estrategias en etapas posteriores que contrarresten las deformaciones generadas en esta primera.

## 5.2 Plan de simulaciones de conos con y sin agujero

Dada la existente posibilidad de obtener flancos de espesor más uniformes gracias al uso de trayectorias cónicas, se van a resolver modelos de distintos ángulos para ser conscientes de hasta qué punto este hecho se verifica y también para ver cómo evoluciona el comportamiento del material conforme el ángulo de la trayectoria cónica aumenta, pues se sabe de ante mano que la ley del seno sólo se corrobora para ángulos no muy elevados. Se resolverán modelos de las mismas características que hasta ahora, donde únicamente variará el agujero inicial de la chapa, la trayectoria de la herramienta y el tamaño de esta, tanto las dimensiones del agujero final como las condiciones del modelo se mantendrán tal y como se diseñaron para [6] y que se han comentado y mantenido para la calibración del modelo en el capítulo 4 de este documento.

Puesto que se esperan deformaciones elevadas se ha realizado un mallado fino en los modelos, con elementos de 0.4 mm de longitud, en el modelo sin agujeros el mallado ha tenido que ser resuelto por el programa al no poder obtenerse un mallado uniforme, Fig. 5.2.

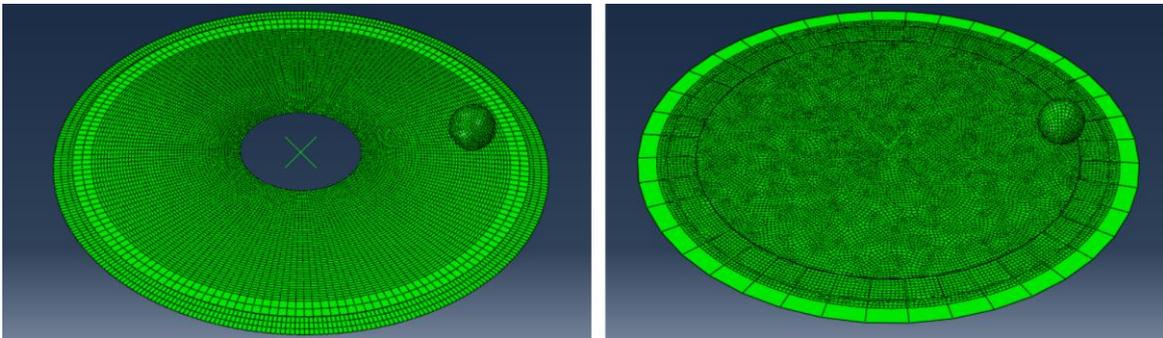


Figura 5.2 Imagen de los modelos con y sin agujero al inicio de la operación.

Para la trayectoria cónica se ha realizado un pequeño incremento del radio inicial Fig. 5.3 para que el agujero que se rebordea en la chapa sea del mismo radio que en la trayectoria cilíndrica, ya que al ser una trayectoria inclinada la zona lateral de la herramienta no llega a entrar en contacto con la chapa en los primeros instantes, cosa que sí ocurre en la trayectoria cilíndrica, donde la herramienta se sitúa inicialmente con un radio de dimensiones:  $\left(\frac{df}{2} - R\right)$ .

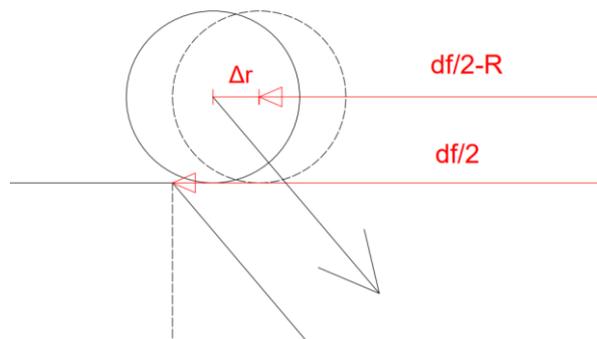


Figura 5.3 Esquema explicativo del aumento del radio inicial de la trayectoria de la herramienta en trayectorias cónicas

El agujero inicial de los modelos con agujero ensayados será de 32 mm, aumentando notablemente el HER con respecto a los procesos vistos en una etapa. La bajada de la herramienta se controlará mediante la siguiente fórmula 4.1, donde 'alfa' es el ángulo de la trayectoria cónica. Esta ecuación se utilizará tanto para modelos con agujeros como para aquellos sin ellos, y la bajada por revolución será de 0.2 mm.

$$z_{stroke} = ((df - d0)/2) * \tan(\alpha * \pi/180) \quad (4.1)$$

Los ángulos que se han elegido para realizar el estudio son de 45° a 60° con 5 ° de diferencia entre modelo y modelo. Ángulos menores no serían eficientes en términos temporales teniendo en cuenta la deformación que se daría en el flanco, la cual sería bastante leve, y por el contrario, no se analizan ángulos superiores a 60° pues la ley del seno estaría lejos de cumplirse y las deformaciones se asemejarían demasiado a las producidas en el flanco mediante la realización del rebordo en una etapa, además el decremento notable en radio inicial, haría que la pieza rompiese si se ensayan ángulos de pared superiores a 60°.

Para analizar la influencia del radio de la herramienta, que como se ha visto tiene una elevada repercusión en este proceso, se utilizarán dos tipos de radios, de 6 y de 10 mm.

### 5.3 Análisis de resultados

Se han resuelto un total de 16 modelos alternando las características del modelo, en concreto el ángulo del flanco, el tamaño de la herramienta y la chapa con o sin agujero inicial. Para el estudio de estos modelos se emplearán las herramientas usadas hasta ahora, como son la distribución de espesores a lo largo del flanco y el diagrama de conformado límite (FLD).

Se debe ser consciente que el análisis mediante un programa de elementos finitos, es decir mediante cálculo numérico, ofrece una solución concreta para cada nodo y se pueden encontrar anomalías, es decir, cambios bruscos de valores que no suceden en la realidad, en algunas zonas, por ejemplo, donde la herramienta entra en contacto por primera vez con la chapa. Estas zonas intentarán evitarse en la extracción de resultados.

Adicionalmente en los modelos donde la chapa no tiene agujero inicial el mallado no es uniforme, sin embargo, marcando un tamaño máximo de 0.4 mm para los elementos de la malla, se espera conseguir una malla suficientemente fina y fiable, donde las deformaciones a lo largo del flanco se repartan uniformemente y no se observen inestabilidades, Fig. 5.4 (b).

