

Trabajo Fin de Máster
Máster Ingeniería Industrial

**Análisis del rebordeado de flancos en chapas
de ductilidad reducida mediante conformado
incremental**

Autor: David Palomo Vázquez

Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Máster
Máster Ingeniería Industrial

**Análisis del rebordeado de flancos en chapas de
ductilidad reducida mediante conformado incremental**

Autor:

David Palomo Vázquez

Tutor:

Andrés Jesús Martínez Donaire

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Máster: **Análisis del rebordeado de flancos en chapas de ductilidad reducida mediante conformado incremental**

Autor: David Palomo Vázquez

Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

*A mis padres
y hermanos*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a toda mi familia el apoyo recibido en estos últimos años, que sin duda, es el que me ha ayudado a seguir adelante y llegar hasta esta ansiosa y esperada meta.

A mi tutor Andrés Martínez por enseñarme un poco más acerca de esta rama de la ingeniería, por sus charlas tanto como profesor y como amigo. Y por haberme recibido con agrado en el departamento para la realización de este proyecto.

Finalmente a todos los integrantes del departamento de Ingeniería de los Procesos de Fabricación por toda la ayuda que me han proporcionado durante el desarrollo de este proyecto.

Resumen

Este proyecto se basa en la simulación del comportamiento del Aluminio 2024-T3 ante distintos modelos de chapa con flancos tanto de Stretch como de Shrink, con el fin de obtener unos primeros resultados en este tipo de ensayos. Anteriormente no se han realizado estudios en profundidad de estas simulaciones numéricamente.

Para realizar estos ensayos numéricos se ha utilizado el programa de elementos finitos llamado DEFORM-3D™, en el cual se ha utilizado un punzón de 20 mm con una trayectoria implementada, con el fin de obtener la geometría deseada.

En una primera parte, se ha realizado una descripción de los distintos procesos de conformado incremental, así como de los fenómenos que ocurren durante dicho proceso y de las aplicaciones que tiene.

En una segunda parte se ha descrito la implementación del proceso en el software, así como del material utilizado y trayectorias seguidas por la herramienta, mediante CAM. Incluyendo en esta parte la realización de mallados y los problemas encontrados durante la realización del proyecto.

En una tercera parte se ha explicado la elaboración del proceso experimental, aunque no se ha llevado a cabo en el taller.

Finalmente, una vez realizadas las simulaciones y solucionados los numerosos problemas presentados durante la ejecución de éstas, se procede a la representación de resultados numéricos, con el fin de obtener las fuerzas, deformaciones y defectos que se han producido en los ensayos.

Índice general

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Procesos de conformado incremental.....	3
1.2.1. Spinning (conformado rotativo)	3
1.2.2. SPIF, TPIF y Multistage Forming.....	4
1.3. Single point incremental forming (SPIF)	5
1.4. Conformabilidad en ISF.....	7
1.4.1. Mecanismos de deformación incremental.....	7
1.4.1.1. Cortadura (Tensión tangencial)	7
1.4.1.2. Tensiones de contacto.....	9
1.4.1.3. Flexión bajo tensión.....	10
1.4.1.4. Efectos cíclicos.....	10
1.4.1.5. Presión hidrostática.....	11
1.4.2. Diagrama límite de conformado (FLD)	11
1.5. Rebordeado de agujeros mediante SPIF.....	15
1.6. Rebordeado de flancos.....	16
1.7. Aplicaciones del ISF.....	17
1.8. Objetivos del proyecto.....	18

Capítulo 2: Construcción del modelo numérico

2.1. Generación de los modelos en CATIA.....	20
2.2. Generación de la trayectoria.....	20
2.3. Definición del material.....	23
2.4. Elementos.....	25
2.4.1. Punzón.....	25
2.4.1.1. Implementación del punzón en DEFORM-3D™	26
2.4.2. Chapa.....	27
2.4.2.1. Implementación de la chapa en DEFORM-3D™	29
2.4.3. Backing plate.....	30

2.4.3.1. Implementación de backing plate en DEFORM-3D™	31
2.5. Condiciones de contorno.	31
2.6. Interacción entre objetos.....	32
2.7. Controles de simulación.....	34
2.8. Problemas producidos en otros modelos.	34
2.8.1. Arrastre de material debido al tamaño de los elementos.	34
2.8.2. Rotura en la zona del radio (doblez)	35
2.8.3. Doblado excesivo.....	35
2.8.4. Punzón con eje de revolución vertical.....	36

Capítulo 3: Construcción del modelo experimental

3.1. Generación de los modelos en DS Catia® v5.....	38
3.1.1. Chapa.....	38
3.1.2. Utillaje.....	41
3.2. Generación de la trayectoria.....	42

Capítulo 4: Resultados y análisis

4.1. Fuerzas producidas en la herramienta.....	46
4.2. Diagramas FLD's.....	52
4.3. Deformaciones en pestaña y bordes.....	57
4.3.1. Probetas a medida (Tailored test parts).....	58
4.3.2. Recuperación elástica en flancos.....	62
4.4. Características generales producidas en los ensayos.	63
4.4.1. Bulge.....	63
4.4.2. Cracks.....	66
4.5. Tensión hidrostática.	67

Capítulo 5: Conclusiones y desarrollos futuros

5.1. Conclusiones.....	78
5.2. Desarrollos futuros.....	79
6. Bibliografía.....	80

Índice de figuras

Figura 1.1- Spinning o conformado rotativo

Figura 1.2- Shear spinning y representación esquemática de la ley del seno

Figura 1.3- Single-Point incremental forming, SPIF

Figura 1.4- Two-Point incremental forming, TPIF

Figura 1.5- Multistage forming

Figura 1.6- Esquema del montaje de un proceso de conformado incremental monopunto

Figura 1.7- Trayectoria seguida por el punzón durante el proceso de conformado incremental

Figura 1.8- Representación del criterio de Von Mises

Figura 1.9- Efecto de la tensión de contacto en la conformabilidad de tres modelos. Gráfica construida utilizando resultados presentados por Smith et al. (2005) y Banabic and Soare (2008). n : coeficiente de endurecimiento.

Figura 1.10- Ejemplo de deformaciones cíclicas dadas en un proceso de ISF (Eyckens et al. (2007))

Figura 1.11- Montaje experimental de un proceso de Hole-Flanging mediante SPIF.

Figura 1.12- Tipologías de flancos

Figura 1.13- Diagrama FLD para distintos estados posibles de deformaciones

Figura 1.14- Esquema de los distintos estados posibles de deformación en función de β

Figura 1.15- Curva de conformado para un proceso de conformado incremental

Figura 1.16- Esquema de los ensayos de Marciniak (a), Nakazima (b), y diferentes geometrías de probetas en ensayos tipo Nakazima (c) Martínez Donaire (2012)

Figura 1.17- Ejemplo de aplicaciones del conformado de flancos. (Costilla de avión y puerta de automóvil respectivamente)

Figura 1.18- Doblado Shrink a realizar en el proyecto mediante conformado incremental

Figura 1.19- Doblado Stretch a realizar en el proyecto mediante conformado incremental

Figura 2.1- Modelos de chapa y backing plate realizados en DS Catia® v5.20

Figura 2.2- Trayectoria para modelo de Stretch.

Figura 2.3- Zoom de trayectoria para modelo de Stretch.

Figura 2.4- Trayectoria realizada en Matlab para modelo de Shrink.

Figura 2.5- Curva de comportamiento AA2024-T3

Figura 2.6- Ventana de Material DEFORM-3D™

Figura 2.7- Punzón semiesférico

Figura 2.8- Punzones semiesféricos DEFORM-3D™

Figura 2.9- Esquema chapas iniciales Shrink.

Figura 2.10- Chapas iniciales de Shrink y Stretch respectivamente.

Figura 2.11- Mallados en DEFORM-3D™ de las chapas de Shrink y Stretch respectivamente.

Figura 2.12- Backing plates en DEFORM-3D™ de Shrink y Stretch respectivamente.

Figura 2.13- Condiciones de empotramiento en DEFORM-3D™

Figura 2.14- Zona de contacto brida-chapa DEFORM-3D™

Figura 2.15- Zona de contacto brida-chapa vista inferior DEFORM-3D™

Figura 2.16- Zona de contacto inicial chapa-punzón DEFORM-3D™

Figura 2.17- Momento en el que el punzón arrastra el material.

Figura 2.18- Acabado superficial debido a los enganches del punzón

Figura 2.19- Alabeo de la chapa debido a un enganche del punzón

Figura 2.20- Punzón con eje de revolución vertical y horizontal respectivamente.

Figura 3.1- Centro de mecanizado vertical EMCOTRONIC TM02 VMC200

Figura 3.2- Chapa realizada en Catia® v5.20 para el ensayo experimental.

Figura 3.3- Modelo de chapa 1

Figura 3.4- Modelo de chapa 2

Figura 3.5- Modelo de chapa 3

Figura 3.6- Modelos experimentales de las chapas 1 y 2.

Figura 3.7- Utillaje realizado en Catia® v5.20

Figura 3.8- Utillaje realizado en Catia® v5.20 y utillaje real de izquierda a derecha

Figura 3.9- Trayectoria para modelo de Stretch.

Figura 3.10- Zoom de trayectoria para modelo de Stretch.

Figura 3.11- Ventana del programa Winpost.

Figura 3.12- Código del ensayo experimental para máquina CNC

Figura 3.13- Subrutina del código para el ensayo experimental para máquina CNC

Figura 4.1-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo H50R12-T (número 7).

Figura 4.2-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R50H12-C y R50H30-C respectivamente.

Figura 4.3-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo R15H12-C y R30R12-C respectivamente.

Figura 4.4-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R50H12-T y R50H30-T respectivamente.

Figura 4.5-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R15H12-T y R50H12-T respectivamente.

Figura 4.6-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo R50H12-C con 1.2 mm de espesor y 1.6 mm respectivamente.

Figura 4.7-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R50H12-C y R50H12-T respectivamente.

Figura 4.8-Puntos seleccionados para la representación de la FLD en la cara delantera. (CONTACTO CON PUNZON)

Figura 4.9-Puntos seleccionados para la representación de la FLD en la cara trasera. (NO CONTACTO CON PUNZON)

Figura 4.10 Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H30-T conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Figura 4.11 Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H12-T conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Figura 4.12 Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H30-C conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Figura 4.13 Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H12-C conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Figura 4.14 Diagramas FLD's numéricos para la chapa R15H12-C conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Figura 4.15 Diagramas FLD's numéricos para la chapa R15H12-T conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Figura 4.16-Nuevas preformas de Stretch y Shrink respectivamente.

Figura 4.17- Resultado del flanco en el ensayo R50H12-T (número 7) antes y después de los dos cambios realizados en la probeta (vista superior).

Figura 4.18-Resultado del flanco en el ensayo R50H12-T (número 7) antes y después de los dos cambios realizados en la probeta (vista frontal).

Figura 4.19-Resultado del flanco en el ensayo R50H30-T (número 8) antes y después del cambio realizado en la probeta (vista frontal).

Figura 4.20-Resultado del flanco en el ensayo R12H30-C (número 2) antes y después del cambio realizado en la probeta (vista frontal).

Figura 4.21-Cortes realizados en la chapa R50H12-T (número 7) para calcular la recuperación elástica producida.

Figura 4.22-Springback producido en los cortes A, B y C para el ensayo R50H12-T (número 7).

Figura 4.23-Bulge.

Figura 4.24-Zona de empotramiento

Figura 4.25- Empotramiento modificado para ensayos de Stretch.

Figura 4.26-Crack.

Figura 4.27- Selección de un punto para la representación de la tensión hidrostática en la zona inferior de la bajada

Figura 4.28-Captura de un instante de tiempo inicial durante el proceso de conformado de una chapa de Stretch.

Figura 4.29- Tensión hidrostática en un intervalo de tiempo en un ensayo de Stretch

Figura 4.30-Captura de un instante de tiempo durante el proceso de conformado de una chapa de Stretch.

Figura 4.31- Tensión hidrostática en un intervalo de tiempo en un ensayo de Stretch

Figura 4.32- Tensión hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Stretch

Figura 4.33- Tensión principal máxima, media, mínima e hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Stretch R50H12-T

Figura 4.34- Tensión principal máxima, media, mínima e hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Stretch R50H30-T

Figura 4.35-Captura de un instante de tiempo durante el proceso de conformado de una chapa de Shrink

Figura 4.36- Tensión hidrostática en un intervalo de tiempo en un ensayo de Shrink

Figura 4.37- Tensión hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Shrink

Figura 4.38- Tensión principal máxima, media, mínima e hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Shrink R50H12-C

Figura 4.39- Selección de un punto para la representación de la tensión hidrostática en el espesor

Figura 4.40- Representación de la tensión hidrostática creada durante el contacto punzón-chapa en un punto.

Figura 4.41- Evolución de la presión hidrostática en el espesor (Fang et al. (2014))

Capítulo 1

Introducción

Los procesos de conformado incremental de chapa (Incremental Sheet Forming, ISF), están siendo estudiados actualmente, la importancia del estudio de estos procesos se debe a los altos costes en equipos y herramientas que presentan los procesos convencionales tales como el estampado, además de la escasa flexibilidad que presentan. Estos procesos son más económicos y pueden ser utilizados para el prototipado y pequeñas producciones en serie. Actualmente, las industrias luchan por conseguir productos de alta calidad a precios competitivos, por tanto, esto genera altas exigencias en innovación, flexibilidad y sostenibilidad en los procesos de fabricación.

Cabe destacar que con ISF se mejora la conformabilidad del material en relación con otros procesos actuales. Los mecanismos que retrasan la fractura aumentando la conformabilidad son el carácter local, incremental y cíclico de la deformación, el efecto de la flexión producido por la acción de la herramienta, la presión hidrostática, las deformaciones tangenciales o cortantes y la presión de contacto.

Uno de los procesos realizados mediante SPIF (Single Point Incremental Forming) es el rebordeado de agujeros (hole flanging), en el que partimos inicialmente de una chapa con un agujero central y mediante un punzón es sometido a deformación incrementando poco a poco el diámetro del agujero interior hasta producir un borde.

En este proyecto se va a realizar un proceso de conformado de flancos, en el cual se van a conformar las pestañas de una serie de chapas tanto cóncavas (Shrink) como convexas (Stretch) mediante SPIF. La finalidad es obtener unos modelos numéricos mediante el programa de elementos finitos DEFORM-3D™ que nos permitan ver qué sucede en el flanco, así como tensiones, deformaciones entre otros resultados de importancia y así poder comparar con futuros ensayos experimentales que se realicen.

1.1. Antecedentes

Recientemente el grupo de investigación de Ingeniería de Procesos de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sevilla se encuentra desarrollando el proceso de conformado “hole flanging”, el cual ha realizado numerosas publicaciones como C. Vallellano et al. (2016) que estudió los procesos de “hole flanging” en aluminio 7075-O, estudió la conformabilidad del proceso con tres radios distintos de herramientas, y el efecto que tenía la flexión, la aparición del cuello y los distintos recorridos en el diagrama FLD.

Sin embargo, actualmente quieren adentrarse en un nuevo proyecto para el estudio del rebordeado de flancos en materiales de escasa ductilidad como el aluminio 2024-T3 y polímero, realizando operaciones de conformado incremental con chapas de diferentes radios y flancos, como las que se van a estudiar en este proyecto con el fin de obtener resultados que se desconocen actualmente.

Internacionalmente, algunos autores ya han escrito sobre el proceso convencional del doblado de flancos como Lei Chen et al. (2014) que estudia el arrugamiento que se produce en la chapa en procesos convencionales e investiga la influencia que tiene al variar el radio, longitud del flanco, radio de acuerdo y presión del proceso en tres tipos de materiales distintos.

La universidad de Aachen ha puesto de manifiesto que el rebordeado incremental supera con creces las limitaciones del proceso convencional, en bordes tanto estirados como comprimidos.

Otro artículo que se puede encontrar sobre el estudio de doblado de flancos ha sido desarrollado por Tong Wen et al. (2015), en el que estudió numerosos procesos de SPIF con un punzón de forma cónica en chapas convexas y cóncavas, observando los parámetros que se daban para que se produjera pandeo en la chapa, finalmente descubrió que en chapas curvas se producía un alabeo menor debido a las mayores deformaciones que se producían.

En este proyecto nos vamos a centrar en el comportamiento que va a tener el Aluminio 2024-T3 en estos procesos, Pravin Kulkarni et al. ha estudiado el efecto de recuperación elástica (springback) en este material tanto por métodos numéricos como experimentales, obteniendo resultados similares para ambos procesos.

Y finalmente y no menos importante Bambach et al realizó un artículo en el cual estudiaba distintos fallos que se producían en chapas tanto de Stretch como de Shrink, en ensayos experimentales. Aportando soluciones a algunos de ellos y representando como variaban estos con la longitud del flanco y con el radio de curvatura de ésta.

1.2. Procesos de conformado incremental

Hay numerosos procesos de conformado incremental (Incremental sheet forming, ISF), todos ellos son procesos caracterizados por que, en cada instante, sólo una pequeña porción de material de la chapa se está deformando y poseen un corto periodo de tiempo entre el diseño y la fabricación.

El comienzo de estos procesos de conformado de una pieza de metal fue ideado por Leszak (1967). Desde entonces hasta ahora han ido apareciendo nuevos procesos hasta conseguir los que actualmente tenemos, que son más factibles.

1.2.1. Spinning (conformado rotativo)

El spinning o conformado rotativo se caracteriza por la rotación de una pieza sujeta rígidamente contra un mandril mientras la herramienta se acerca progresivamente y va deformando la chapa con la forma requerida con respecto a dicho mandril. La herramienta usada tiene forma de rodillo y puede ser accionada manual o mecánicamente, el equipo necesario es similar a un torno. Éste es uno de los procesos más primitivos puesto que tiene sus orígenes en la Edad Media.

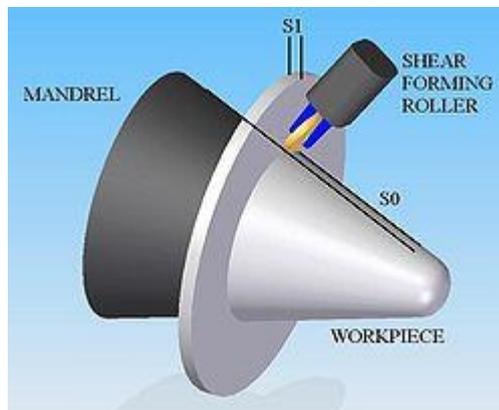


Figura 1.1- Spinning o conformado rotativo

Existe una variante denominada shear spinning en la que se lleva a cabo un estirado en vez de doblado de chapa, el espesor durante este proceso varía según una ley llamada ley del seno.

$$tf = ti * \text{sen}(\alpha)$$

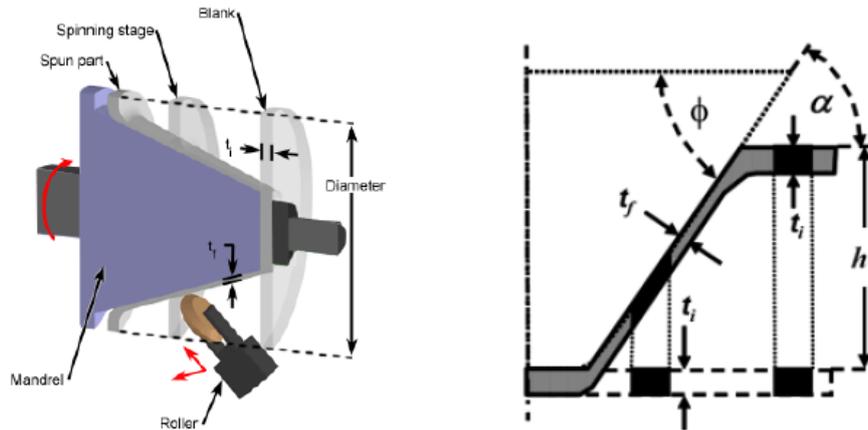


Figura 1.2- Shear spinning y representación esquemática de la ley del seno

1.2.2. SPIF, TPIF y Multistage Forming

Tenemos tres tipos basados en el mismo fundamento que son: *Single-Point incremental forming (SPIF)*, *Two-Point incremental forming (TPIF)* y *Multistage forming*.

En el primero solo se utiliza el punzón con los útiles necesarios para la fijación de la pieza como podemos observar en la *figura 1.3*.

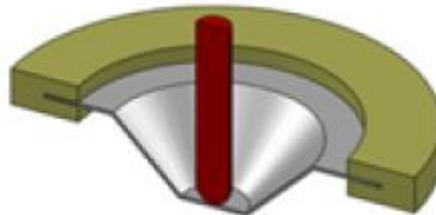


Figura 1.3- Single-Point incremental forming, SPIF

Sin embargo en un proceso TPIF es necesario el uso del punzón principal que seguirá la trayectoria y otro útil como contraherramienta, ya sea un punzón o una matriz parcial o completa como observamos en la *figura 1.4*.

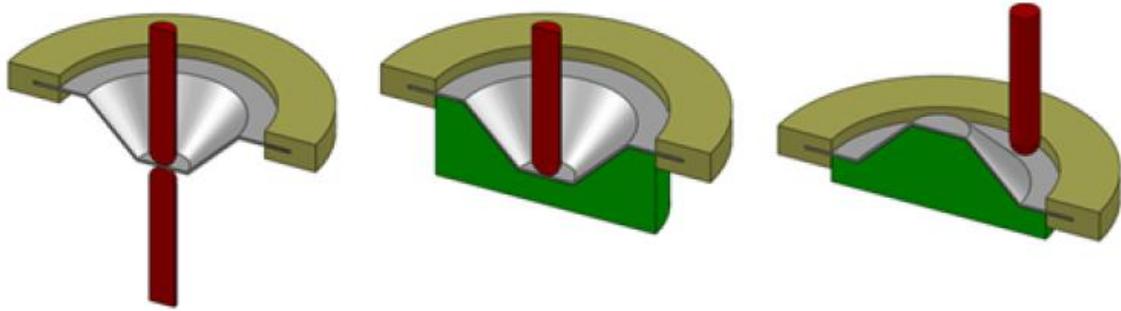


Figura 1.4- Two-Point incremental forming, TPIF

Por último el Multistage forming basado en la generación de una determinada geometría mediante numerosas pasadas de la herramienta, consiguiendo de ésta forma un ángulo elevado, en torno a 90° , si nos referimos a la pared de un cono, característica que no se conseguiría de una sola pasada con otro proceso.

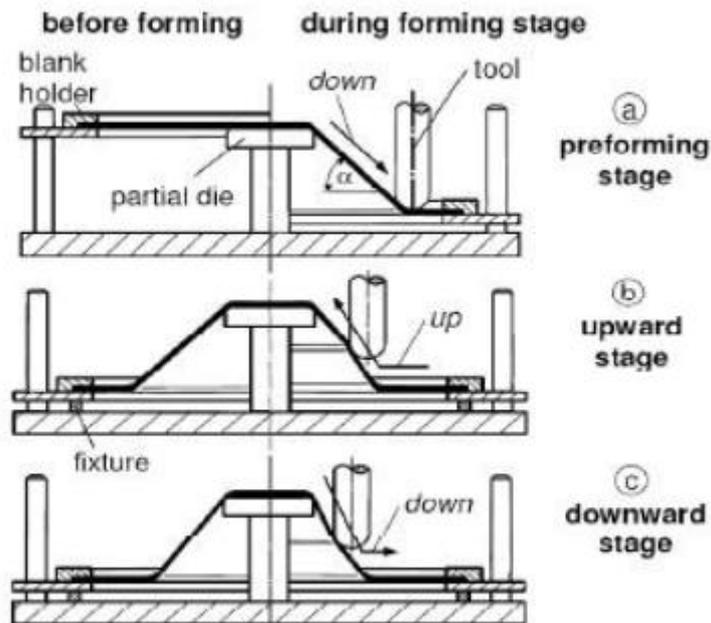


Figura 1.5- Multistage forming

1.3. Single point incremental forming (SPIF)

Ahora nos centraremos en el proceso que va a ser utilizado en este proyecto, conformado incremental monopunto (Single Point Incremental Forming, SPIF). En la Figura 1.6 podemos observar los distintos elementos que componen este proceso,

todos ellos forman un conjunto que irá sujeto a la máquina de control numérico, para evitar el movimiento de la chapa al ser conformada.

Durante el proceso, no existe ninguna matriz de apoyo que soporte la superficie inferior de la lámina, por tanto, estamos hablando de un proceso SPIF y no de un TPIF. La lámina está sujeta por dos bridas, una superior y otra inferior que presionan los bordes exteriores de la lámina a conformar, quedando totalmente sujeta en todo su perímetro.

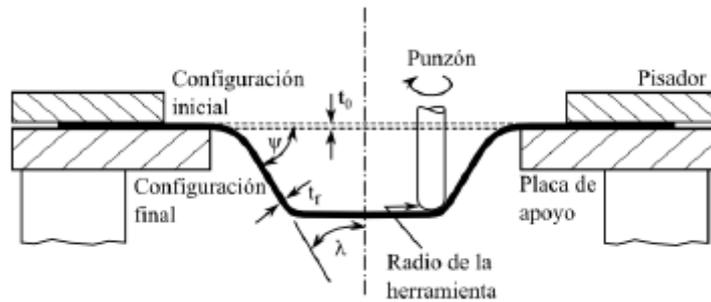


Figura 1.6- Esquema del montaje de un proceso de conformado incremental monopunto

En SPIF se puede obtener una geometría determinada, que puede ser axisimétrica a diferencia de otros procesos. Dicha geometría se consigue gracias a un punzón con forma semiesférica que traza una trayectoria implementada a través de un código de control numérico, dicha trayectoria en este proyecto está formada por líneas rectas formando un cuadrado y en cada pasada se incrementa la profundidad como podemos ver en la figura 1.7. Dicho punzón puede girar sobre sí mismo o permanecer fijo, en este caso permanecerá fijo. Aunque se está estudiando el caso de punzón libre con el fin de observar los cambios que produciría en el conformado de la chapa.

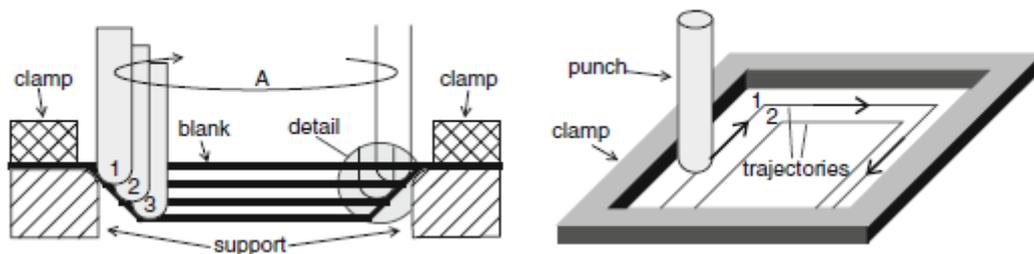


Figura 1.7- Trayectoria seguida por el punzón durante el proceso de conformado incremental

Las principales **ventajas** del proceso SPIF son:

- Producción de piezas directamente del archivo CAD.
- No hay necesidad de una matriz positiva o negativa.
- Dimensión de las partes sólo están limitadas por la máquina herramienta.
- Los cambios de diseño se pueden realizar fácilmente y rápidamente.
- Aumento de la capacidad de conformabilidad del material.
- Se puede realizar en una máquina CNC convencional.
- Debido a la naturaleza incremental del proceso, las fuerzas son pequeñas.
- Buena calidad de acabado de la superficie.

Las principales **desventajas** del proceso SPIF son:

- Tiempo más largo de procesamiento en comparación con la embutición profunda convencional.
- Limitado a pequeños lotes de producción.
- La recuperación elástica se produce inevitablemente.
- Menos precisión en la geometría.

1.4. Conformabilidad en ISF

1.4.1. Mecanismos de deformación incremental

A continuación, se analizarán los efectos de los mecanismos que aumentan la conformabilidad del material.

1.4.1.1. Cortadura (Tensión tangencial)

En términos de estabilidad, la cortadura podría evitar completamente la formación del cuello, ya que no existen fuerzas de tracción en el plano de la chapa. Sin embargo, el estiramiento que se produce es el efecto de más relevancia.

Un esfuerzo de cortadura adicional reducirá la tensión de fluencia. Esto se deduce directamente, desde el criterio de fluencia de von Mises, y el efecto se presenta gráficamente en la *figura 1.8*

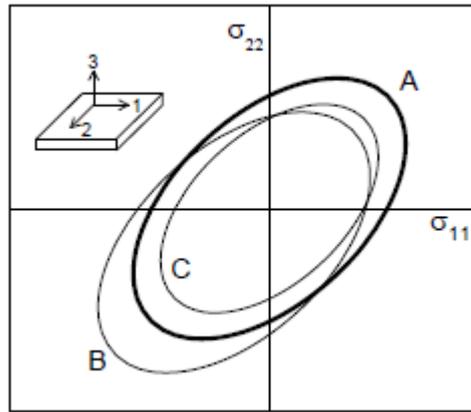


Figura 1.8- Representación del criterio de Von Mises

Si una lámina se estira un poco por debajo de la tensión de fluencia, un pequeño esfuerzo de cortadura adicional puede ser suficiente para iniciar la deformación plástica. Esto demuestra que la tensión de cortadura es capaz de localizar la deformación. Si la tensión de cortadura es causada por un movimiento tangencial, en este caso por la herramienta, el esfuerzo cortante no puede mantenerse si el cuello comienza a crecer. Sin un esfuerzo de cortadura, la tensión de fluencia en el plano aumenta y el mecanismo de deformación es estable hasta que la tensión en el plano es lo suficientemente alta como para deformar plásticamente la lámina, incluso sin la tensión de cizallamiento adicional.

El resultado de este efecto estabilizador es el aumento del límite de formación del cuello.

En la literatura el efecto de cortadura en la conformabilidad en ISF ha sido descrito de diferentes formas. Sawada hizo una mención de la cortadura a través de espesor en la dirección del movimiento del punzón como conclusión de las simulaciones FEM. De hecho este estudio fue uno de los primeros en investigar en detalle la deformación de la chapa alrededor del contacto con el punzón (Sawada y col, 2001). Bambach también ha notado la presencia de cortadura en su simulación de ISF, y observó que el nivel de esfuerzo cortante depende tanto del diámetro del punzón como de la bajada vertical del punzón (Bambach et al, 2003).

Algunos efectos de la cortadura también se detectaron en la dirección del movimiento de punzón. Eyckens ha detectado la presencia de cortadura mediante el taladrado de pequeños agujeros en la chapa y midiendo su orientación después de la deformación.

1.4.1.2. Tensiones de contacto

La tensión de contacto es la tensión de compresión normal a la superficie de la lámina causado por la herramienta. Es más notable cuando el radio de la herramienta es menor. Debe distinguirse entre los contactos de una cara y de doble cara. En un contacto de una sola cara la tensión de contacto varía con el espesor de la lámina. En la zona de contacto se tiene un máximo, pero en el otro lado de la hoja es cero.

El efecto sobre la localización y la estabilización es equivalente al efecto de la tensión de cortadura adicional. En el punto de contacto la tensión de fluencia en el plano se reduce ligeramente, causando una deformación localizada y si el cuello crece demasiado, el contacto se pierde o al menos se reduce, el aumento de la tensión de fluencia en el plano evita el crecimiento inestable.

Smith ha desarrollado un modelo analítico que predice el efecto de la tensión de contacto según la posición y la forma del FLC (*Smith et al, 2005*).

Algunos resultados de ambos modelos se presentan en la *figura. 1.9* que muestra el efecto de la lámina en el inicio de la formación del cuello en condiciones de deformación plana, tenga en cuenta que el modelo de Smith depende del coeficiente de endurecimiento n . Ambos modelos predicen que la presencia de la tensión de contacto elevará el FLC y en consecuencia, la capacidad de conformación del material.

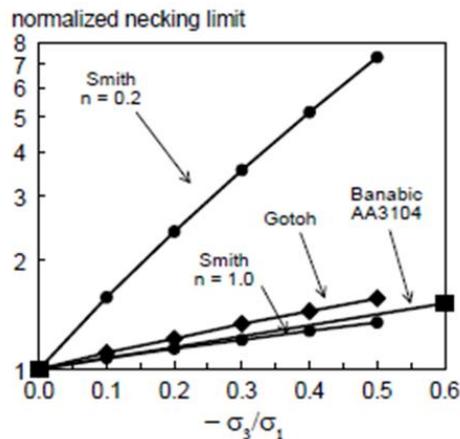


Figura 1.9- Efecto de la tensión de contacto en la conformabilidad de tres modelos. Gráfica construida utilizando resultados presentados por Smith et al. (2005) y Banabic and Soare (2008). n : coeficiente de endurecimiento.

1.4.1.3. Flexión bajo tensión

La flexión ejercida sobre el espesor por la herramienta provoca que la cara externa de la lámina esté sometida a tracción mientras que en las internas haya compresión. Por tanto, la tensión no es uniforme en el espesor de la lámina.

Esto causa que si tenemos zonas de compresión la fractura del material se retrasará. Si suponemos que el material posee una grieta, en aquellas zonas donde existan tensiones de tracción la grieta se propagaría, sin embargo, en las zonas con tensión de compresión, esas grietas no se propagarán retrasando por tanto la fractura del material.

La fuerza de tracción depende tanto de la deformación de estiramiento (tensión de la fibra en el centro), como de la deformación por flexión (deformación de la fibra exterior en flexión pura).

1.4.1.4. Efectos cíclicos

En una operación de ISF el punzón pasa por un cierto punto del material varias veces. Cada paso provoca la flexión e inflexión con la posible recuperación del material, por lo que el material es sometido a esfuerzo cíclico.

La conclusión de varios investigadores, por ejemplo *Bambach et al. (2003)*, *Eyckens et al. (2007)*, es que los efectos cíclicos pueden mejorar la capacidad de conformación, pero una investigación detallada de éste fenómeno requiere el desarrollo de modelos de materiales sofisticados, por lo tanto no se ha estudiado en profundidad.

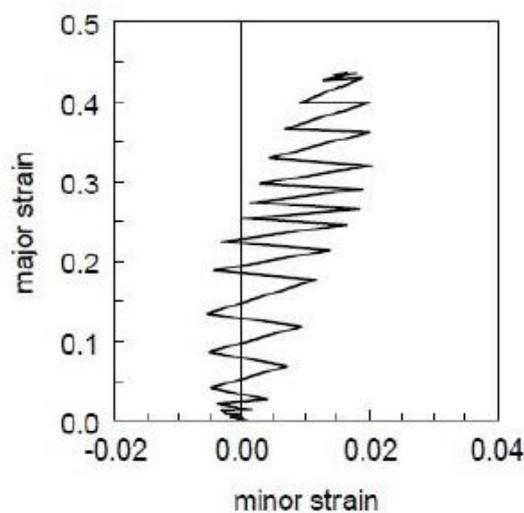


Figura 1.10- Ejemplo de deformaciones cíclicas dadas en un proceso de ISF (Eyckens et al. (2007))

Este mecanismo no debe confundirse con la flexión bajo tensión mencionado anteriormente. Debido a que la flexión repetitiva implica, que la distribución de la tensión sobre el espesor es fundamentalmente heterogénea. El efecto estabilizador de la carga cíclica, implica esfuerzo cíclico, pero no que la distribuciones de tensiones sobre el espesor sea homogénea. En una situación práctica estos mecanismos serán difíciles de diferenciar, pero sus efectos son fundamentalmente diferentes.

1.4.1.5. Presión hidrostática

La presión hidrostática tiene como resultado la localización de la zona de deformación, en particular las limitaciones creadas por el material circundante deformado elásticamente (*Hirt et al, 2002*).