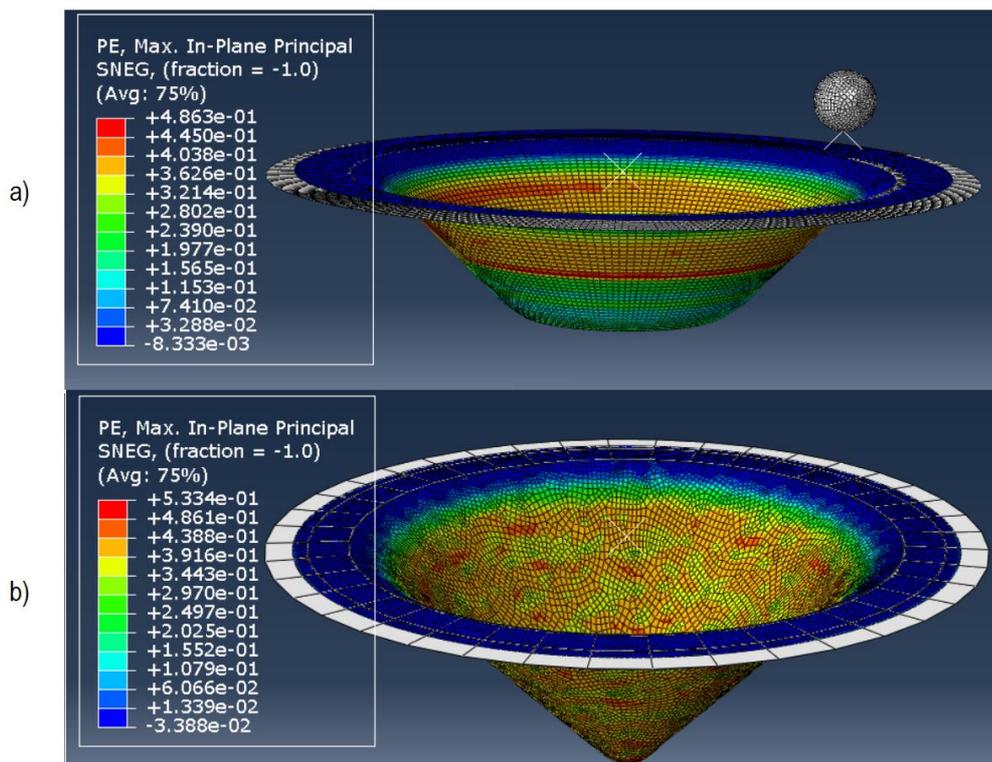


Figura 5.4 Imagen de los modelos con pendiente de 45° con y sin agujero solucionados, se muestra el campo de deformaciones en la dirección principal en ambos modelos.

Por otro lado, para obtener los resultados, estos deben asociarse a un ‘camino’ o ‘path’ del cual se obtenga la información de los elementos que lo componen. Gracias a la metodología seguida para la generación de ‘path’, de forma geométrica, mediante una sucesión de puntos, se podrá obtener información a lo largo del flanco de forma rectilínea en la dirección radial a pesar de trabajar con un mallado no uniforme gracias a que el programa es capaz de realizar las interpolaciones necesarias para ofrecer el valor de las variables requeridas en el punto preciso.

### 5.3.1 Conos de 45°

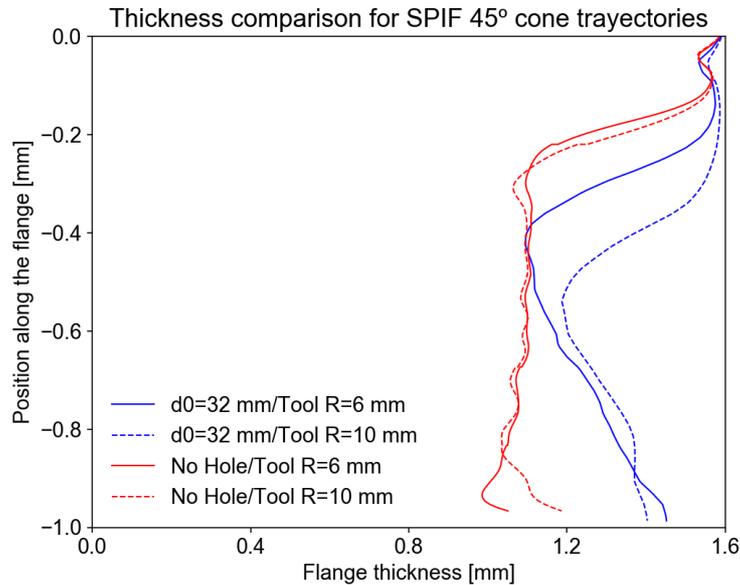


Figura 5.5 Distribución de espesores para rebordeos cónicos a 45° mediante SPIF.

Analizando inicialmente los resultados para trayectorias cónicas de 45°, Fig. 5.5, se aprecia notablemente la influencia del agujero. Por un lado, y como aspecto más importante, el hecho de que haya agujero afecta gravemente a la uniformidad en el espesor a lo largo del flanco y por el contrario en chapas sin agujero parece cumplirse bastante fielmente la ley del seno, de hecho el estado tensional del material en el proceso difiere claramente, si observamos los FLD, vemos como el material en la periferia del flanco de la chapa con agujero se encuentra sometido a una tensión uniaxial en la dirección radial, prácticamente el estado tensional producido en un ensayo de tracción, mientras que el material cercano a la punta del cono en las chapas sin agujero se encuentra sometido a un estado de deformaciones casi biaxial, donde las tensiones circunferenciales, del orden a las producidas en la dirección radial permiten que el adelgazamiento del flanco se mantenga a lo largo de este y no decaiga como ocurre en los casos con agujero. Por otro lado, el hecho de que haya más material en las inmediaciones de la chapa, es decir, que no haya agujero, provoca que el adelgazamiento excesivo ocurra de forma anticipada, en otras palabras, en una zona del flanco superior, sin embargo, las deformaciones máximas que se alcanzan son muy similares, Fig. 5.6, y, por consiguiente, el nivel de adelgazamiento también es similar, al menos al utilizar herramientas de 6 mm de radio. En vista de los FLD obtenidos, podemos decir que las tensiones que se generan son de valores similares y en la misma dirección, radial, en modelos con y sin agujero, de nuevo, para herramientas de pequeño radio, pues para herramientas de 10 mm de radio el nivel de deformación plástica es menor, en concordancia con lo declarado por Hussain [21] con respecto a la relación entre el tamaño de la herramienta y el espesor de la chapa deformada. Sin embargo, las hipótesis de Hussain [21] no se cumplen para los modelos sin agujero, donde los conos a 45° obtenidos con herramientas de 6 mm y 10 mm de radio poseen un flanco muy similar, donde una vez se produce el adelgazamiento, ambos modelos parecen poseer un espesor constante, siguiendo la regla del seno, únicamente difiriendo en la zona cercana a la punta del cono. En esta zona de la punta, dado que el modelo con herramienta de radio 6 mm tiene una punta de ese radio, el adelgazamiento es más pronunciado y las tensiones producidas se aproximan a un estado biaxial sin que se reduzca el nivel de la tensión radial, mientras que con herramientas de 10 mm de radio el estado tensional en la punta es menor, pues el radio es menos pronunciado.