El principal efecto que produce es la triaxialidad de las cargas, que al ser mayores habrá mayor posibilidad de que los huecos internos del material crezcan y se produzca necking y fractura dúctil, disminuyendo de esta forma la conformabilidad.

Todos estos mecanismos de aumento de conformabilidad hacen que el fenómeno de necking no aparezca llegando a desaparecer la curva de límite por estricción y con ello la zona de inestabilidad. Además la línea límite de fractura se eleva en procesos de conformado incremental de chapa, retrasando aún más el fallo.

1.4.2. Diagrama límite de conformado (FLD)

El diagrama límite de conformado, fue propuesto por Keeler y Backhofen (1963) y Goodwin (1968). Sobre el diagrama se representa la curva límite de conformado (Forming Limit Curve, FLC), la cual muestra los valores de deformación principal máxima y mínima en el plano de la chapa que producen el fallo de ésta.

La conformabilidad de una chapa metálica está generalmente definida como la habilidad que tiene el metal para deformarse hasta la forma deseada, sin producirse la fractura o la reducción excesiva del espesor por estricción.

Cualquier tipo de metal sólo puede deformarse bajo estas condiciones hasta unos valores límites. Los diagramas de límites de conformado representan estos límites.

A continuación, en la fig.1.13 puede verse una representación general de este tipo de diagramas.

En la parte izquierda del diagrama, las deformaciones en las dos direcciones del plano de la chapa tienen sentido opuesto, una es negativa y otra es positiva y abarca todos los estados desde un ensayo de tensión hasta el estado de deformación plana, que es

cuando uno de los dos valores de deformación es cero. En el lado derecho, ambas deformaciones son positivas y reúne todos los estados posibles que van desde el estado de deformación plana hasta el estado de estirado biaxial.

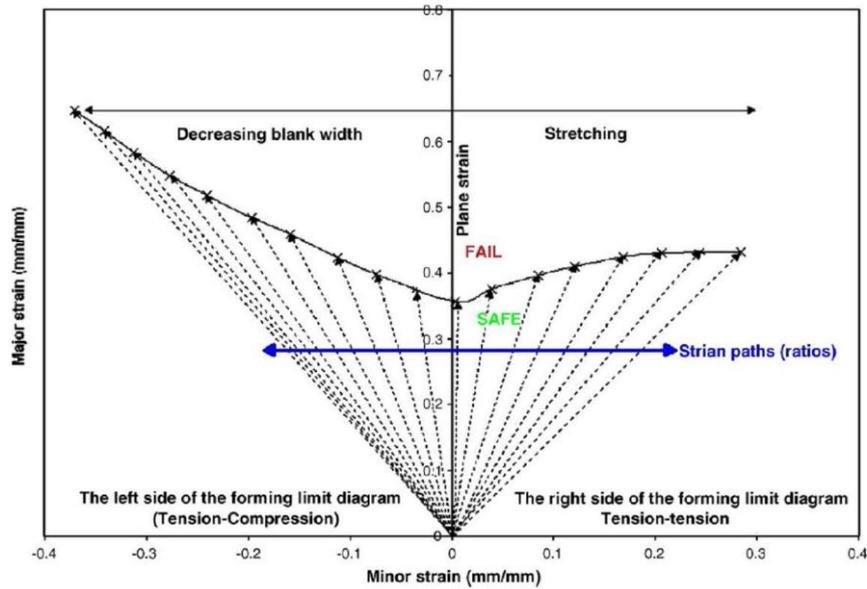


Figura 1.13- Diagrama FLD para distintos estados posibles de deformaciones

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

$$\epsilon_2 = \beta \epsilon_1$$

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

- $\beta = 1$, en este caso $\epsilon_1 = \epsilon_2$, la deformación es constante en todas las direcciones; este se refiere al estado equi-biaxial (*equi-biaxial*).
- $\beta = 0$, en este caso no hay deformación en la segunda dirección principal $\epsilon_2 = 0$ y es llamado *deformación plana (plane-strain)*.
- $\beta = -0.5$, este es el estado de la prueba de tensión en un material isotrópico y se denomina uniaxial (*uniaxial*).

- $\beta = -1$, en este caso $\epsilon_1 + \epsilon_2 = 0$ y consecuentemente $\epsilon_3 = 0$; no hay cambio en el espesor. Este estado se presenta en las bridas de la embutición profunda. Este caso se denomina embutición profunda (*deep-draw*)

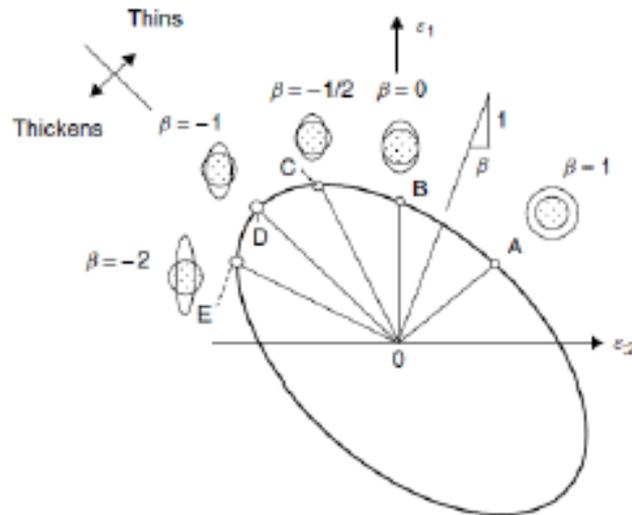


Figura 1.14- Esquema de los distintos estados posibles de deformación en función de β

Los valores a los que pueden llegar las deformaciones sin que se produzca la fractura del componente son conocidos como los límites de conformado.

Los diagramas límites de conformado consisten en un conjunto de curvas de conformado en el plano de las deformaciones principales.

El diagrama límite de conformado es considerado como una propiedad del material, sin embargo, es función de los parámetros del proceso.

Esta diferencia se debe a la peculiaridad de los procesos mecánicos que ocurren durante el conformado incremental. La deformación plástica inducida por la herramienta es muy localizada y está confinada en el área de contacto vecino y va progresando incrementalmente con el movimiento de la herramienta según la trayectoria asignada.

Como consecuencia, se alcanzan mayores deformaciones en el material antes de que se produzca la rotura de éste.

Finalmente, cabe mencionar que la curva de conformado para un proceso de conformado incremental generalmente tiene la forma de una recta con pendiente negativa en el primer cuadrante, esto es, cuando las deformaciones principales del plano de la plancha son positivas.

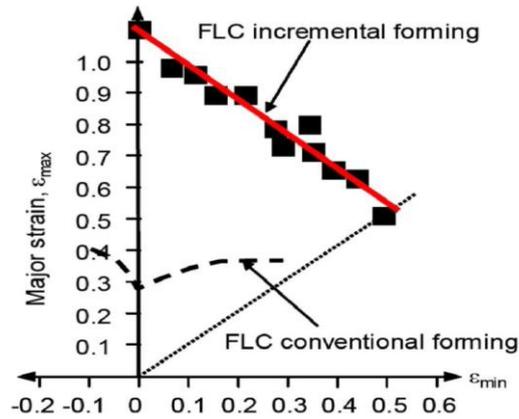


Figura 1.15- Curva de conformado para un proceso de conformado incremental

La obtención del FLC se realiza normalmente de forma experimental, a pesar de haberse realizado numerosos trabajos teóricos para su predicción. La estimación experimental de la curva límite requiere la realización de ensayos bajo diferentes caminos en los que las deformaciones principales son proporcionales. Los ensayos más habituales para la obtención del FLC son los ensayos tipo Marciniak (1967) y Nakazima (1968), caracterizados por ser ensayos en los que el estado tensional se mantiene generalmente plano y por generarse caminos de deformación proporcionales. En la Figura 1.16 se muestran esquemáticamente dichos ensayos además de diferentes probetas con las que se conseguirán diferentes caminos de deformación.

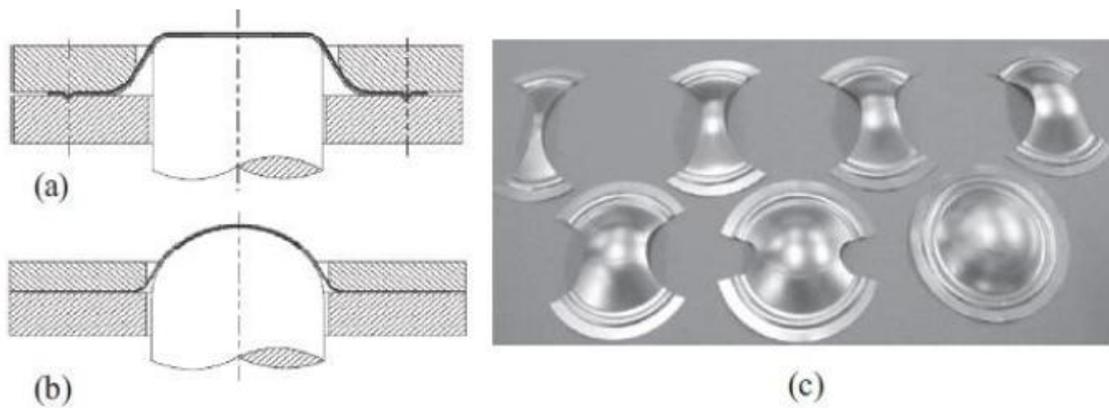


Figura 1.16- Esquema de los ensayos de Marciniak (a), Nakazima (b), y diferentes geometrías de probetas en ensayos tipo Nakazima (c) Martínez Donaire (2012)

1.5. Rebordeado de agujeros mediante SPIF

El rebordeado de agujeros es un proceso de conformado que se utiliza para crear pestañas o rebordes circulares o asimétricos. Para realizar este proceso, se utiliza una chapa con un agujero central, fijada rígidamente a una matriz, se deforma plásticamente principalmente mediante flexión y estirado circunferencial con un punzón. En el rebordeado de agujeros mediante SPIF, una chapa con agujero previo se deforma progresivamente mediante una herramienta acoplada a una máquina de control numérico CNC, siguiendo una trayectoria establecida. En este proceso el material se deforma mediante combinación de varios mecanismos, como la flexión o el estirado circunferencial y radial. Existen muchas aplicaciones industriales del hole-flanging, entre las que destaca el endurecimiento de los bordes del agujero para la facilitación de posteriores procesos de ensamblaje y montaje, o la simple mejora estética. Uno de los artículos acerca de este proceso fue publicado por Borrego et al en el cual se pretende investigar la capacidad de realizar operaciones de hole flanging mediante SPIF en una sola etapa, estudiando la conformabilidad del material 7075-O, para ello se realizaron numerosos ensayos experimentales. En la siguiente imagen publicada en dicho artículo se puede observar un proceso de Hole flanging.

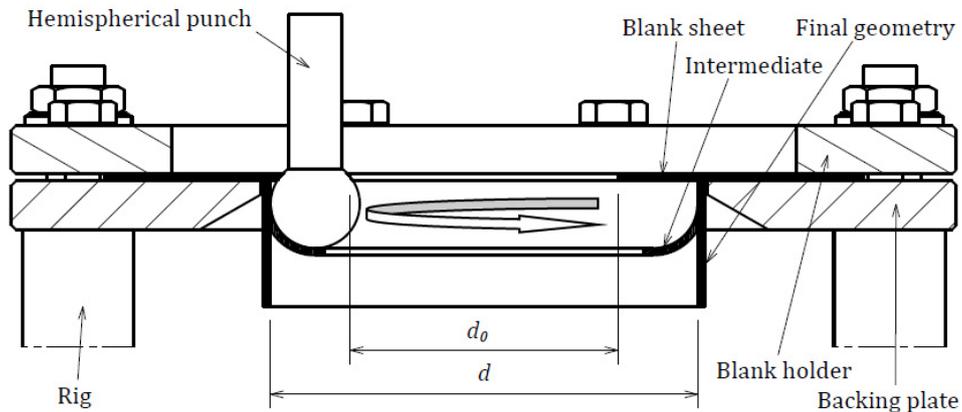


Figura 1.11- Montaje experimental de un proceso de Hole-Flanging mediante SPIF (Borrego et al. (2015))

A continuación se procede a realizar una breve descripción del proceso que se va a llevar a cabo numéricamente en este proyecto.

1.6. Rebordeado de flancos

El rebordeado de flancos consiste en la generación de una pestaña a lo largo de un contorno de una pieza de chapa. Este proceso es uno de los finales que se realiza a la pieza una vez se ha conformado, con el fin de conseguir distintas funcionalidades, como por ejemplo rigidizar el producto, proveer de soporte para su posicionamiento y ensamblado o como mejora del acabado del contorno. En la siguiente imagen se pueden observar los distintos tipos de flancos que existen:

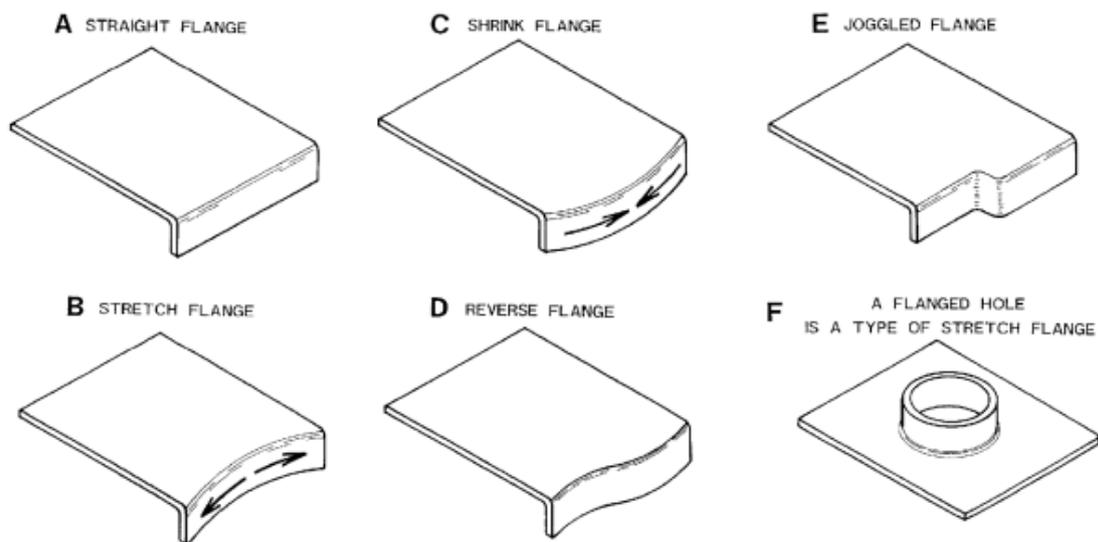


Figura 1.12- Tipologías de flancos

Principalmente son tres:

(A): Borde recto (straight flange) Flexión en el contorno.

(B): Borde cóncavo o estirado (stretch flange) Flexión y tracción a lo largo de la pestaña.

(C): Borde convexo o comprimido (shrink flange) Flexo-compresión en la pestaña.

También existen otros rebordeados como podemos ver en la figura como por ejemplo el rebordeado inverso (D), rebordeado en escalón (E), y el rebordeado de agujeros que es combinación de los dos anteriores (F).

La importancia de la realización de este proyecto se debe al avance de la producción industrial donde la mano de obra es cara y presenta unas altas exigencias con respecto a innovación, flexibilidad y calidad de los productos fabricados. Por tanto los procesos de conformado de chapa toman un papel importante ya que pretenden alcanzar la mayor calidad posible a precios competitivos.

El estudio se centra en la realización de flancos mediante SPIF para intentar poner de manifiesto que el rebordeado incremental supera ampliamente las limitaciones que suponen los procesos convencionales.

Por tanto el departamento de Ingeniería de Procesos de Fabricación de la Universidad de Sevilla pretende estudiar profundamente los mecanismos de deformación y modos de fallo que conducen a la sustancial mejora de conformabilidad del material, tanto para bordes cóncavos como convexos, además del análisis de las capacidades geométricas del proceso. Se van a llevar a cabo ensayos experimentales con chapas tanto Stretch como Shrink con radios de 10,20,50 y 100 mm y longitudes de pestaña de 10,15 20 y 40 mm, con el fin de contrastar las diferencias que presentan al variar el radio o longitud de pestaña de los distintos flancos.

Se han realizado numerosas hipótesis sobre los resultados que podrían producirse en las distintas probetas que se van a ensayar. Una de ellas sería la existencia de compresiones en las probetas llamadas Shrink y tracciones en las Stretch, que como se ha dicho anteriormente son hipótesis que tendrán que ser contrastadas con los ensayos experimentales que se realicen más adelante.

En este proyecto, lo que se pretende es simular numéricamente los flancos B y C, con distintos radios y longitudes de pestañas.

1.7. Aplicaciones

El rebordeado de flancos es utilizado principalmente en las últimas etapas del conformado de componentes elementales y paneles, empleados tanto en aeronáutica como en automoción.

Los flancos en los bordes de las piezas se crean con la finalidad de conseguir distintas funcionalidades, como por ejemplo rigidizar el producto, proveer de soporte para su posicionamiento y ensamblado o como mejora del acabado del contorno. En la aeronáutica es utilizada en las costillas de las alas y estabilizadores y en automoción se utiliza en paneles de puertas y carrocería.



Figura 1.17- Ejemplo de aplicaciones del conformado de flancos. (Costilla de avión y puerta de automóvil respectivamente)

También usado para el prototipado de piezas que necesiten este rebordeado o simplemente una flange en uno de sus bordes.

1.8. Objetivos del proyecto

Durante el desarrollo del proyecto, se pretenden simular modelos numéricos de flancos curvos de aluminio 2024-T3, tanto cóncavas como convexas como podemos ver en la figura 1.18 y 1.19 usando procesos de conformado incremental monopunto.

La finalidad de estas simulaciones es tener un primer acercamiento hacia los resultados que pueden arrojar el conformado de este tipo de flancos, mediante la obtención de fuerzas, deformaciones, entre otros resultados de interés.

Para ello, se representarán las fuerzas producidas en la herramienta, los caminos de deformación que se producen a lo largo de la bajada de la pestaña y presiones hidrostáticas producidas en la chapa.

Todos estos resultados, se obtendrán para un punzón de 20 mm y se utilizarán chapas de Stretch y Shrink con distintos radios de curvatura y distintas longitudes de pestaña, con el fin de comparar las variaciones que provocan estos cambios en los resultados.

El interés de estudiar este tipo de conformado se debe, como anteriormente se ha mencionado, obtener unos primeros resultados, ya que aún no se ha simulado nada de este tipo experimentalmente ni numéricamente. Y así poder ver qué le ocurre a la chapa durante todo el proceso y que estos resultados puedan ser utilizados con el fin de comparar con otras simulaciones experimentales futuras.

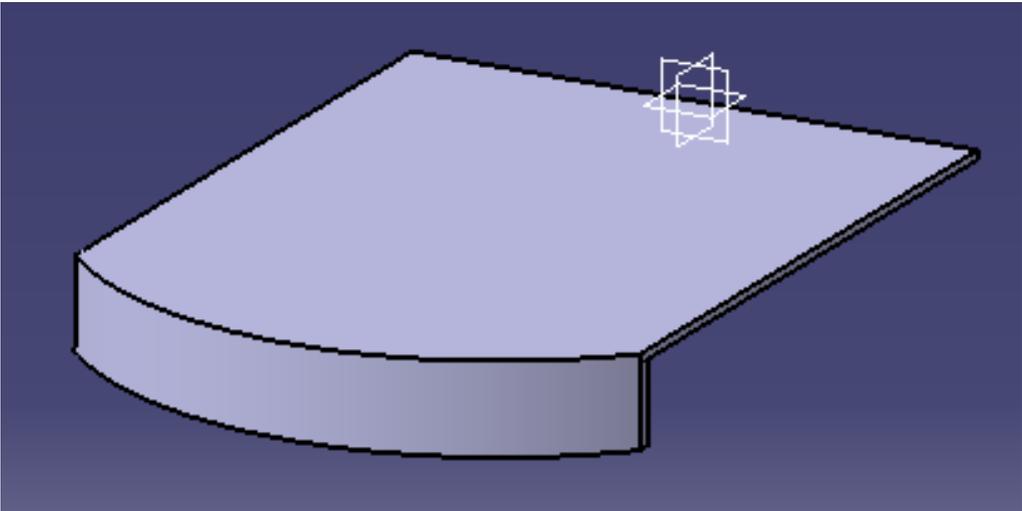


Figura 1.18- Doblado Shrink a realizar en el proyecto mediante conformado incremental

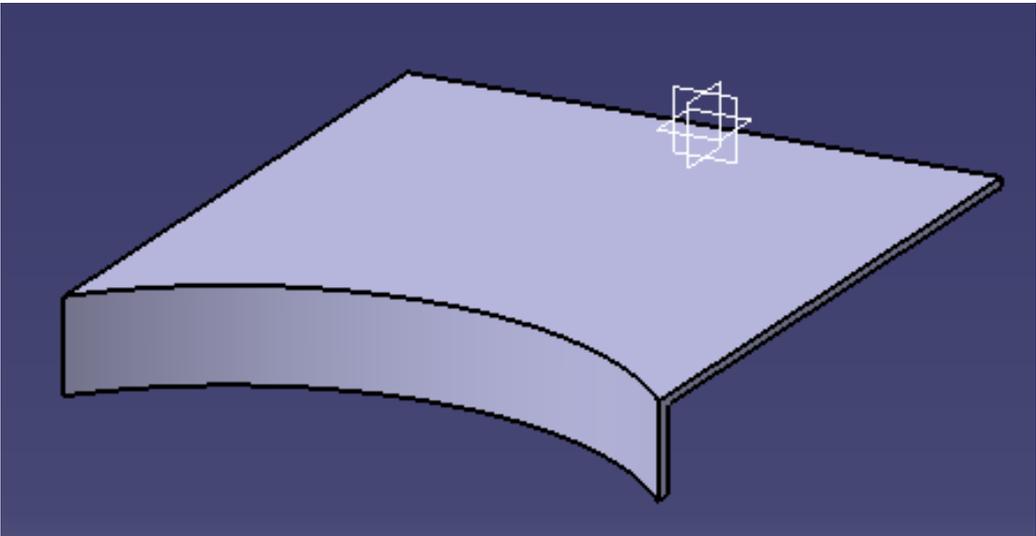


Figura 1.19- Doblado Stretch a realizar en el proyecto mediante conformado incremental

Capítulo 2

Construcción del modelo numérico

2.1. Generación de los modelos en DS Catia® v5.20

Para llevar a cabo las simulaciones en *DEFORM-3D™* es necesario obtener las distintas geometrías presentes en el problema. Las geometrías que se han utilizado han sido, un punzón de 20mm discretizado con diferentes tolerancias, una chapa por modelo recogidos más adelante en una tabla y un backing plate por cada tipo distinto de probeta ensayada.

Para realizar estos modelos, se ha utilizado el programa DS Catia® v5.20 y a continuación, se han exportado a *DEFORM-3D™* en formato .stl.

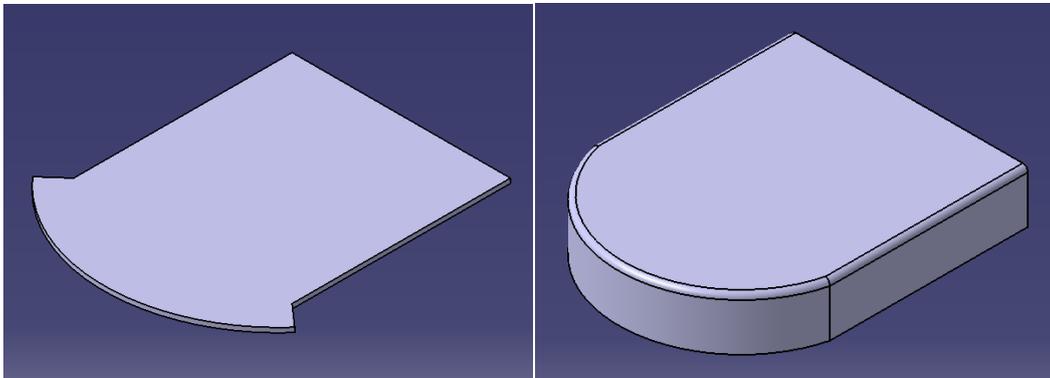


Figura 2.1- Modelos de chapa y backing plate realizados en DS Catia® v5.20

2.2. Generación de la trayectoria

Necesitamos obtener las trayectorias que seguirá el punzón, para ello desde DS Catia® v5.20 se procede a realizar un “Surface Machining” donde se obtendrá el recorrido del punzón necesario para conseguir la forma final de la chapa.

La trayectoria se genera en código APT, que a continuación será procesado obteniendo sólo aquellos puntos por los que pasará el punzón. Como se puede observar, la obtención de la trayectoria se puede realizar de una forma sencilla, lo que nos permite realizar cambios en los modelos de una forma rápida.

El recorrido se compone de bajadas en los dos extremos del flanco de 0.5 mm e irá de un extremo a otro retrocediendo por la misma dirección permaneciendo en contacto con la chapa durante todo el proceso.

Al tener una máquina de dos ejes y medio la bajada de la herramienta no se puede realizar de forma helicoidal, por tanto se procede a bajar como se ha explicado anteriormente, obteniendo de ésta manera una trayectoria en forma de escalera.

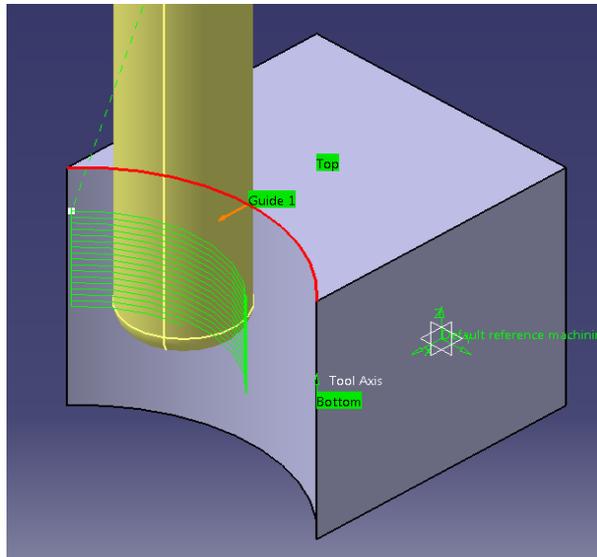


Figura 2.2- Trayectoria para modelo de Stretch.

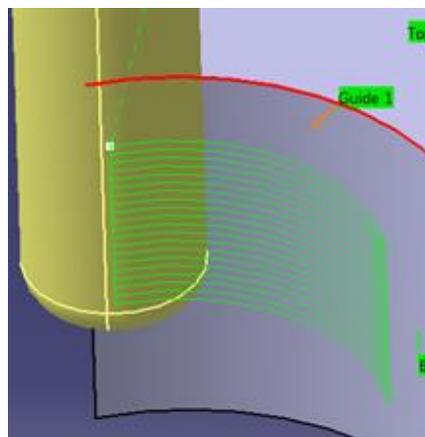


Figura 2.3- Zoom de trayectoria para modelo de Stretch.

Una vez obtenidas las trayectorias, mediante Excel, se seleccionan solo los datos pertenecientes a las coordenadas por donde nuestra herramienta tendrá que pasar y se añade una ley temporal para asignarle un valor de tiempo a cada punto, que vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$t = \sqrt{(r_x^2 + r_y^2 + r_z^2)} * 60/1000$$

Siendo r_x , r_y y r_z las distancias de un punto a otro del recorrido en las tres direcciones y 0.06 la velocidad en mm/s (1000 mm/min).

Obteniendo finalmente una tabla donde aparecerán las coordenadas X, Y, Z y tiempo, que después serán introducidas en *DEFORM-3DTM* para la trayectoria del punzón.

También se ha procedido a calcular las trayectorias mediante Matlab, ya que las simulaciones de Shrink presentan una geometría abierta en sus extremos y con las obtenidas en DS Catia® v5.20 el punzón no llegaba hasta dicha zona para su deformación. Por tanto, se ha realizado un programa que permite abarcar toda la superficie de la chapa como podemos ver en la figura 2.4.

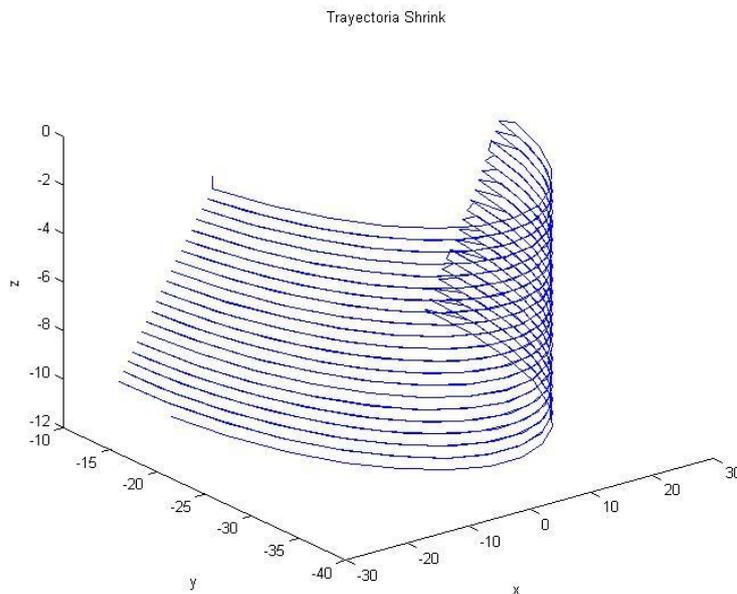


Figura 2.4- Trayectoria realizada en Matlab para modelo de Shrink.

En la imagen podemos observar como en los laterales, la trayectoria va aumentando su recorrido permitiéndonos que el punzón pueda llegar a todas las zonas de la chapa.

2.3. Definición del material

El material que va a ser ensayado para la realización del conformado incremental es un Aluminio “AA2024-T3”, éste material es objeto de ensayo debido a su alta ductilidad y aplicación tanto en la industria aeronáutica como en la automovilística.

La librería de *DEFORM-3DTM* no posee este material, por tanto tendrá que ser definido en dicha librería. Para ello será necesario conocer su curva de comportamiento a tracción, módulo de Young y coeficiente de Poisson, que se detallan a continuación (Vallellano et al. (2007)):

Módulo de Young (E)	66700MPa
Coficiente de Poisson (ν)	0.33

Tabla 2.1- Propiedades AA2024-T3 (Vallellano et al. (2007)).

La curva de comportamiento del material viene dada por la siguiente ecuación, llamada Ley potencial de Swift’s:

$$\sigma(\text{Mpa}) = 814.04 (0.025 + \epsilon^p)^{0.245}$$

Donde se toman valores de deformación entre 0 y 1, y de esta forma podemos obtener las tensiones para cada valor de deformación.

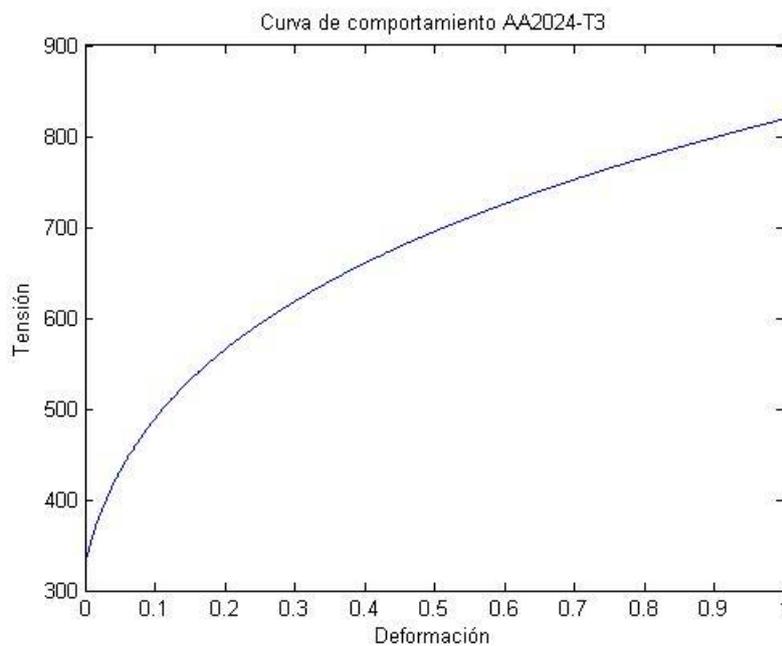


Figura 2.5- Curva de comportamiento AA2024-T3

Como podemos observar en la curva de este material no se observan claramente las zonas elástica y plástica. Por tanto estamos ante una curva que crece exponencialmente partiendo de un valor de 350 MPa y sigue siendo creciente en todo su dominio. No vamos a encontrar ninguna zona en la que el material tenga un rango de valores de deformación para una misma tensión.

También será necesario definir un criterio de plastificación, que en nuestro caso usaremos el de Von Mises, ya que se han realizado pruebas con modelos con un criterio anisótropo y se ha comprobado que requiere un gran tiempo computacional.

Como criterio de endurecimiento hemos usado el isótropo, también se ha probado con el cinemático pero conllevaba grandes tiempos computacionales, esto provocará algunas variaciones en los resultados con respecto al comportamiento en un ensayo real.

Von Mises se formula de la siguiente forma, con σ_{VM} la tensión de Von Mises:

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_y$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Siendo σ_1, σ_2 y σ_3 las tensiones principales en dicho punto.

Una vez introducida la curva en DEFORM quedaría de la siguiente forma:

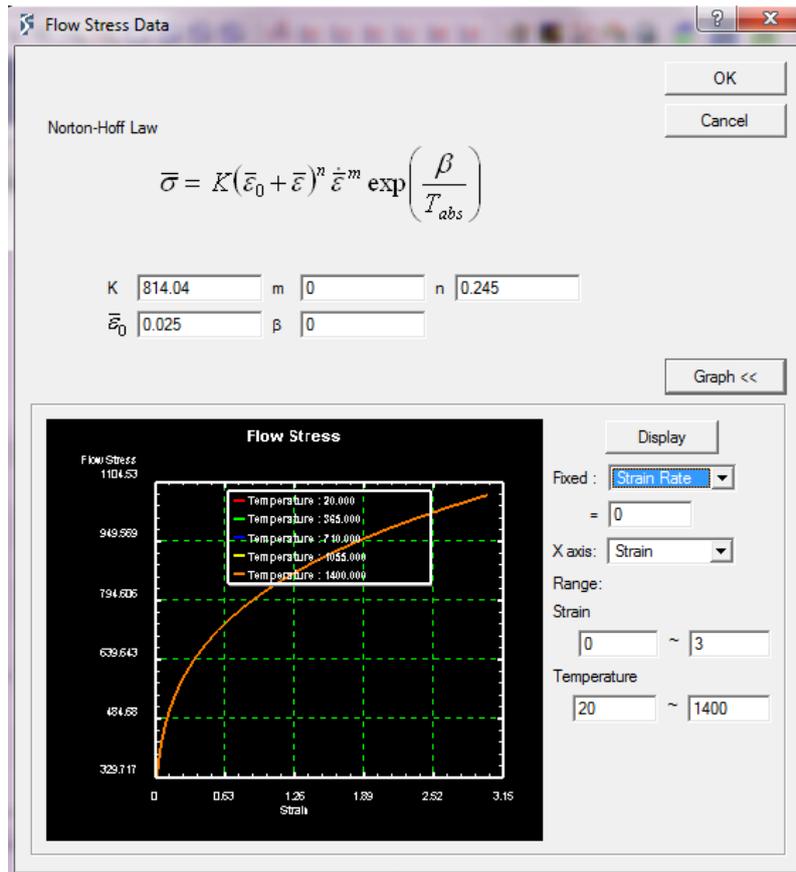


Figura 2.6- Ventana de Material DEFORM-3D™

2.4. Elementos

2.4.1. Punzón

Para llevar a cabo las simulaciones se ha utilizado como herramienta un punzón con forma semiesférica de diámetro de 20mm.