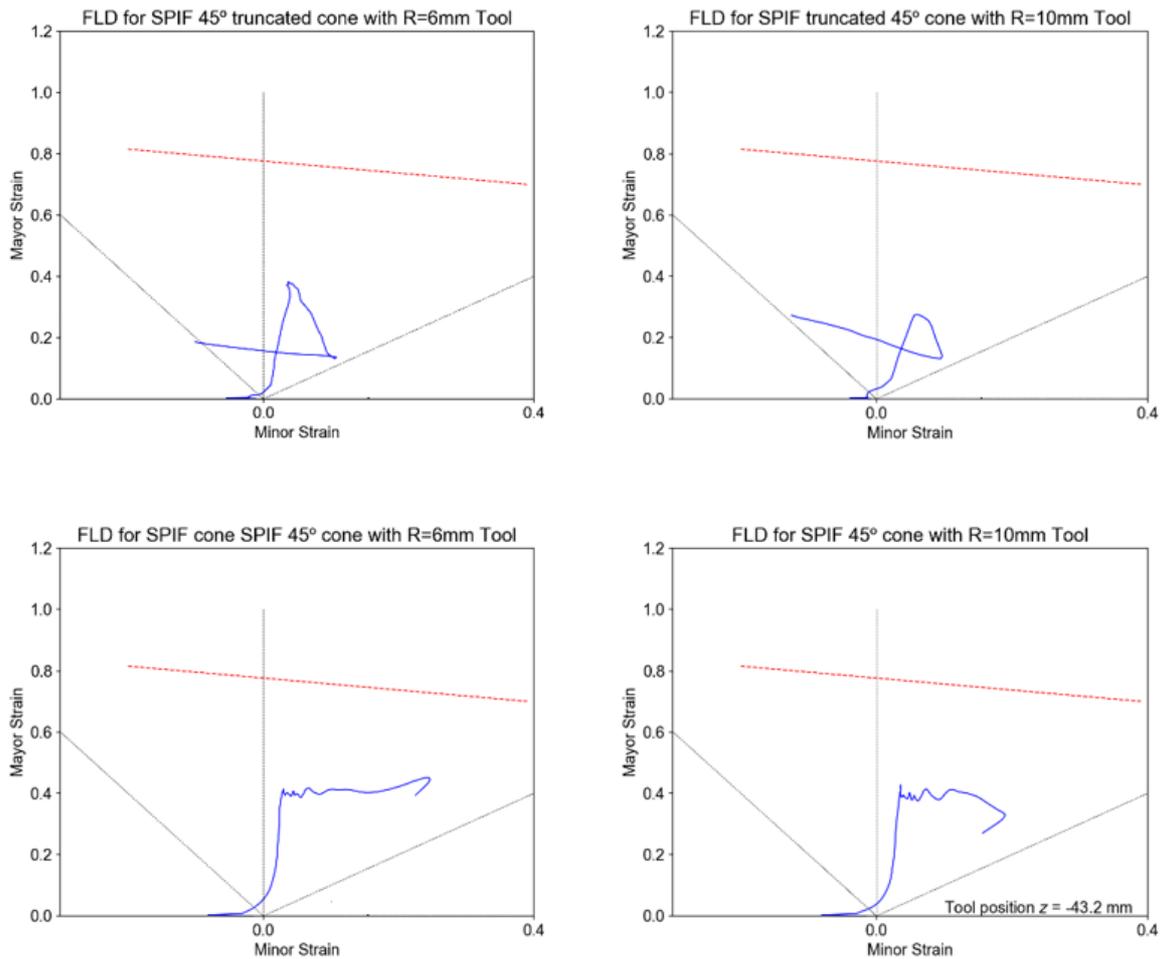


Figura 5.6 Diagramas de conformado límite para rebordeos cónicos a 45° mediante SPIF.

### 5.3.2 Conos de 50°

Una vez analizados los resultados para piezas cónicas con una inclinación de 45° se analizará la evolución de los aspectos mencionados a medida que aumenta la pendiente del flanco rebordeado, debemos recordar que al aumentar el ángulo de pared más se asemejarán las características del flanco a las de un rebordeo de agujero clásico, y al haber disminuido de forma notable el agujero inicial en las chapas con agujero es posible que el modelo este cercano al fallo.

Para una pendiente en el flanco de 50°, Fig. 5.7, casi todas las características mencionadas para modelos de 45° parecen mantenerse, teniendo en cuenta que el adelgazamiento general del flanco es ligeramente superior. El modelo sin agujero donde el rebordeo se ha realizado con herramienta de 6 mm de radio parece seguir fielmente la ley del seno, sin embargo, el realizado con herramienta de 10 mm de radio comienza a mostrar una ligera falta de uniformidad, produciéndose un adelgazamiento más pronunciado en la zona cercana a la base del cono. Y el mismo comportamiento que acaba de describirse para chapas sin agujero, se produce, de manera más acentuada para las chapas con agujero. Mientras que en rebordeo cónico a 45° el grado de deformación plástica era menor gracias al uso de herramientas de mayor radio, en ese caso, el uso de herramientas de mayor radio produce una estricción controlada del material en el momento crítico de la operación, generando un adelgazamiento superior al que se consigue con herramientas de 6 mm de radio. Otro factor a resaltar, es que este adelgazamiento crítico para pendientes de 50° en chapas con agujero supera al adelgazamiento que se produce en chapas sin agujero, cosa que no ocurre con inclinaciones menores.

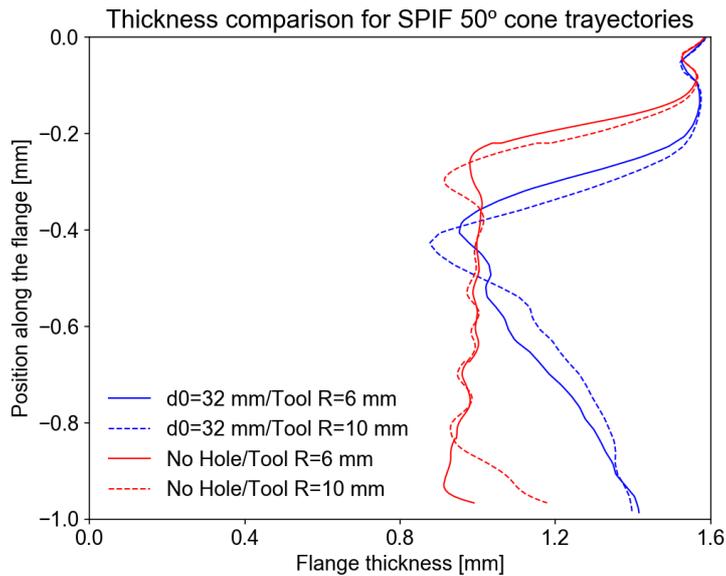


Figura 5.7 Distribución de espesores para rebordeados cónicos a 50° mediante SPIF.

La evolución de las deformaciones plasmadas en el FLD, Fig. 5.8, muestra claramente como el nivel de deformación plástica general del proceso aumenta en todos los modelos, este incremento se encuentra cercano al 0.2. Aparte de este factor las características de los FLD se mantienen similares a los FLD para geometrías cónicas con 45° de pendiente a excepción del modelo con agujero y herramienta de 10 mm de radio, cuyo adelgazamiento notorio para una pendiente 50° se ve reflejado en el FLD, el cual es similar al modelo realizado con una herramienta de 6 mm de radio, a diferencia de lo estudiado en pendientes de 45°.

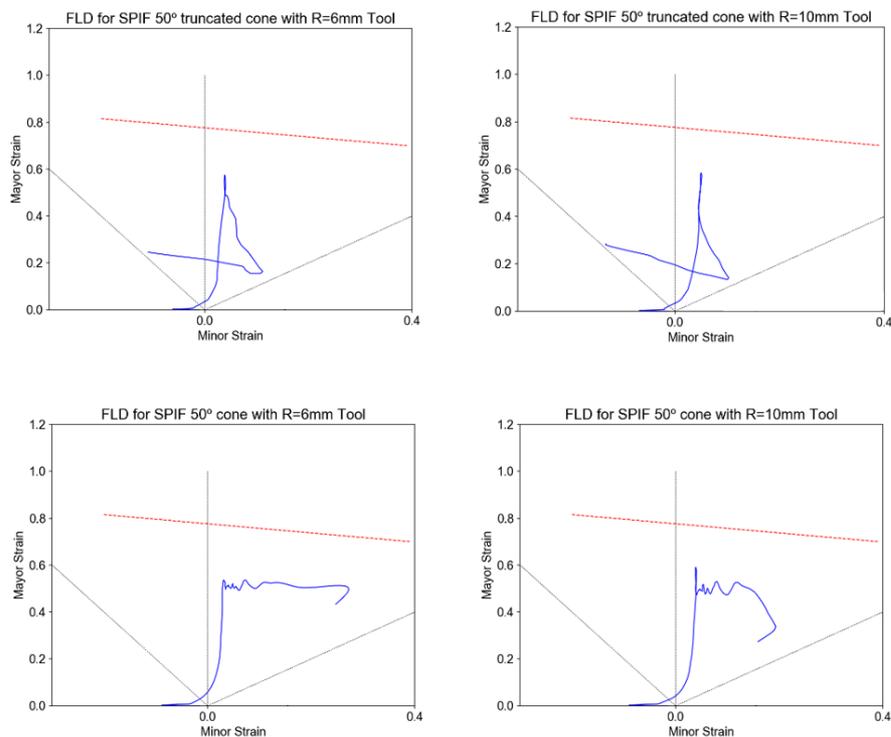


Figura 5.8 Diagramas de conformado límite para rebordeados cónicos a 50° mediante SPIF.

### 5.3.3 Conos de 55°

Al trabajar con una pendiente de 55°, Fig. 5.9, más allá de la esperada amplificación del nivel de adelgazamiento, los resultados no varían en exceso, excepto para la pieza con agujero conformada mediante una herramienta de

10 mm de radio, para la cual el adelgazamiento es muy notable y nos encontramos una situación en la que se podrían estar sobreestimando las deformaciones debido a la horizontalidad de la ley de comportamiento a niveles muy elevados de deformación y podemos considerar que la pieza estaría cercana al fallo. También es curioso el hecho de que después de tal adelgazamiento el espesor del flanco aumente de una forma radical aproximadamente en la mitad del flanco para volver a decrecer poco después. Este mismo efecto parece darse muy levemente en la pieza con agujero realizada con una herramienta de 6 mm lo que produce una zona de aproximadamente un 20% de longitud del flanco con un espesor reducido, en vez de encontrarse un pico de adelgazamiento.

Para las piezas sin agujero, no hay que decir mucho más salvo que el adelgazamiento se acentúa y comienza a perderse la uniformidad a lo largo del flanco.

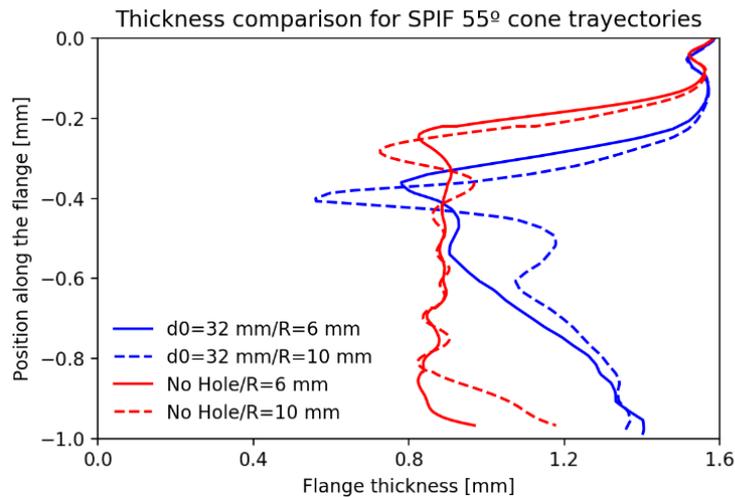


Figura 5.9 Distribución de espesores para rebordeos cónicos a 55° mediante SPIF.

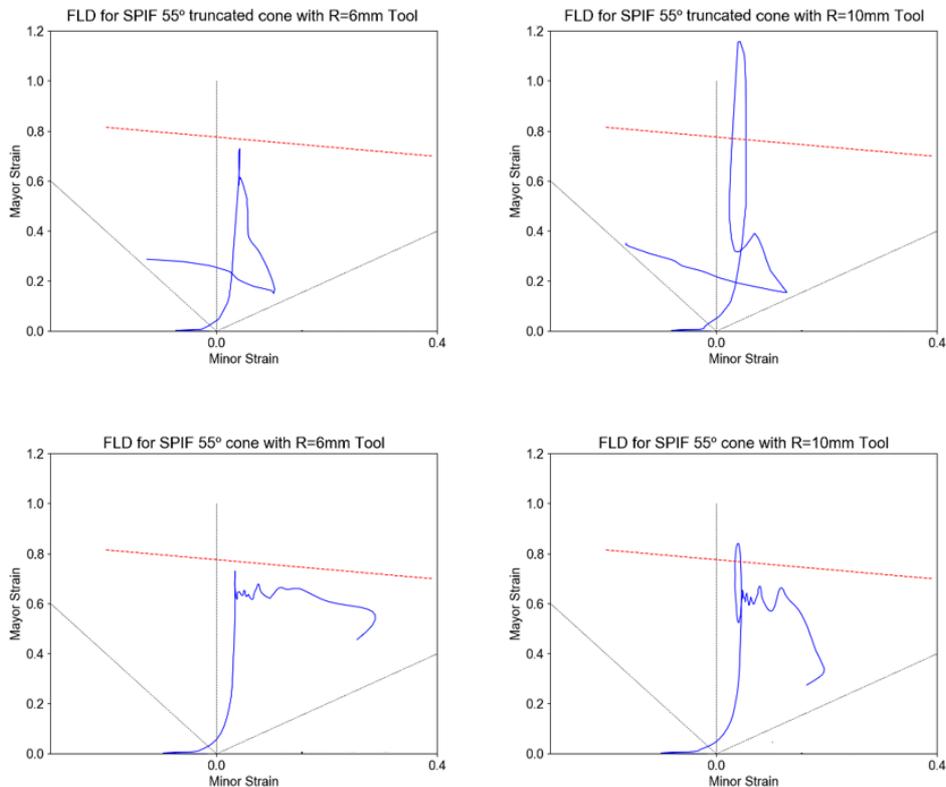


Figura 5.10 Diagramas de conformado límite para rebordeos cónicos a 55° mediante SPIF.

### 5.3.4 Conos de 60°

Al seguir aumentando la pendiente de la trayectoria, los factores ajenos a los niveles de adelgazamiento en el espesor observados en modelos de 55°, 50° y 45° se mantienen, como el adelgazamiento crítico en una zona más cercana a la base de la pieza para modelos sin agujero y la diferencia en el estado de deformación entre la punta del cono en modelos sin agujero y el extremo libre del flanco en las piezas con agujero. Sin embargo, en relación al nivel de adelgazamiento en las zonas críticas, este se acentúa seriamente, pudiendo decirse que los modelos realizados con herramientas de 10 mm de radio tienen altas posibilidades de alcanzar el fallo, sin embargo, la simulación no presenta inestabilidades.

La distribución de espesores para la chapa sin agujero conformada con herramienta de 6 mm de radio se aproxima a la encontrada para la misma chapa conformada con herramienta de 10 mm de radio y 10° menos de pendiente, hallándose una zona de espesor crítico, y por tanto deja de cumplirse la ley de seno, además se aprecian leves oscilaciones en el espesor a lo largo del flanco, las cuales son aún más notables para la chapa conformada con una herramienta de 10 mm de radio. Para esta última pieza nombrada el espesor en la zona crítica aumenta notablemente, acercándose al fallo, se puede apreciar como las tensiones máximas sobrepasan levemente la curva FFL, Fig. 5.12. Por otro lado, en las chapas con agujero, aquella cuyo rebordeado cónico se ha realizado con una herramienta de 10 mm de radio, sigue la misma tónica que con una pendiente de 55°, posee un adelgazamiento crítico excesivo, donde, viendo su correspondiente FLD, Fig. 5.12, con toda seguridad se ha dado una sobreestimación de las deformaciones por el alto valor de estas, de tal forma que el adelgazamiento de esta zona puede no ser tan pronunciado en la realidad, donde seguramente la pieza rompería, o se encontraría muy cercana al fallo. También es curioso el hecho de que después de tal adelgazamiento el espesor del flanco aumente de una forma radical aproximadamente en la mitad del flanco para volver a decrecer poco después. En cuanto a la pieza con agujero conformada con herramienta de 6 mm, se observa que el adelgazamiento cada vez es más pronunciado. Sin embargo, el dato más curioso es el hecho de que se producen dos adelgazamientos pronunciados separados por una zona donde el espesor es notablemente mayor, de forma similar a la pieza realizada con herramienta de 10 mm de radio, pero de forma más pronunciada en esta ocasión. A este aspecto podría sacársele partido con una estrategia apropiada para una segunda etapa de conformado, sin embargo, el adelgazamiento de las zonas es muy pronunciado, quizás probando a disminuir el agujero inicial los resultados son aceptables para elaborar una estrategia multi-etapa.