Se suelen fabricar con el diámetro de la cabeza distinta al del vástago, para evitar el choque del punzón con la chapa en aquellos lugares en los que haya altas pendientes de pared.



Figura 2.7- Punzón semiesférico

2.4.1.1. Implementación del punzón en DEFORM

Para la implementación del punzón, al igual que con todas las piezas, se ha realizado el diseño en Catia® v5.20 y a continuación se ha importado a *DEFORM-3D*TM en formato .stl.

Se ha optado por construir solo la cabeza esférica del punzón, ya que lo único que nos interesa es el contacto punzón-chapa.

La diferencia en el resultado radica fundamentalmente en la tolerancia con la que se haya generado en Catia® v5.20 que al introducirlo en *DEFORM-3D*TM provocará que éste tenga mayor número de elementos y generará mayor coste computacional.

A continuación se van a mostrar los distintos punzones que se han utilizado para el desarrollo del proyecto, para comenzar se utilizó el punzón de la primera imagen, pero provocaba distorsiones de los elementos de la chapa, por tanto se pasó a utilizar un punzón más discretizado como el que se puede ver en la segunda imagen.

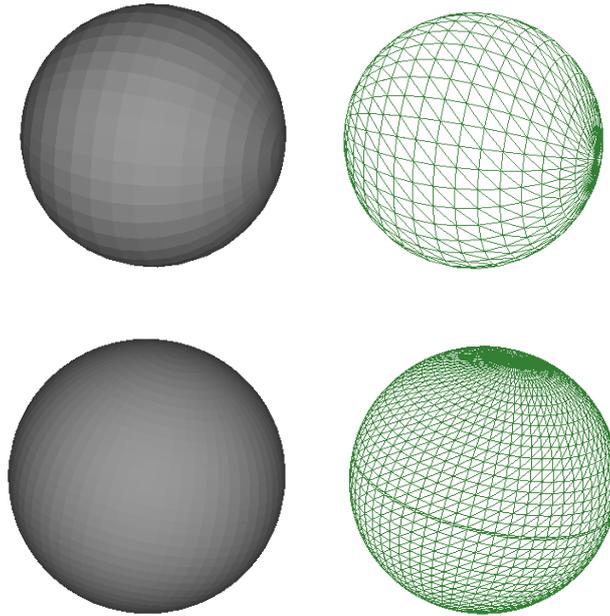


Figura 2.8- Punzones semiesféricos DEFORM-3D™

El punzón se considera un elemento rígido, por lo que no es necesario realizarle mallado ya que éste no va a ser estudiado.

En el programa se introducirá como **“Primary die”** y se le dará la trayectoria que se ha obtenido mediante Catia® v5.20 y posteriormente en Excel se ha calculado la variable temporal lo que nos permite crear una tabla posición tiempo que será la que se introduzca en DEFORM-3D™.

2.4.2. Chapa

Se han dimensionado 8 tipos de chapas distintas, cuatro serán de Shrink y tres de Stretch. En la siguiente tabla se recogen las 7 chapas distintas:

Ensayos	Nomenclatura	Radio	Longitud pestaña	Anchura	Tipo
1	R15H12-C	15	12	22,5	Shrink
2	R15H30-C	15	30	22,5	Shrink
3	R50H12-C	50	12	75	Shrink
4	R50H30-C	50	30	75	Shrink

Tabla 2.2- Ensayos Shrink realizados.

Ensayos	Nomenclatura	Radio	Longitud pestaña	Anchura	Tipo
5	R15H12-T	15	12	22,5	Stretch
6	R50H12-T	50	12	75	Stretch
7	R50H30-T	50	30	75	Stretch

Tabla 2.3- Ensayos Stretch realizados.

Algunas se han conseguido simular con buena textura superficial, sin embargo hay dos modelos que no se han logrado conseguir con éxito numéricamente, que son las señaladas en color rojo.

Para comenzar, se le dieron a las chapas una forma concreta como la que se puede ver en la figura 2.9, ya que como primera hipótesis se pensó que el flanco que se obtendría sería recto utilizando esta forma. Después se comprobó que esto no era así y se realizaron simulaciones cambiando la preforma con el fin de obtener una pestaña recta. Este procedimiento se puede ver en el punto 4.3.1.

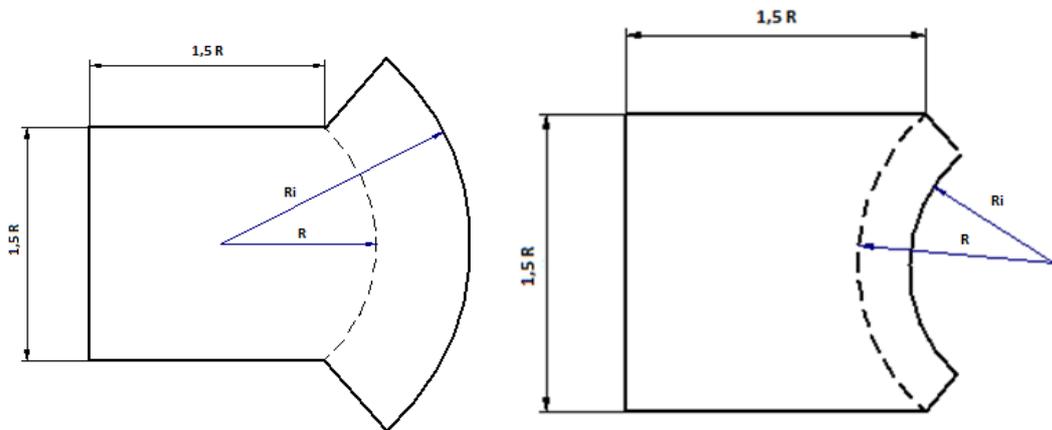


Figura 2.9- Esquema chapas iniciales Shrink y Stretch respectivamente

En la imagen anterior “ R_i ” hace referencia al radio inicial que viene dado por la suma del radio “ R ” más la longitud de pestaña en probetas de Shrink y por la resta de la longitud de pestaña en probetas de Stretch.

Se han realizado 14 ensayos, repartidos de la siguiente forma, 4 ensayos de Shrink y 4 de Stretch para un espesor de 1.2 mm y los mismos ensayos pero con 1.6 mm de espesor con el fin de estudiar los distintos casos posibles. La anchura se ha tomado como 1,5 veces el radio.

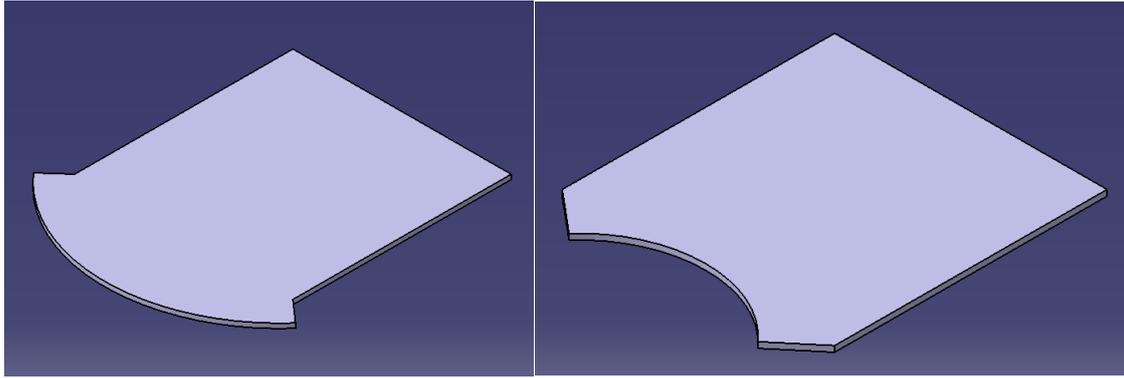


Figura 2.10- Chapas iniciales de Shrink y Stretch respectivamente.

2.4.2.1. Implementación de la Chapa en DEFORM-3D™

Como hemos descrito anteriormente, las chapas tendrán una forma un tanto peculiar que serán implementadas en Catia® v5.20 y a continuación, importadas a DEFORM-3D™ en formato stl.

Las chapas se han realizado con dos zonas distintas de mallado:

La primera englobaría la zona donde se produce la deformación, que sería el flanco donde se le ha dado un tamaño de elementos menor que en la zona empotrada, que será la segunda zona de mallado, en la cual se le han dado tamaños mayores a los elementos para ahorrar coste computacional.

Esto se ha realizado así ya que en la zona del flanco sería donde se producen las deformaciones y por ello un cambio continuo en la distribución de los elementos, por tanto, si nos decidimos por elementos mayores al desaparecer alguno de ellos durante el remallado nos deja un hueco y sería algo irreal. De aquí el haber elegido elementos menores.

En la zona empotrada, se han elegido elementos de mayor tamaño ya que no se van a producir deformaciones, y por tanto mientras mayores sean menor coste computacional nos llevará.

Al comienzo se optó por utilizar elementos del tamaño del punzón aproximadamente, pero éstos producían muchos huecos en la chapa, dejándola con un aspecto un tanto distinto al que finalmente debía de producirse y por tanto, los resultados variarían ya que no se estaba obteniendo una geometría similar. A continuación, se optó por utilizar elementos mucho más pequeños que los del punzón y al igual que antes se producía una geometría bastante diferente. Finalmente se optó por un tamaño medio, acertado y que conseguía unos resultados geométricos bastante buenos.

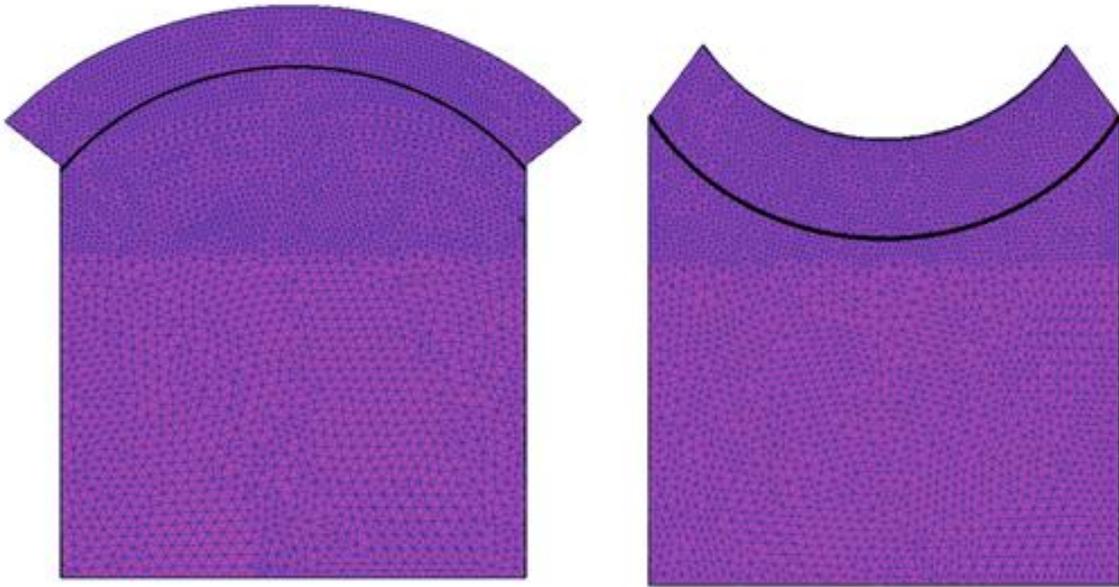


Figura 2.11- Mallados en DEFORM-3D™ de las chapas de Shrink y Stretch respectivamente.

2.4.3. Backing plate

Para la realización de las simulaciones es necesario el uso de backing plates para conseguir que la chapa se conforme como se desea. En la imagen figura 2.12. Podemos ver las backing plates pertenecientes a los procesos de Shrink y Stretch respectivamente.

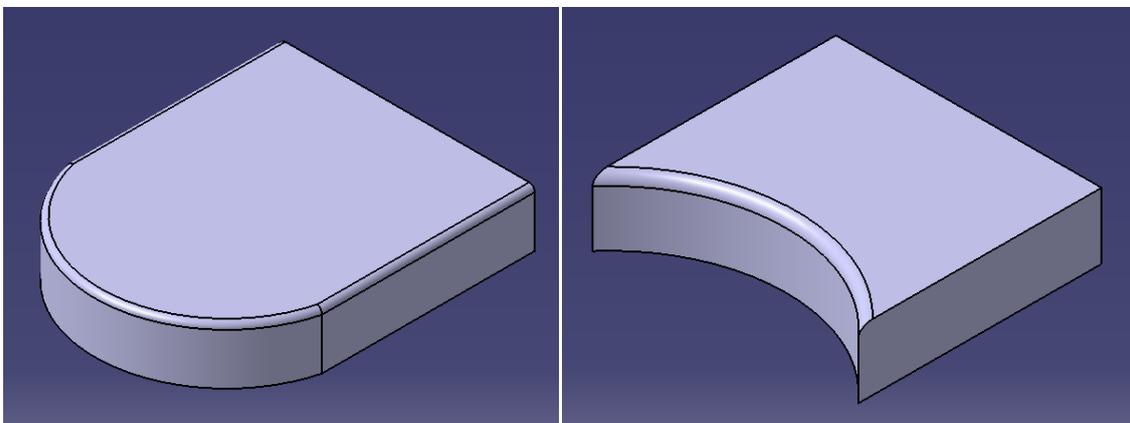


Figura 2.12- Backing plates en DEFORM-3D™ de Shrink y Stretch respectivamente.

En este caso, no es necesario el uso de matrices superiores ya que con las condiciones de contorno que vamos a imponer en el problema, se está simulando que la chapa se encuentra empotrada en una determinada zona superior con el fin de evitar los desplazamientos de ésta.

2.4.3.1. Implementación del utillaje en DEFORM-3D™

Para la implementación en *DEFORM-3D™*, solo es necesaria la brida inferior o backing plate con un determinado radio de acuerdo para que no se produzca el cizallamiento de la chapa. La brida inferior será considerada un elemento rígido y que no posee mallado ya que no va a ser estudiada.

Por tanto, la finalidad de ésta es que no se produzcan desplazamientos durante el proceso de conformado y que la chapa adopte la forma curva que posee el backing plate.

2.5. Condiciones de contorno

Dichas piezas estarán empotradas en la zona trasera, de esta forma se simula un utillaje que impide que se mueva durante el proceso, para ello se ha creado una ventana seleccionando todos aquellos elementos de la zona trasera de la chapa y se le han dado condiciones de empotramiento a todos los puntos.

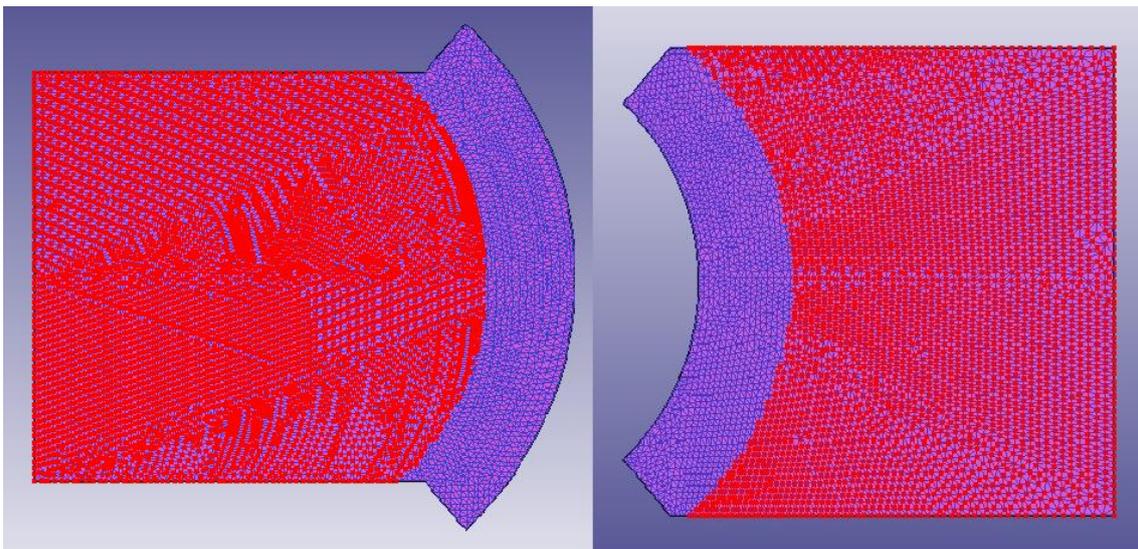


Figura 2.13- Condiciones de empotramiento en DEFORM-3D™

En la imagen anterior se pueden observar en color rojo los elementos que se han seleccionado como empotrados llevados a cabo en las chapas de Shrink y Stretch respectivamente.

2.6. Interacción entre objetos

Las interacciones que se dan en nuestro problema son las siguientes:

-Chapa-punzón: Fricción de Coulomb con un valor de 0.01.

Éste valor no es totalmente real, según los lubricantes utilizados en otros procesos se ha estimado este valor de fricción, aunque para definirlo exactamente tienen que realizarse distintos ensayos, que aún no se han puesto en práctica.

-Brida-Chapa: Fricción de Coulomb con un valor de 0.02, que al igual que antes se ha utilizado un valor aproximado.

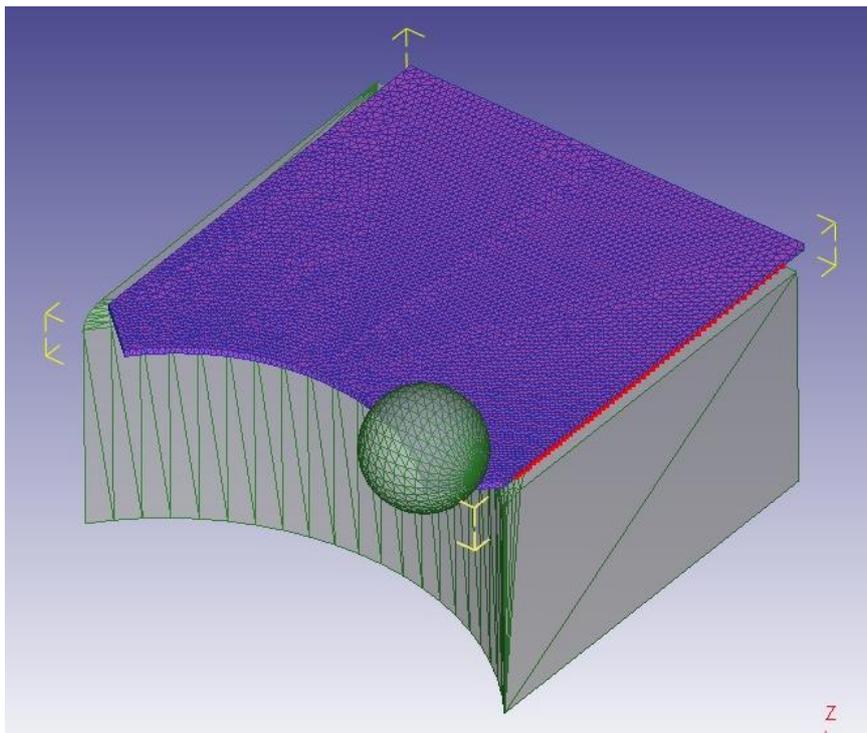


Figura 2.14- Zona de contacto brida-chapa DEFORM-3D™

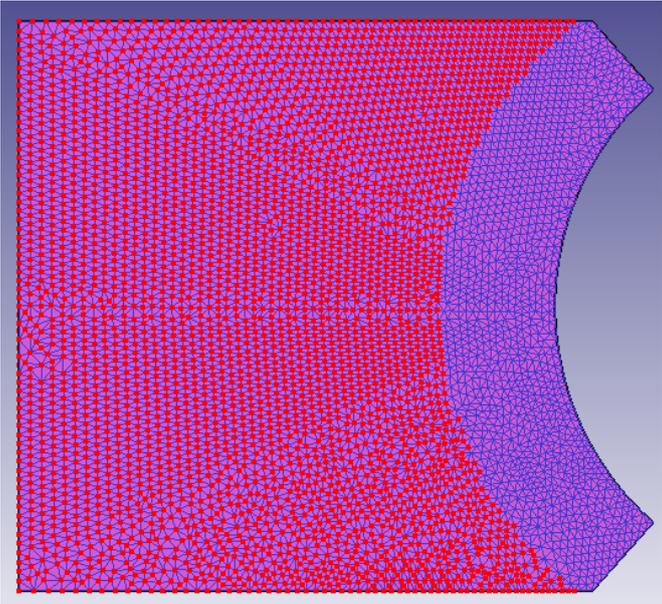


Figura 2.15- Zona de contacto brida-chapa vista inferior DEFORM-3D™

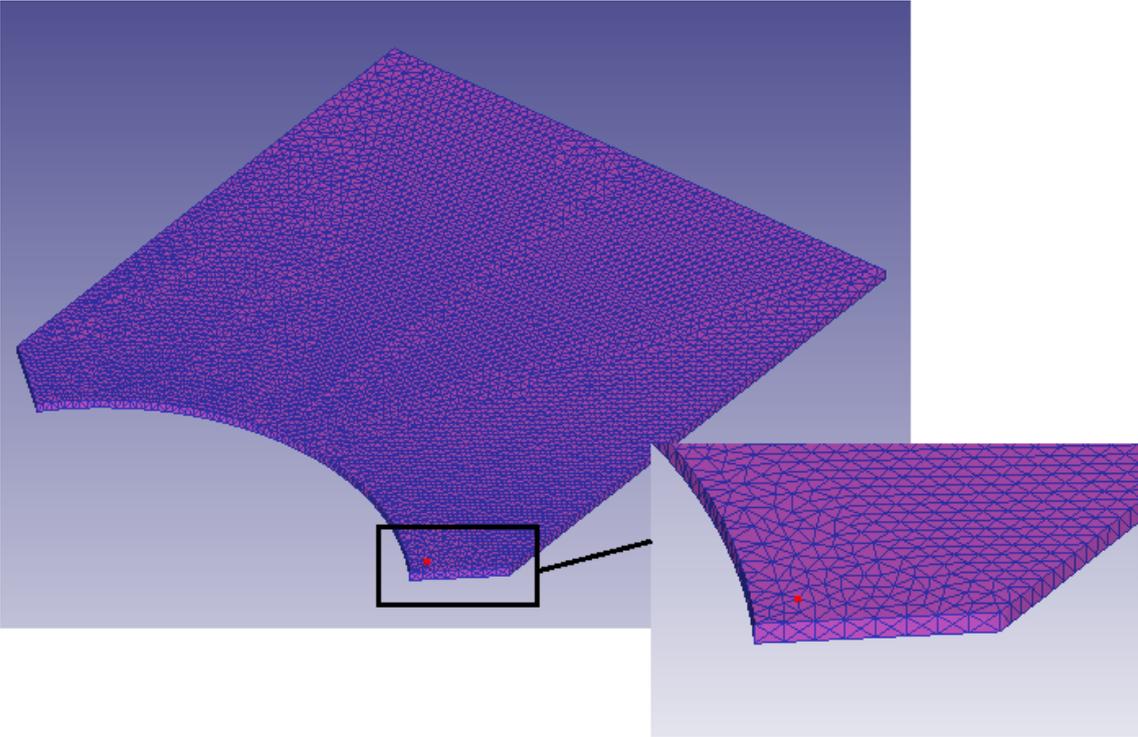


Figura 2.16- Zona de contacto inicial chapa-punzón DEFORM-3D™

2.7. Controles de simulación

Se ha elegido una velocidad de 0.04 sec/step y el número de steps dependerá del tipo de problema según el tiempo de recorrido del punzón.

En la pestaña “*Movement*” del punzón se puede observar gráficamente la trayectoria seguida por éste, y aquí se comprueba si con los controles de simulación dados podemos completarla totalmente.

2.8. Problemas producidos en otros modelos.

A continuación, se pretende explicar distintos fallos producidos durante el desarrollo del proyecto en otros modelos. Explicando el problema y la decisión tomada frente a éste.

2.8.1. Arrastre de material debido al tamaño de los elementos.

El tamaño de los elementos ha sido modificado en numerosas ocasiones debido al arrastre de material que producía. Si el tamaño era demasiado grande con respecto al tamaño de los elementos del punzón éste se engancha produciendo arrastre del material y la deformación completa de la chapa, lo cual es algo irreal. Y si el tamaño era demasiado pequeño el coste computacional crecía exponencialmente y producía defectos en la superficie de la chapa irreales.

Finalmente se llegó a un tamaño medio tanto para los elementos del punzón como de la chapa, ambos de un tamaño similar que nos permitía un conformado de la chapa semejante a la realidad y que no produjera salientes de material o arrastres.

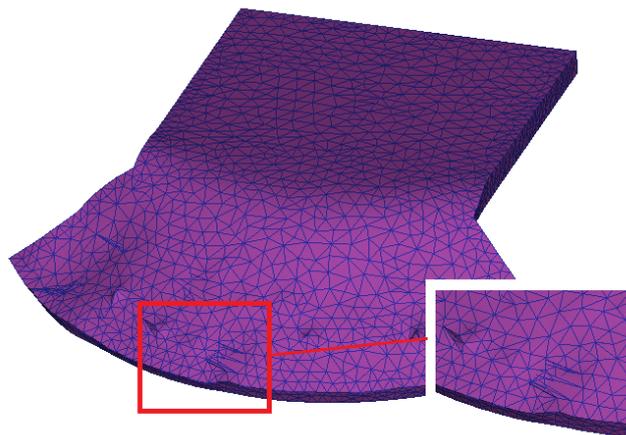


Figura 2.17- Momento en el que el punzón arrastra el material.

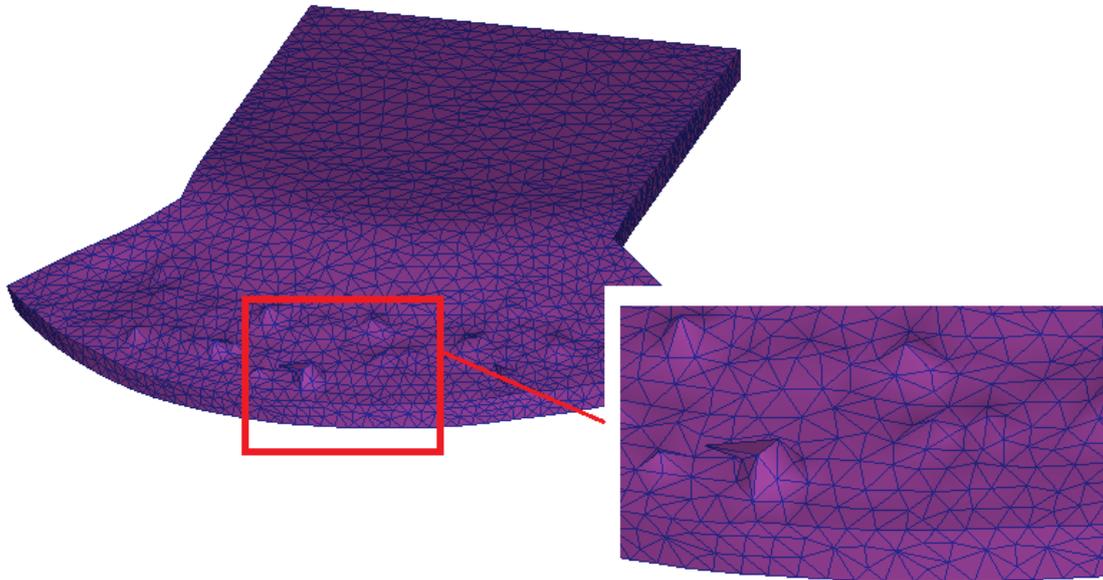


Figura 2.18- Acabado superficial debido a los enganches del punzón

2.8.2. Rotura en la zona del radio (doblez).

Al comienzo del proyecto se utilizaba una malla más gruesa y provocaba un corte en la chapa, concretamente en el filo del backing plate, de antemano sabíamos que esto era algo irreal si lo comparábamos con ensayos experimentales hechos por otros autores. Por tanto, se procedió a analizar la zona y se observó que se producía un decremento de espesor importante en la chapa.

La solución que se tomó para ello fue utilizar una malla más fina en esta zona y así evitar la eliminación masiva de material que producía el programa en la chapa.

2.8.3. Doblado excesivo

Cuando el punzón se engancha, la chapa comienza a doblarse pegada a éste y a continuación se despega, produciendo un alabeo que más adelante nos llevaría a errores mayores si no retrocedíamos el programa, ya que una vez avanzaba el programa este alabeo se corregía y no era visible. La solución como se ha dicho anteriormente, era retroceder justo antes de la adhesión al punzón, volver a mallar y relanzar el programa.

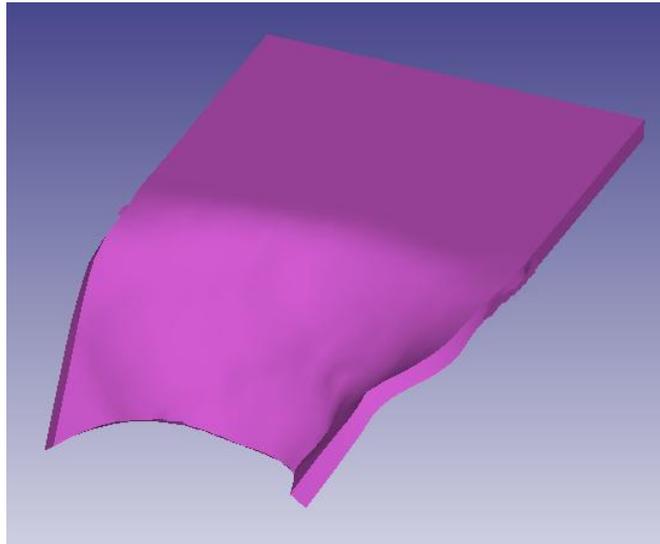


Figura 2.19- Alabeo de la chapa debido a un enganche del punzón

2.8.4. Punzón con eje de revolución vertical

Al comienzo se utilizó un punzón de 20 mm creado en DS Catia® v5.20 como vimos en el apartado 2.4.1.1, debido a los errores producidos, se decidió utilizar un punzón más discretizado, éste punzón se podía crear en *DEFORM-3D™* pero únicamente con el eje de revolución vertical. Los elementos del punzón convergían en la zona inferior y por tanto, provocaba distorsiones del material.

La solución ante éste problema fue optar por crear la herramienta en DS Catia® v5.20 con el eje de revolución horizontal y evitar éste problema.

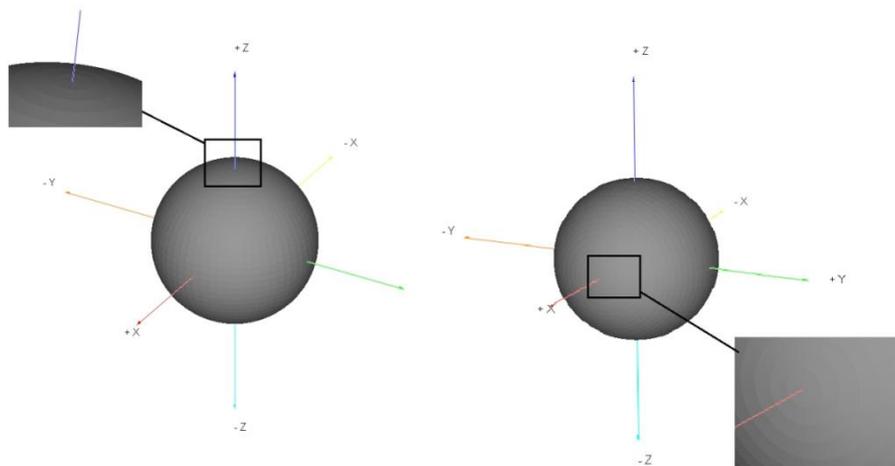


Figura 2.20- Punzón con eje de revolución vertical y horizontal respectivamente.

Capítulo 3

Construcción del montaje experimental

Con el fin de comparar los resultados numéricos obtenidos, se ha comenzado a preparar el ensayo experimental a realizar en un futuro muy próximo. Para ello, se va a utilizar la máquina de control numérico *EMCOTRONIC TM02 VMC200* que posee el departamento.



Figura 3.1- Centro de mecanizado vertical EMCOTRONIC TM02 VMC200

Los valores de fuerza a los que se ve sometida la herramienta se obtienen mediante un plato dinamométrico *Kistler*, que se sitúa en la zona inferior del soporte donde va a ser deformada la probeta.

3.1. Generación de los modelos en Catia® v5.20

Para realizar los ensayos experimentales, es necesario crear los modelos de las probetas en Catia® v5.20, con el fin de poder aprovechar el utillaje ya creado con anterioridad para los ensayos de hole flanging que ha estado realizando el departamento. Además de la generación de las trayectorias para introducirlas en la máquina de CNC.

3.1.1. Chapa

La chapa que se va a simular experimentalmente es la denominada R50H12-T, (número 7). Se han realizado tres probetas distintas que se detallan a continuación:

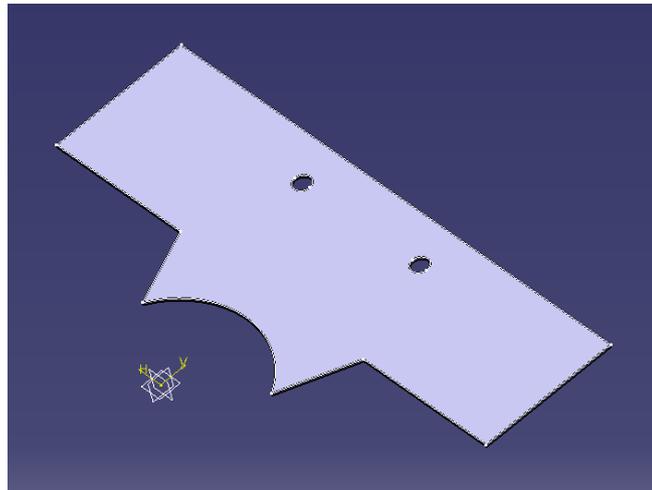


Figura 3.2- Chapa realizada en Catia® v5.20 para el ensayo experimental.

Como se ha explicado anteriormente la probeta presenta esta forma debido al utillaje disponible actualmente en el taller.

La primera de ellas posee cortes rectos perpendiculares al arco de circunferencia. Ésta fue la primera hipótesis realizada para este proyecto, ya que se pensó que el flanco se traccionaría hasta quedar completamente recto.

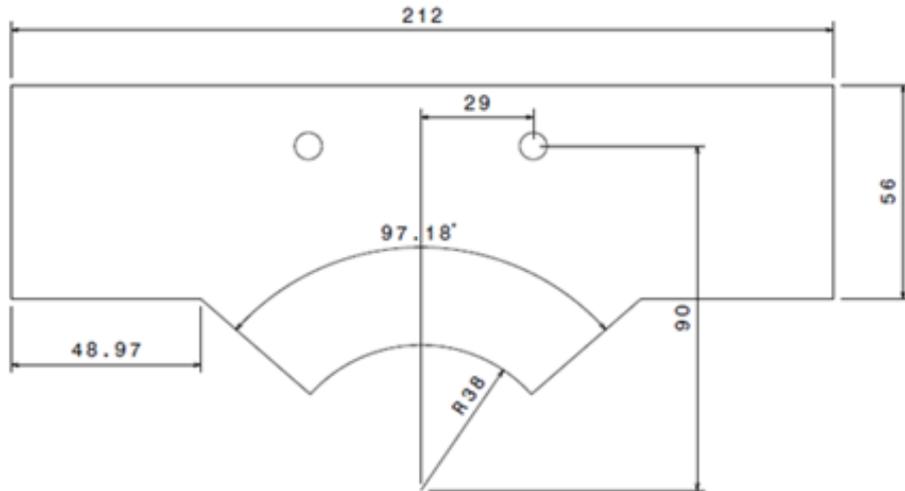


Figura 3.3- Modelo de chapa 1

Una vez medidas las deformaciones que se habían producido en el borde del flanco en los ensayos numéricos se procedió a diseñar probetas que una vez ensayadas nos permitieran obtener un flanco recto. Entonces, se diseñó una segunda probeta, en la cual se aumentó la apertura de las paredes de la pestaña.