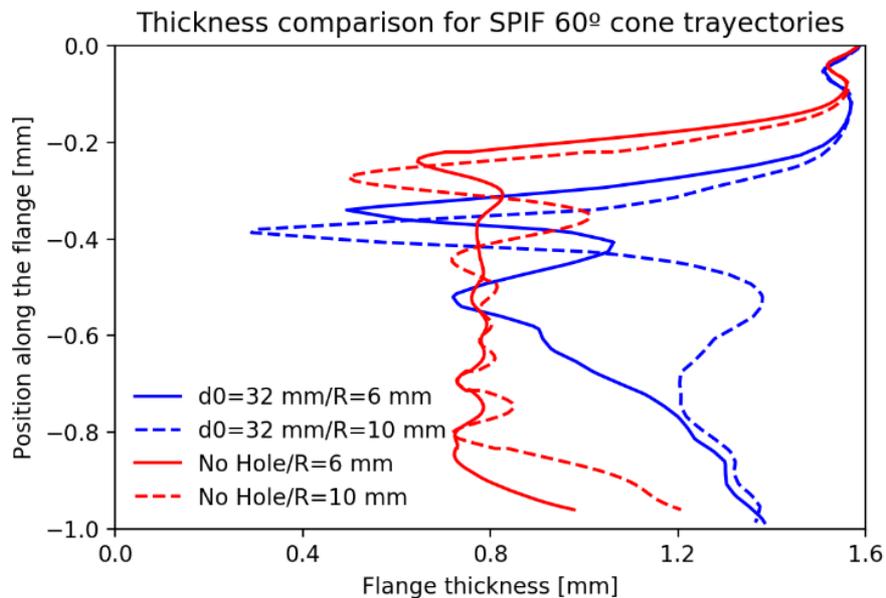


Figura 5.11 Distribución de espesores para rebordeados cónicos a 60° mediante SPIF.

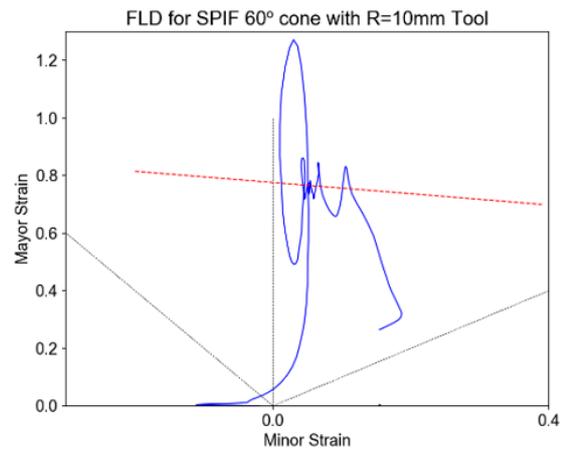
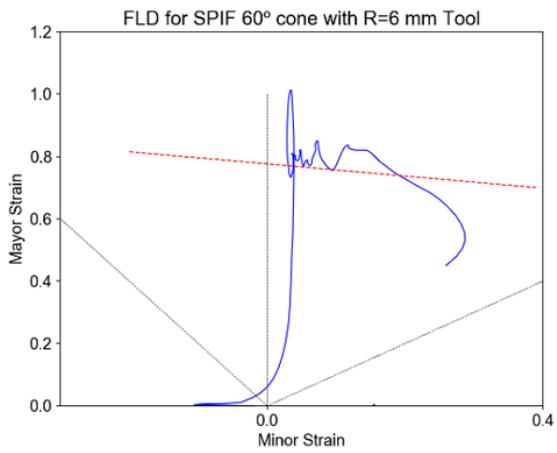
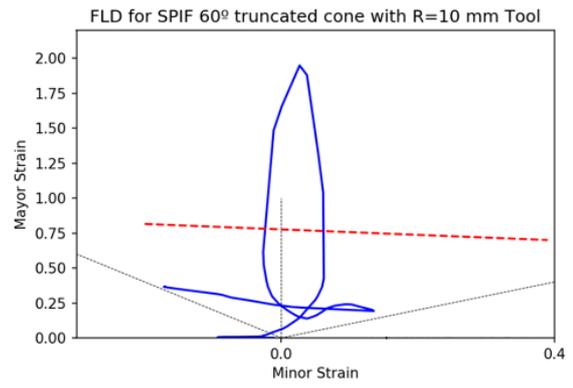
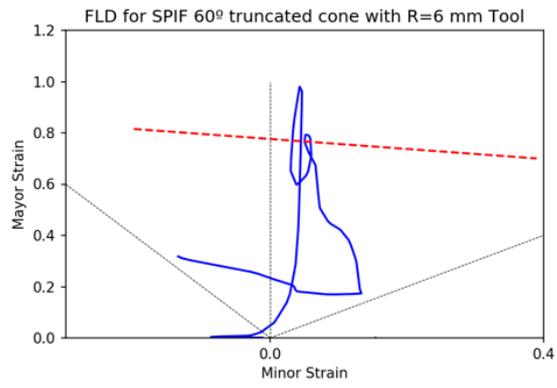


Figura 5.12 Diagramas de conformado límite para rebordeos cónicos a 60° mediante SPIF.



# 6 ESTUDIO PRELIMINAR DE ESTRATEGIAS MULTI-ETAPA

Este capítulo presenta dos alternativas muy diferentes para el comienzo de la segunda etapa en el reboreado de agujero por SPIF. La pieza de partida, producto de la primera etapa, es una forma cónica de las analizadas en el capítulo anterior. Hay que hacer observar que el siguiente estudio está limitado solo al comienzo de la segunda etapa. La continuación del proceso hasta completar el reboreado de agujero queda fuera del alcance de este trabajo. El objetivo del estudio se limita, pues, a evaluar la capacidad de 2 posibles estrategias de conformado muy diferentes entre sí.

## 6.1 Segunda etapa: Trayectoria helicoidal vs. Trayectoria espiral

La primera alternativa Fig. 6.1 se trata de una bajada cilíndrica vertical, básica, la cual se efectuará hasta una altura H desde el plano de la chapa. Estos resultados se obtienen con el objetivo de compararlos con los obtenidos mediante la ejecución de la segunda alternativa, Fig. 6.1 (b). El objetivo de esta estrategia es evitar las tensiones en la dirección radial producidas en la bajada por la expansión del agujero mediante un movimiento espiral horizontal, a una altura H desde el plano de la chapa, de un diámetro inicial reducido que se vaya aumentando gradualmente hasta alcanzar el diámetro final del agujero reboreado. Los parámetros de la segunda estrategia serán optimizados, siendo evidente la clara dependencia de este parámetro con el radio de la herramienta. Ambas trayectorias mostradas, Fig. 6.1, son para herramientas de R=10 mm. Cada 360° se incrementa 0.2 mm la profundidad de la herramienta en la primera estrategia, y en el caso de la segunda será un incremento en la dirección horizontal del radio de la espiral, también de 0.2 mm, valor usado típicamente en operaciones SPIF [5], aumentarlo produciría un incremento en la rugosidad de la pieza, bajando su calidad superficial, y disminuirlo produciría un incremento en el tiempo de realización considerable.

Conformando la chapa en la dirección circunferencial se espera que esta sea la dirección principal de deformación e incluso que pueda producirse una compresión en la dirección meridional contrarrestando las deformaciones generadas en la primera etapa.

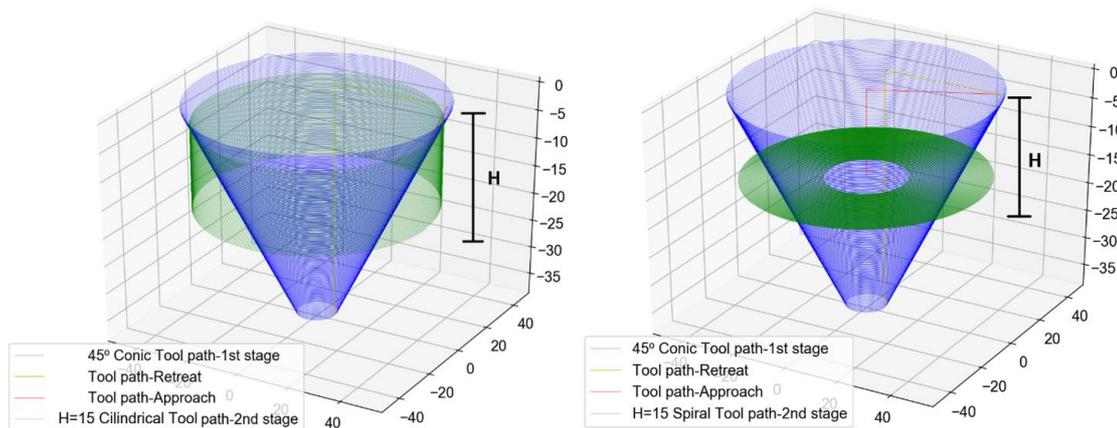


Figura 6.1 Trayectorias del punto de referencia de la herramienta seguidas en la segunda etapa del reboreado de agujeros por SPIF.