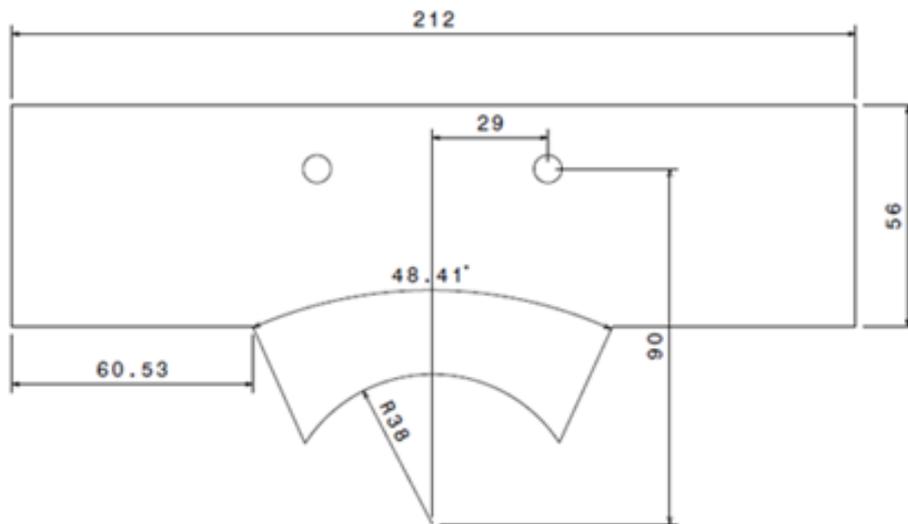


Figura 3.4- Modelo de chapa 2

Y finalmente en los ensayos numéricos realizados con la segunda probeta, se observó que se producían unos picos que le daban mal acabado superficial al resultado final y se propuso modificar la chapa inicial desplazando el radio del flanco, en este caso de

50 mm una distancia igual a la altura de la pestaña que se pretendía obtener, en este caso de 12 mm.

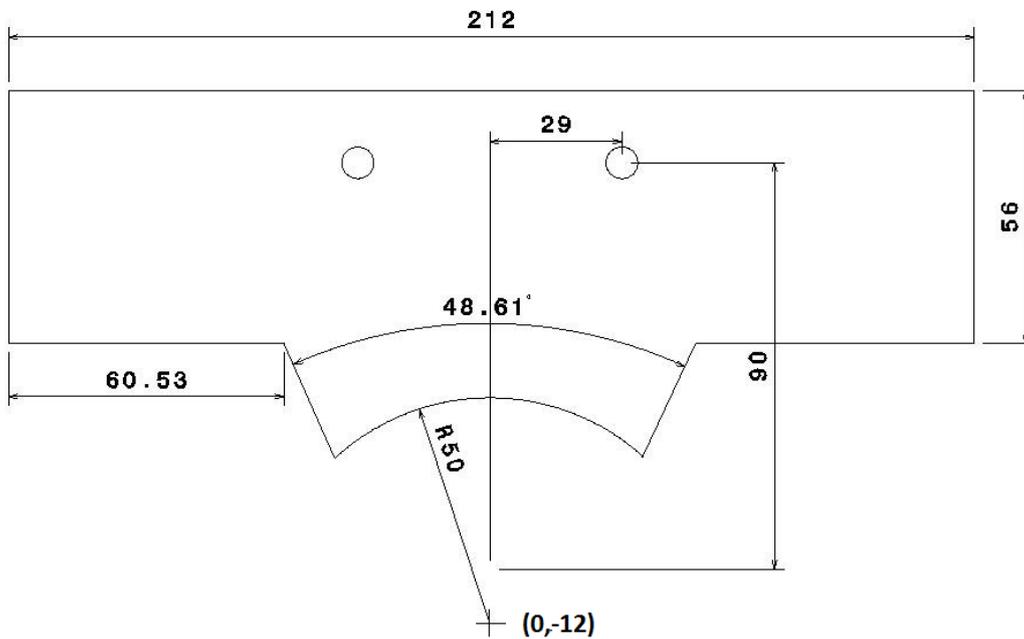


Figura 3.5- Modelo de chapa 3

En la imagen que se presenta a continuación se pueden observar los modelos de chapa 1 y 2 para R50H12-T, realizadas en el taller aprovechando el mismo trozo de material de aluminio 2024-T3.

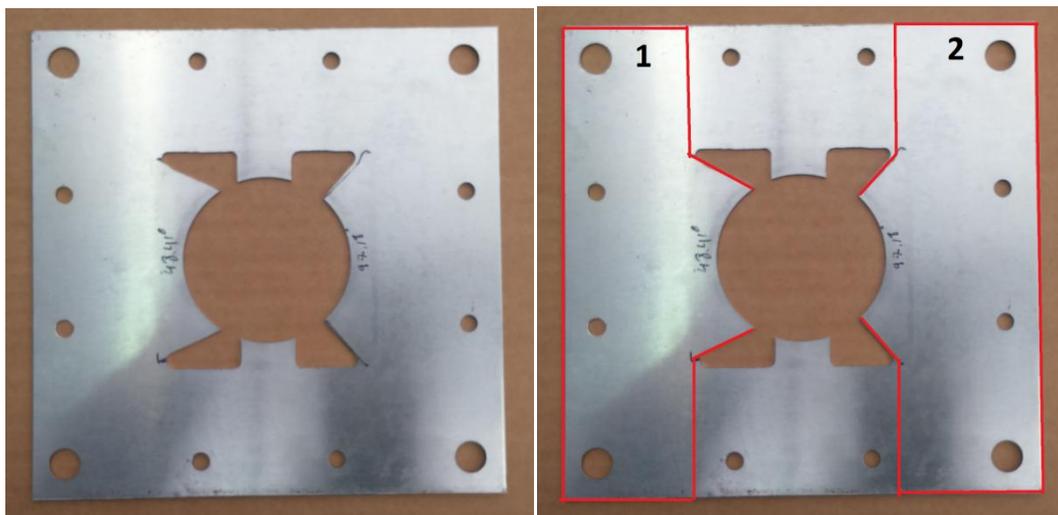


Figura 3.6- Modelos experimentales de las chapas 1 y 2.

Las chapas tienen esta forma para poder aprovechar el utillaje ya creado en el taller como se ha dicho anteriormente, además de poseer una superficie de contacto brida-chapa considerable y orificios de anclaje para que no se produzcan desplazamientos durante el proceso de conformado.

3.1.3. Utillaje

El utillaje necesario para la realización del proyecto se compone de una placa de sujeción o brida superior con orificio circular de diámetro 104 mm, una brida inferior o matriz de apoyo con un agujero circular de 100 mm de diámetro, cuatro soportes y una base o placa de fondo.

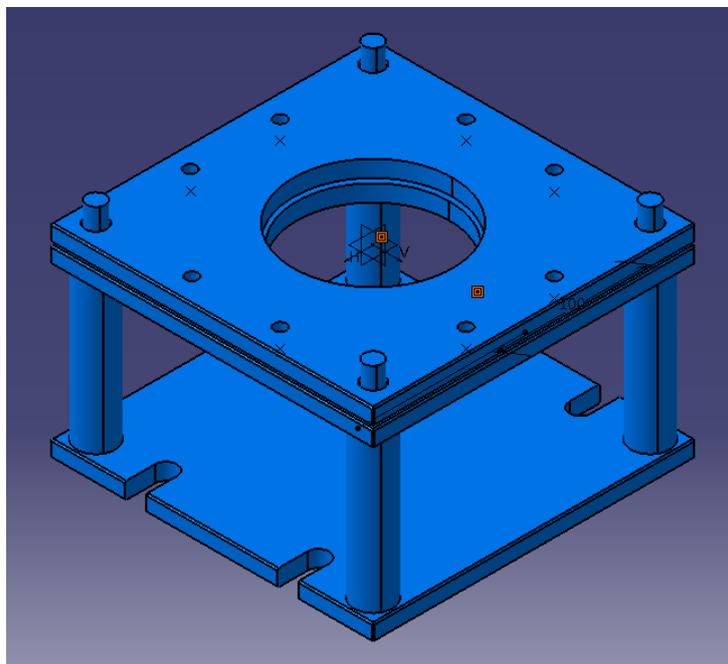


Figura 3.7- Utillaje realizado en Catia® v5.20

En la siguiente imagen se puede ver el utillaje en Catia® v5.20 y el real que posee el taller, ambos con la chapa colocada y anclada en la posición que tendrá durante el proceso de conformado. Como se puede ver en la imagen inferior derecha, el pisador superior es cuadrado, actualmente se está fabricando el circular para llevar a cabo el proceso experimental.

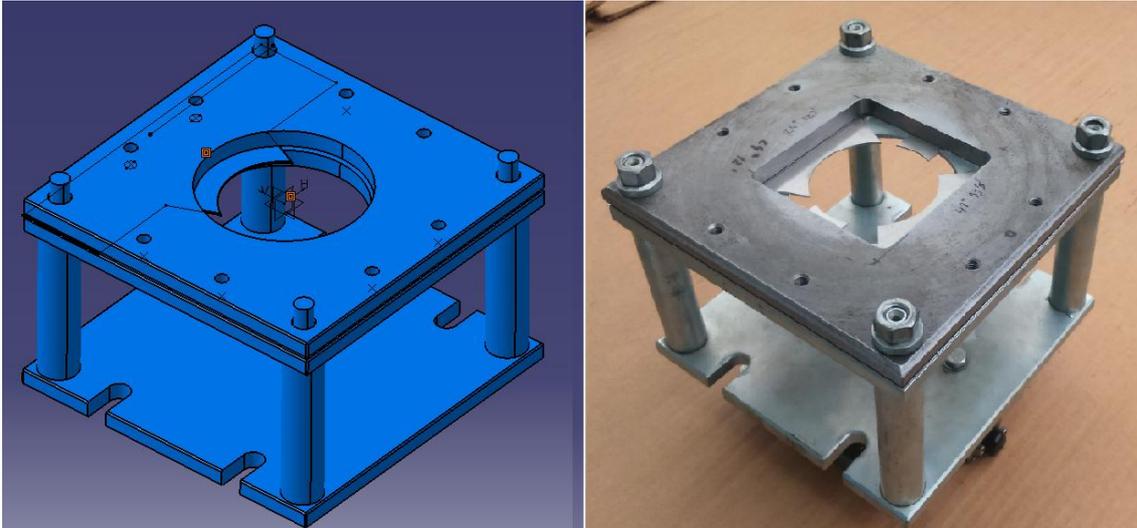


Figura 3.8- Utillaje realizado en Catia® v5.20 y utillaje real de izquierda a derecha.

3.2. Generación de la trayectoria

La trayectoria se ha generado partiendo de una preforma inicial con el flanco que finalmente se va a obtener, para ello, se ha generado una sección de un cilindro que nos permita obtener en Catia® v5.20 el recorrido que haría el punzón para crear dicha superficie. El procedimiento para la obtención de los puntos del recorrido es similar a la explicada anteriormente para el ensayo numérico.

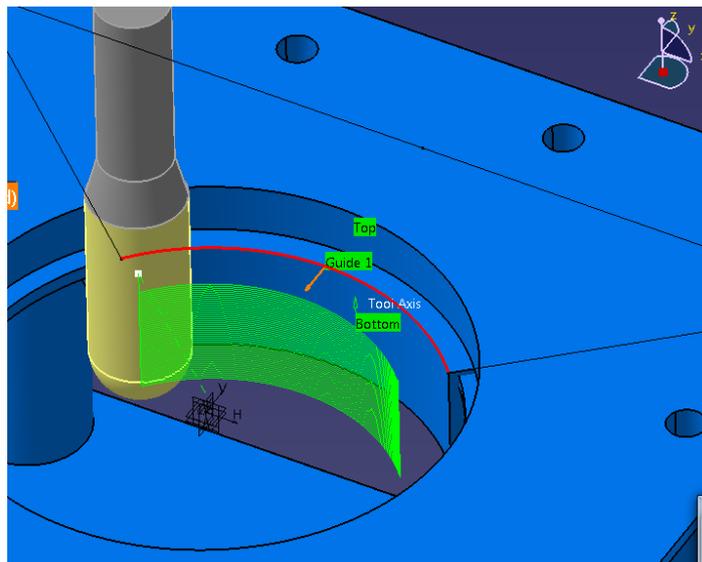


Figura 3.9- Trayectoria para modelo de Stretch.

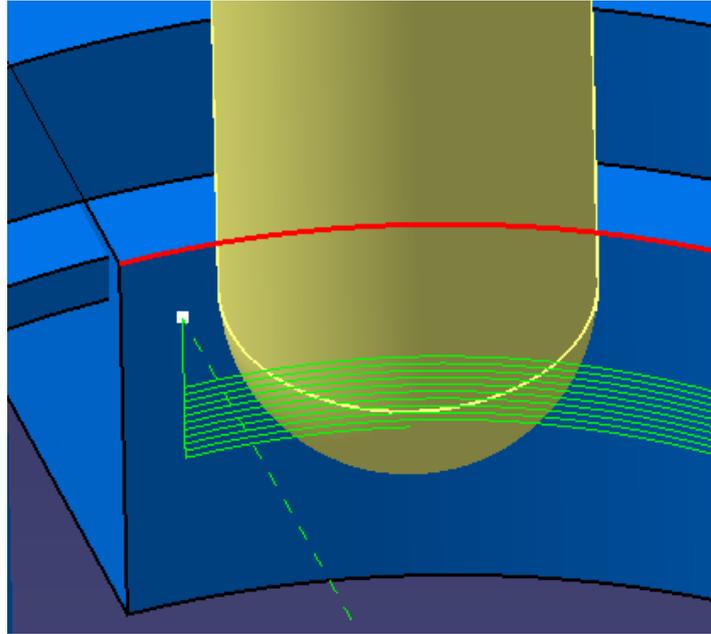


Figura 3.10- Zoom de trayectoria para modelo de Stretch.

El recorrido se compone de dos partes, primero se ha creado un movimiento de aproximación para situar la herramienta en la posición en la que empezará a deformar. Y a continuación, la trayectoria en zig-zag donde va a ir deformando la chapa realizando bajadas de 0.5 mm a baja velocidad en los extremos. El usillo permanecerá parado, sin girar.

La trayectoria se genera en código APT, a continuación será procesado obteniendo sólo aquellos puntos por los que pasará el punzón. Y finalmente, mediante el programa WinPost se obtiene el lenguaje ISO que se va a introducir en la máquina de control numérico.

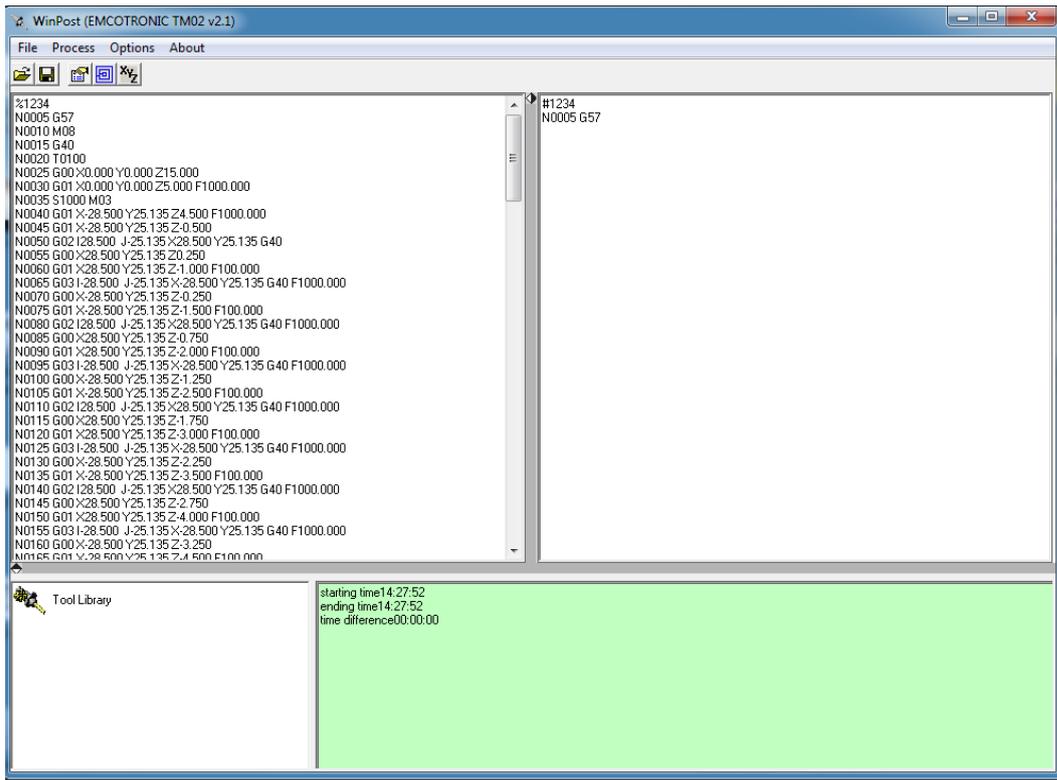


Figura 3.11- Ventana del programa Winpost

A continuación, se procedió a crear un programa de forma manual que nos permitiera poder realizar distintas alturas de flancos.