## 6.2 Análisis de resultados

Ambas simulaciones se completan, pero, de nuevo, presentan síntomas de haber sufrido una sobreestimación de deformaciones y encontrarse cercanas al fallo, sin embargo, como se aprecia en la Fig. 6.2 (b), la simulación de la primera estrategia muestra signos de estar sufriendo inestabilidad en las deformaciones desde que la herramienta supera una profundidad de 10 mm, Fig. 6.2 (a), mientras que los resultados de la segunda estrategia parecen estables y más cercanos a la realidad, mostrando unas deformaciones uniformemente repartidas en los elementos de la chapa, Fig. 6.3.

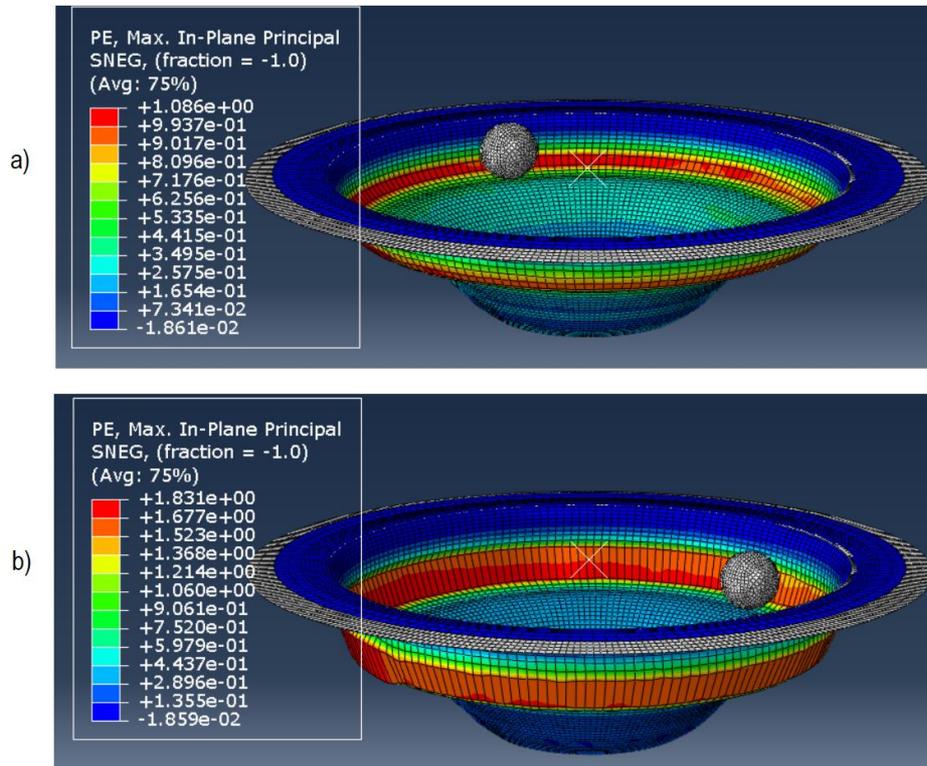


Figura 6.2 Imágenes del modelo en el que se ha seguido una trayectoria helicoidal. (a) Instante previo al inicio de la inestabilidad,  $H=10$  mm. (b) Primera parte de la segunda etapa completada,  $H=15$  mm.

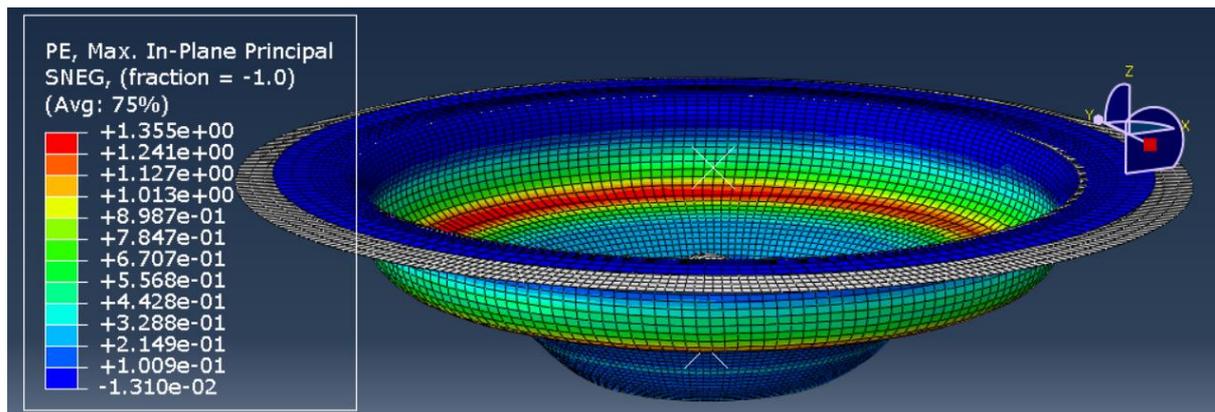


Figura 6.3 Imagen del modelo resuelto siguiendo la trayectoria en espiral.

Observando tanto los resultados obtenidos, Figs. 6.4 y 6.5, como la geometría y mapa de deformaciones, Fig. 6.2 y 6.3, se puede afirmar la alta dependencia que existe con el parámetro  $H$  para diseñar una estrategia que permita obtener una correcta distribución de espesores a lo largo del flanco, pues como se puede ver, una vez completadas las etapas con  $H=15$  la reducción en el espesor que sufren las piezas es suficiente para que no sean competitivas en el mercado, sin embargo, se pueden sacar algunas conclusiones. Para la primera estrategia, Fig. 6.4, una bajada de un valor similar al radio de la herramienta produce una mejoría en la distribución de espesores de la pieza, sin embargo, al aproximarse a valores de  $H$  un 50% mayores que el radio de la herramienta el adelgazamiento que se produce ya es excesivo. Conviene resaltar como a pesar que la herramienta desciende a

lo largo del flanco el adelgazamiento se produce en la misma zona, es decir el material que sufre un adelgazamiento razonable cuando la herramienta se encuentra a una altura de -7 mm aproximadamente se encuentra en la zona inferior-lateral de la herramienta, y conforme esta desciende el material que ha sido adelgazando comienza a desplazarse hacia el lateral-superior de la herramienta y sin embargo continua concentrando la mayor parte de deformaciones, y podemos decir que en ese momento el proceso se encuentra en su configuración crítica. Si observamos el FLD para esta misma pieza, Fig. 6.4 diagrama de la derecha, se ve como durante todo el proceso de adelgazamiento del material las deformaciones se han producido en la dirección principal, la radial, lo cual es la principal causa del inicio de la inestabilidad lo cual significa que la pieza tendría altas probabilidades de fallar en un ensayo de laboratorio.

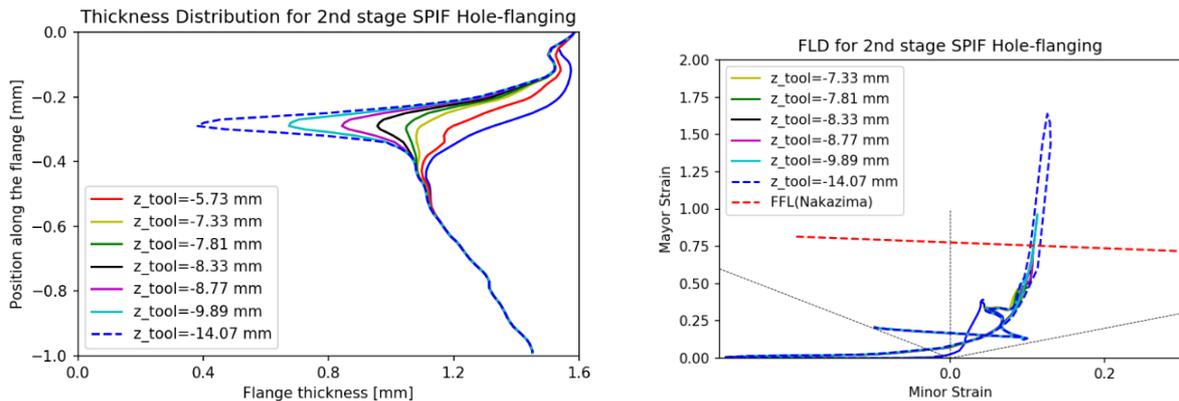


Figura 6.4 Resultados de la segunda etapa siguiendo la primera estrategia propuesta para rebordeado de agujeros mediante SPIF.

En cuanto a la segunda estrategia de conformado para la segunda etapa encontramos bastantes factores interesantes con respecto a la primera estrategia, el primero, es que para un mismo valor de H la zona donde la reducción de espesor es más notable varía, ocurriendo en este caso en el material que se encuentra en la zona inferior de la herramienta. Otro factor a remarcar es el hecho de que pese a que las tensiones en la dirección radial se reducen considerablemente con respecto a la estrategia anterior, sin embargo, la resistencia a deformarse del material cercano al borde del agujero sigue produciendo unas tensiones notables la dirección radial, por tanto se palian solo parcialmente y las tensiones en la dirección circunferencial no alcanzan valores elevados, hay que recordar que estas trayectorias se están probando en un modelos con un HER bastante elevado para los que se suelen realizar mediante SPIF. Del mismo modo que la estrategia anterior se optimizaría reduciendo el valor de H prácticamente a la mitad, en este caso sería interesante analizar el comportamiento del material cuando se ejecuta esta estrategia en zonas del flanco más cercanas al borde y donde el agujero fuera de mayores dimensiones, de este modo no se estimularía tanto la dirección radial y nos enfrentaríamos a otro tipo de resultados. Además, en este concreto ensayo ha coincidido la zona de mayor adelgazamiento en esta etapa con la zona que ya se encontraba con los menores valores de espesor tras ejecutar la primera etapa.

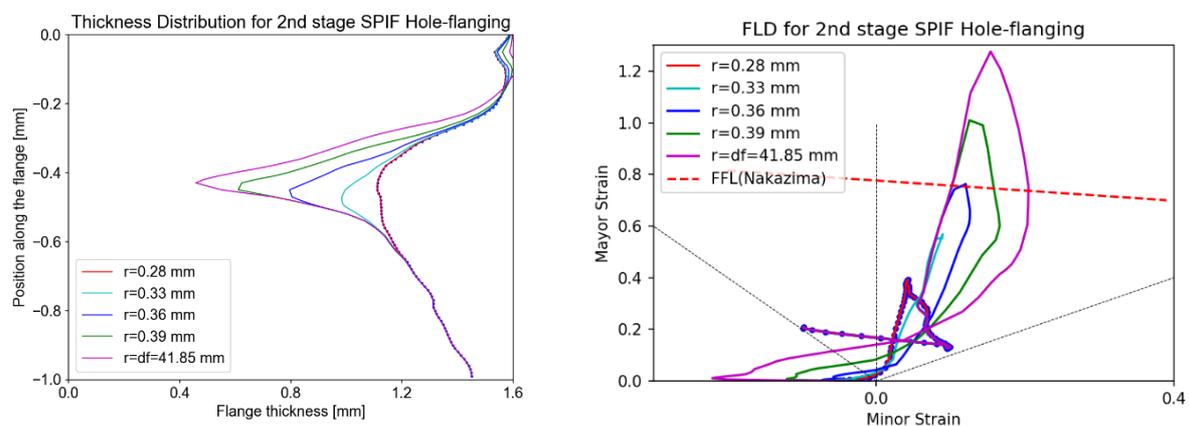


Figura 6.5 Resultados de la segunda etapa siguiendo la segunda estrategia propuesta para rebordeado de agujeros mediante SPIF.



# 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

## 7.1 Conclusiones

En cuanto al uso de MEFs para el estudio de procesos de rebordeado de agujeros por SPIF, puede decirse que esta es una herramienta que, a pesar de no ser todo lo dinámica que se querría a la hora de investigar, debido a los altos tiempos de computación, resulta extremadamente útil para el estudio de proceso o la investigación de nuevas alternativas. Se ha comprobado la validez de los datos que pueden obtenerse, donde, teniendo en cuenta que pueden existir puntos a lo largo del flanco en los que se encuentren ciertas distorsiones, como el punto donde la herramienta realiza la bajada, así como la sobreestimación de las deformaciones cuando estas alcanzan valores muy elevados, los resultados obtenidos son bastante fiables y de gran utilidad en lo que respecta a la información sobre la pieza final, como deformaciones y distribución de espesores. En cuanto a las fuerzas que intervienen en el proceso, los resultados crudos obtenidos del MEF sobreestiman las medidas en el proceso real y presentan grandes oscilaciones que requieren un filtrado previo al análisis. Sin embargo, una vez filtrada ofrece una información notablemente correcta sobre las fuerzas máximas que intervienen en el proceso, a pesar de que la distribución total de fuerzas no se ajuste completamente a la realidad, por errores en la reproducción del ensayo o numéricos en la resolución, encontrándose un desfase temporal.

En cuanto a las estrategias estudiadas, se confirma el cumplimiento de la ley del seno para trayectorias cónicas de baja pendiente en chapas sin agujero, y la relevancia del agujero inicial, cuya existencia tiene una alta repercusión en todo el flanco rebordeado, factor que no se consideraba al ser un proceso de deformación local, sin embargo, por muy pequeño que sea el agujero, la distribución de espesores se verá afectada y la ley del seno no se cumplirá. Mediante el estudio de trayectorias cónicas también se ha reforzado la premisa en torno al tamaño de las herramientas, mostrándose claramente que en procesos cercanos al fallo la capacidad de conformado plástico de herramienta de pequeño radio es bastante superior. Otro aspecto que merece la pena remarcar es la dependencia del fallo del proceso con la geometría que se desee generar mediante SPIF, viendo que en rebordeado de agujero en una sola etapa se produce el fallo para unos niveles de deformación cercanos a 0.8 por el adelgazamiento de una zona concreta, donde se acumulan las deformaciones, característica similar a la encontrada en la primera estrategia estudiada en el último capítulo, por tanto, si se evitan configuraciones, es decir, geometrías que no propicien que las deformaciones se localicen en una zona, se podrán alcanzar valores de deformaciones superiores a 0.8 a lo largo del flanco sin que encontremos defecto en él.

En cuanto a la estrategia en espiral propuesta para la segunda etapa, los resultados obtenidos no parecen ser muy prometedores, sin embargo, realizar un estudio a fondo para dicha trayectoria puede merecer la pena y analizar los resultados obtenidos para una  $H$  tanto superior como inferior, así como reducir el tamaño de agujero inicial para que se rebajen las tensiones en la dirección radial.

## 7.2 Trabajos futuros

Analizando los resultados de la primera estrategia estudiada en el capítulo 6 se aprecia que para obtener una uniformidad en el espesor la herramienta no debe descender en la primera parte de la segunda etapa más de 7 mm, Fig. 6.2, y debe diseñarse una segunda parte de la segunda etapa donde se reduzca el diámetro del agujero rebordeado si se quieren evitar deformaciones excesivas. Sin embargo, en la segunda estrategia propuesta existen más posibilidades que analizar y el parámetro  $H$  puede variar en un rango bastante amplio. En el caso estudiado coincide el valor del parámetro  $H$  con la zona del flanco que albergaba las mayores deformaciones después de una primera etapa de rebordeado cónico. Si el valor de  $H$  se redujera, se obtendrían unos resultados similares a los obtenidos en la primera estrategia, y también habría que idear una segunda fase de esta segunda etapa. Por otro lado, si el valor de  $H$  aumentara, se incidiría en la zona del flanco cercana al agujero, de esta forma se evitarían las tensiones en la dirección radial que adelgazaban en exceso la zona superior del flanco cuando en una etapa futura se conforme esa zona. Además, la zona del flanco cercana al agujero en rebordeados cónicos, como vimos en el capítulo 5, por el hecho de haber agujero, sufre unas deformaciones notablemente menores y además el adelgazamiento de esta zona no varía en exceso con el aumento de la pendiente de la geometría cónica elaborada en la primera etapa, por tanto, podría ensayarse esta estrategia modelos de mayor pendiente y

analizarse. El principal problema de aumentar el parámetro H es la posibilidad de que se produzcan colisiones entre la chapa y la herramienta, lo cual una máquina con suficientes ejes podría evitar o también podría evitarse aumentando la pendiente en la primera etapa. Esta operación multi-etapa podría acabarse con una tercera etapa cilíndrica básica donde se adelgazaría la zona del flanco más cercana al plano de la chapa y el flanco rebordeado alcanzaría un perfil y un espesor uniforme.

También podría estudiarse la optimización de la primera etapa, utilizando una trayectoria de sección variable, donde la pendiente vaya aumentando conforme aumente la profundidad de la herramienta, de tal forma que cuando se supere la zona media del flanco, donde la reducción del espesor ha alcanzado su máximo y el espesor comienza a aumentar, como se ha visto en el capítulo 5, aumentar también la pendiente de la trayectoria para contrarrestar dicho aumento en el espesor y obtener un flanco con espesor mas uniforme. Además, sabiendo que la ley del seno para piezas con agujero no se cumple, pero el nivel máximo de adelgazamiento del espesor para flancos con pendiente leve es el mismo para piezas con y sin agujero podría controlarse el nivel de adelgazamiento que se desea en el espesor mediante la pendiente inicial de la trayectoria.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Cui, Z., Gao, L., 2010, Studies on hole-flanging process using multistage incremental forming. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2:124–128.
- [2] Borrego, M., Morales-Palma, D., Martínez-Donaire, A. J., Centeno, G., Vallellano, C., 2015. On the study of the single-stage hole-flanging process by SPIF. *Procedia Engineering* 132, 290–297.
- [3] Borrego, M., Morales-Palma, D., Martínez-Donaire, A.J., Centeno, G., Vallellano, C. 2016. Experimental study of hole-flanging by single-stage incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology* 237, pp. 320-330.
- [4] Borrego, M. Analysis of single stage SPIF process applied to the hole flanging operation. Doctoral Thesis.
- [5] D Morales-Palma, M Borrego, A J Martínez-Donaire, J A López-Fernández, G Centeno and C Vallellano. 2018 Numerical study on the thickness homogenization in hole-flanging by single-point incremental forming. *Journal of Physics: Conf. Series* 1063 012183.
- [6] D Morales-Palma, M Borrego, A J Martínez-Donaire, G Centeno and C Vallellano. 2018, Optimization of Hole-Flanging by Single Point Incremental Forming in Two Stages. *Materials* 2018, 11, 2029.
- [7] Montanari, L., Cristino ,VA., Silva, MB., Martins, PAF., 2013, A new approach for deformation history of material elements in hole-flanging produced by single point incremental forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8):1175-1183.
- [8] Yamada, Y.,Koide,M.,1967. Analysis of the bore-expanding test by the incremental theory of plasticity. *International Journal of Mechanical Sciences* 10,1-14.
- [9] Tang, S.C.,1981. Large elasto-plastic strain analysis of flanged hole forming. *Computers and Structures* 13, 363-370.
- [10] Krichen, A.,Kacem, A.,Hbaieb, M.,2011. Blank-holding effect on the hole flanging process of sheet aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 211, 619–626.
- [11] Kacem, A.,Krichen, A.,Manach, P.Y.,2011. Occurrence and effect of ironing in the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology* 211, 1606–1613.
- [12] Kacem, A.,Krichen, A.,Manach, P.Y, Thuillier, S.,Yoon, J.W.,2013. Failure prediction in the hole-flanging process of aluminium Alloys. *Engineering Fracture Mechanics* 99, 251–265.
- [13] Huang, Y.M.,Chien, K.H.,2001b. The formability limitation of the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology* 117, 43-51.
- [14] Bagudanch, I., Lozano-Sanchez, L.M., Puigpinos, L., Sabatera, M., Elizalded, L.E., Elias-Zunigab, A., Garcia-Romeu, M.L., 2015. Manufacturing of polymeric

- biocompatible cranial geometry by single point incremental forming. *Procedia Engineering* 132, 267 – 273.
- [15] Isik, K., Silva, MB., Tekkaya, AE., Martins, PAF., 2014. Formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 214:1557-1565.
- [16] Silva, MB., Nielsen, PS., Bay, N., Martins, PAF., 2011, Failure mechanisms in single point incremental forming of metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 56,893-903.
- [17] Centeno, G., Bagudanch, I., Garcia-Romeu, M.L., Martinez-Donaire, A.J., Vallellano, C., 2013. Experimental study on the overall spifability of AISI 304 sheets under different bending conditions. *Key Engineering Materials* 554-557, pp. 2293-2298.
- [18] Fratini, L., Ambrogio, G., Di Lorenzo, R., Filice, L., Micari, F., 2004. Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. *CIRP Annals Volume 53, Issue 1, Pages 207-210.*
- [20] Hussain, G., Gao, L., 2007. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, 419–435.
- [21] Hussain, G., Khan, H.R., Gao, L., Hayat, N. 2013. Guidelines for Tool-Size Selection for Single-Point Incremental Forming of an Aerospace Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 28:3, 324-329.
- [22] Silva, M.B., Skjoedt, M., Martins, P.A.F., Bay, N., 2008. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48, 73–83.
- [23] Cawley, B., Adams, D., and Jeswiet, J. 2013. Examining Tool Shapes in Single Point Incremental Forming. *Proceedings of NAMRI/SME*, Vol. 41.
- [24] Xu, D., Wu, W., Malhotra, R., Chen, J., Lu, B., Cao, J., 2013. Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 73, 37–46.
- [25] Lu, B., Fang, Y., Xu, D.K., Chen, J., Ou, H., Moser, N.H., Cao, J., 2014. Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 85, 14–29.
- [26] Bambach, M., Voswinckel, H., Hirt, G., 2014, A new process design for performing hole-flanging operations by incremental sheet forming. *Procedia Engineering* 81(C):2305-2310.
- [27] <https://www.custompartnet.com/wu/images/sheet-metal/wipe-bending.png>
- [28] Centeno, G., Martinez-Donaire, A.J., Bagudanch, I., Morales-Palma, D., Garcia-Romeu, M.L., Vallellano, C., 2017. Revisiting formability and failure of AISI304 sheets in SPIF: Experimental approach and numerical validation. *Metals*, 7(12),531

- [29] Liu, Z., Li, Y., Meehan, P. A., 2013. Experimental investigation of mechanical properties, formability and force measurement for AA7075-O aluminium alloy sheets formed by incremental forming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14, 1891–1899.
- [30] Durante, M., Formisano, A., Langella, A., Capece Minutolo, F.M., 2009. The influence of tool rotation on an incremental forming process. *Journal of Material Processing Technology* 209, 4621-4626.
- [31] Martinez-Donaire, A.J., Garcia-Lomas, F.J., Vallellano, C., 2014. New approaches to detect the onset of localised necking in sheets under throughthickness strain gradients. *Materials and Design* 57, 135–145.