El programa se compone de una parte principal, en la cual la máquina se acerca a baja velocidad al punto inicial del proceso, donde se va a comenzar el conformado de la chapa. A continuación, realiza una primera pasada de un extremo a otro del flanco y comienza la lectura de la subrutina.

```
%1234
N0005 G57
N0010 G40
N0015 T0100
N0020 S1000 M03
N0025 G00 X0.000 Y0.000 Z100.000
N0030 G00 X0.000 Y0.000 Z20.000
N0035 G01 X0.000 Y0.000 Z5.000 F1000.000
N0040 G01 X-28.500 Y25.135 Z4.500 F1000.000
N0045 G01 X-28.500 Y25.135 Z-0.500 F1000.000
N0050 G02 I28.500 J-25.135 X28.500 Y25.135 G40 F1000.000
N0055 G25 L5070
N0060 G01 X28.500 Y0.000 F500.000
N0065 G01 X28.500 Y0.000 Z100.000 F500.000
N0070 M05
N0075 M30
```

Figura 3.12- Código del ensayo experimental para máquina CNC

En la siguiente subrutina el punzón se mueve de un extremo a otro del flanco bajando 0.5 mm en z todas las veces que se quiera hasta alcanzar la altura de pestaña deseada, que será variable cambiando tan solo el número de veces que se repite el subprograma. Una vez ejecutada esta subrutina, la máquina vuelve al programa principal donde el punzón vuelve a una posición segura y para.

```
%0050  
N0010 G01 X28.500 Y25.135 W-0.750 F100.000  
N0020 G03 I-28.500 J-25.135 X-28.500 Y25.135 G40 F1000.000  
N0030 G01 X-28.500 Y25.135 W-0.500 F100.000  
N0040 G02 I28.500 J-25.135 X28.500 Y25.135 G40 F1000.000  
N0050 M17
```

Figura 3.13- Subrutina del código para el ensayo experimental para máquina CNC

Está previsto realizar los ensayos especificados en este apartado próximamente con el fin de estudiar el proceso experimental y poder contrastar con los resultados ya obtenidos en los ensayos numéricos. Las probetas que se van a ensayar son las Stretch de radio 50 mm con las tres formas distintas que se han comentado anteriormente. La primera con los bordes de los flancos orientados linealmente con el centro de la circunferencia que forma el radio inicial, la segunda con una apertura de los laterales de estos flancos y la tercera y última desplazando el radio 50 final hasta el borde de este flanco.

Ya se está procediendo a realizar las matrices que se van a utilizar para acometer estos ensayos, al igual que se están preparando todos los útiles necesarios para conformar la batería de ensayos que pretende realizar el departamento.

Capítulo 4

Resultados y análisis

Como capítulo final se expondrán todos los resultados obtenidos en los ensayos numéricos realizados. Así como fuerzas, diagramas FLD's en puntos del flanco, tensiones hidrostáticas o los cambios en el diseño de la probeta inicial que se han llevado a cabo.

4.1. Fuerzas producidas en la herramienta

En este apartado se pretende representar las distintas fuerzas que se han producido en la herramienta durante la simulación numérica de las distintas probetas a lo largo de todo el ensayo.

Debemos de saber que las fuerzas producidas en el punzón en las simulaciones numéricas siempre se van a encontrar ligeramente por encima de las fuerzas que podrían obtenerse en un ensayo experimental que presente las mismas condiciones, ya que como se dijo anteriormente, se tuvo que optar por cambiar el modelo de endurecimiento por uno isótropo en vez del cinemático debido a los altos costes computacionales que producía. Por otro lado, las fuerzas en la dirección "y" suelen estar por debajo de las producidas en el eje "x" y "z".

La recopilación de las fuerzas producidas durante los ensayos nos ayudará a tomar la decisión de qué prestaciones debe tener la máquina a elegir para realizar un ensayo experimental.

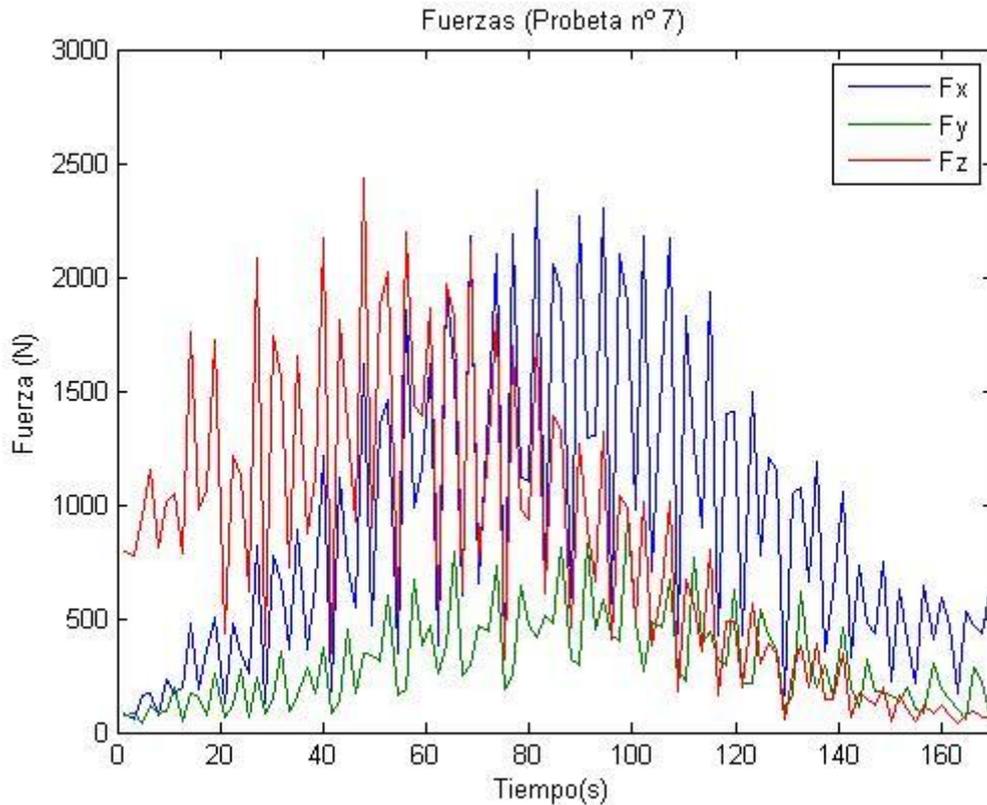


Figura 4.1-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo H50R12-T (número 7).

Anteriormente se han representado las fuerzas producidas por el punzón en una probeta de Stretch, con la finalidad de saber la distribución que van a tener las fuerzas en este tipo de ensayos. Como se puede observar al comienzo, las fuerzas en el eje z son notablemente mayores que en los otros ejes debido a la penetración inicial que introduce el punzón en la chapa. Ésta fuerza se mantiene en un valor medio aproximadamente constante alrededor de 700 N y posteriormente desciende debido a que el flanco se ha situado en posición vertical y el punzón no tiene que ejercer tanta fuerza en esta dirección.

Las fuerzas en el eje x e y presentan un carácter similar, al comienzo presentan un camino ascendente debido a que hay poco contacto chapa punzón en dichas direcciones. Una vez ha bajado la herramienta, éste contacto aumenta provocando mayores fuerzas en el punzón para producir la deformación que se pretende. Y finalmente decrecen ya que la chapa ha adoptado prácticamente la forma curva y la fuerza a realizar por el punzón en estas direcciones es menor en este tipo de probetas.

A continuación, se representan los resultados para los ensayos de Shrink, se va a comenzar con la comparación del ensayo R50H12-C (número 3) frente al R50H30-C

(número 4) para observar la diferencia que presentan con respecto a la altura del flanco.

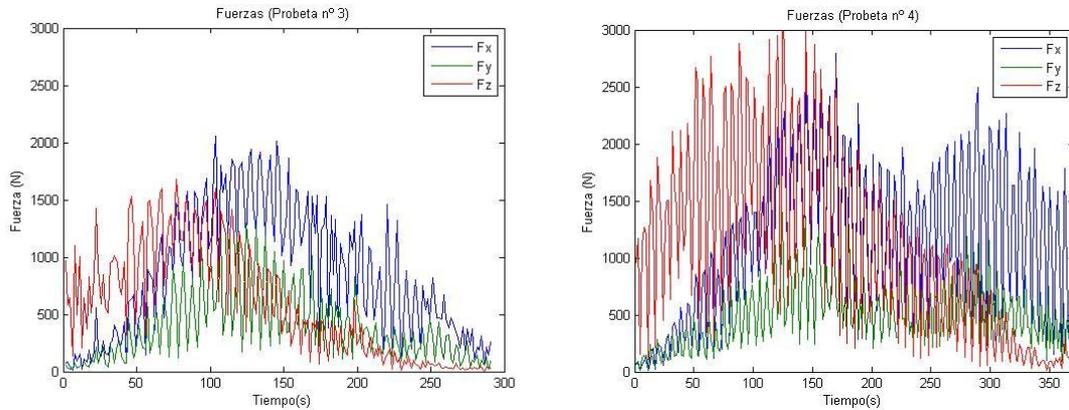


Figura 4.2-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R50H12-C y R50H30-C respectivamente.

En la figura 4.2. Se representan las fuerzas obtenidas en dos ensayos de Shrink, ambos con el mismo radio y distinta longitud de pestaña, de 12 y 30 mm respectivamente. La diferencia que se observa es la mayor amplitud que presentan las fuerzas para el ensayo de mayor longitud de pestaña.

También se han obtenido unos resultados de una probeta de Shrink con radio 15 y longitud de pestañas de 12 mm, ésta no tiene buen acabado superficial, por ello no se ha introducido en otros datos, pero si se ha procedido a representarla en este apartado de fuerzas. Ahora se procede a compararla con una probeta de 50 mm de radio.

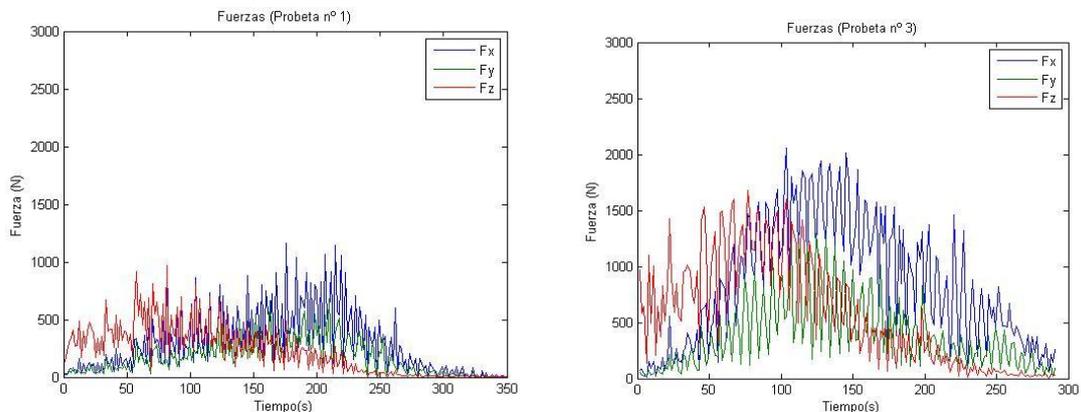


Figura 4.3-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo R15H12-C y R30R12-C respectivamente.

Al tener menor radio y por tanto menor chapa para ser conformada las fuerzas que se generan sobre el punzón son menores.

A continuación se van a comparar los resultados de las probetas de Stretch R50H12-T (número 7) y R50H30-T (número 8) respectivamente, para observar la diferencia que presentan las fuerzas obtenidas al variar la longitud del flanco en este tipo de ensayos.

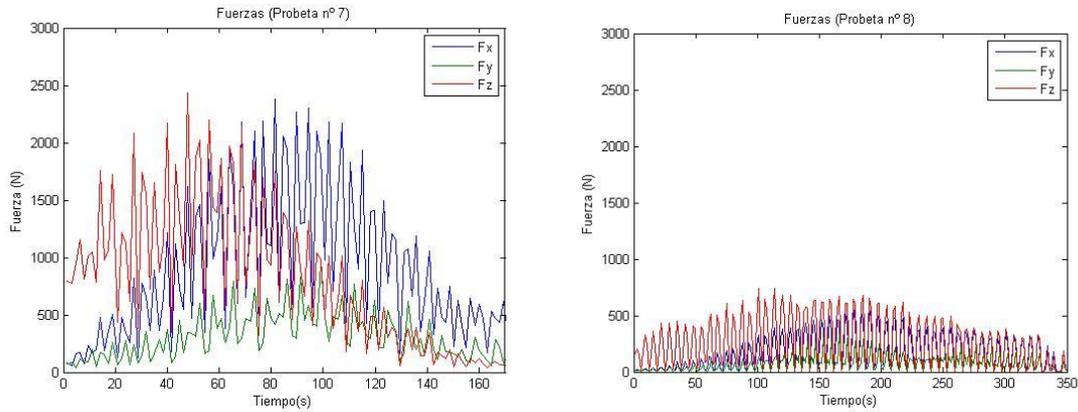


Figura 4.4-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R50H12-T y R50H30-T respectivamente.

En la figura 4.4. Se representan las fuerzas obtenidas en dos ensayos de Stretch, ambos con el mismo radio y distinta longitud de pestaña 12 y 30 mm respectivamente. Como se puede ver, las fuerzas obtenidas en el ensayo R50H30-T son demasiado pequeñas comparadas con todas las que se vienen representando en este apartado. Podemos decir que en este ensayo se ha producido un error de algún tipo que no nos ha calculado bien las fuerzas realizadas por el punzón. Por tanto no podemos sacar ninguna hipótesis acerca de lo que ocurriría al cambiar de longitud de pestaña en este tipo de ensayos.

Al igual que antes en el modelo de Shrink se ha simulado una probeta de Stretch con radio 50 mm, aunque no presenta buen acabado superficial se ha procedido a representar la fuerza obtenida. Ahora se procede a compararla con una que presente la misma longitud de pestaña y distinto radio.

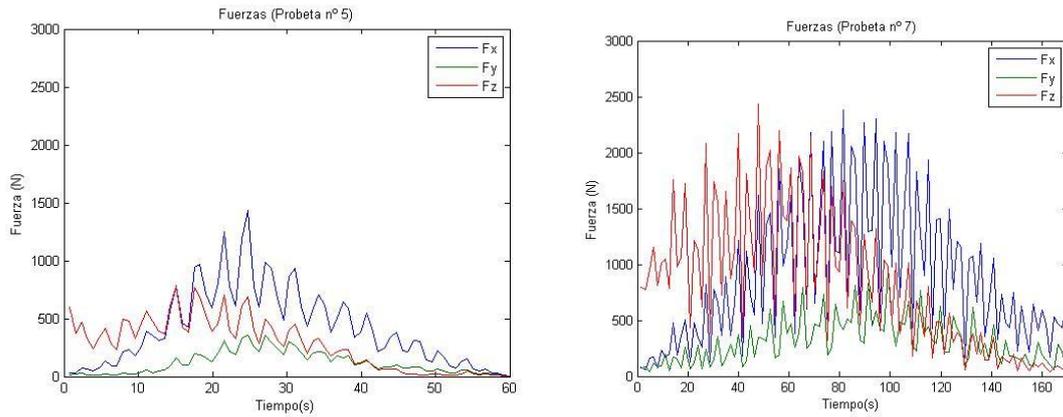


Figura 4.5-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R15H12-T y R50H12-T respectivamente.

En la comparativa anterior podemos observar que para el ensayo de menor radio, la fuerza ejercida se encuentra por debajo, esto se debe a que la superficie a doblar es pequeña y por tanto opone menor resistencia a ser doblada. El comportamiento de los gráficos es similar en los dos casos.

Veamos que ocurre al variar el espesor de la chapa.

También se ha procedido a ensayar probetas de 1,6 mm de espesor como se dijo anteriormente con el fin de comparar los resultados obtenidos.

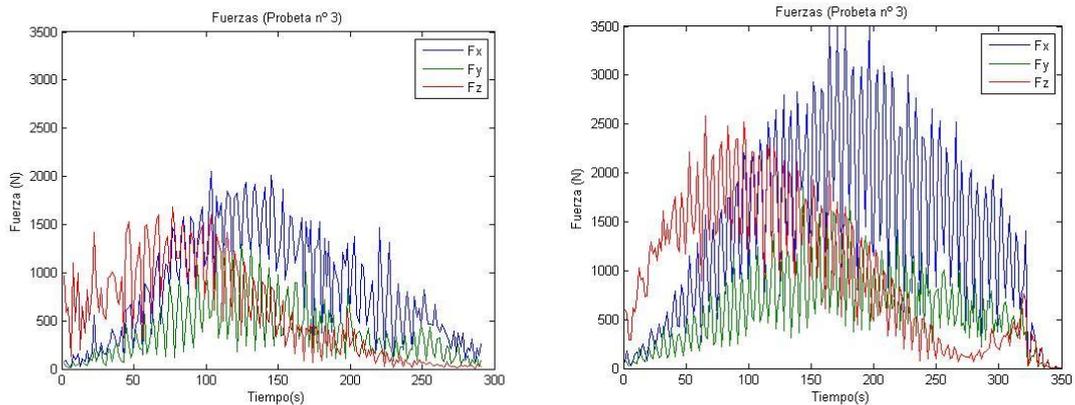


Figura 4.6-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo R50H12-C con 1.2 mm de espesor y 1.6 mm respectivamente.

En las anteriores gráficas se representan las fuerzas para el ensayo R50H12-C (número 3) con espesores de 1.6 mm y 1.2 mm respectivamente. Como se observa, el

comportamiento que presentan las fuerzas de ambos resultados son similares, el único cambio apreciable se produce en la chapa de 1,2 mm que como era de esperar es menor la fuerza necesaria para producir la deformación. Al igual ocurre con todos los ensayos que se han llevado a cabo.

Y finalmente veamos que ocurre al comparar una chapa de Stretch y otra de Shrink con el mismo radio y misma longitud de pestaña.

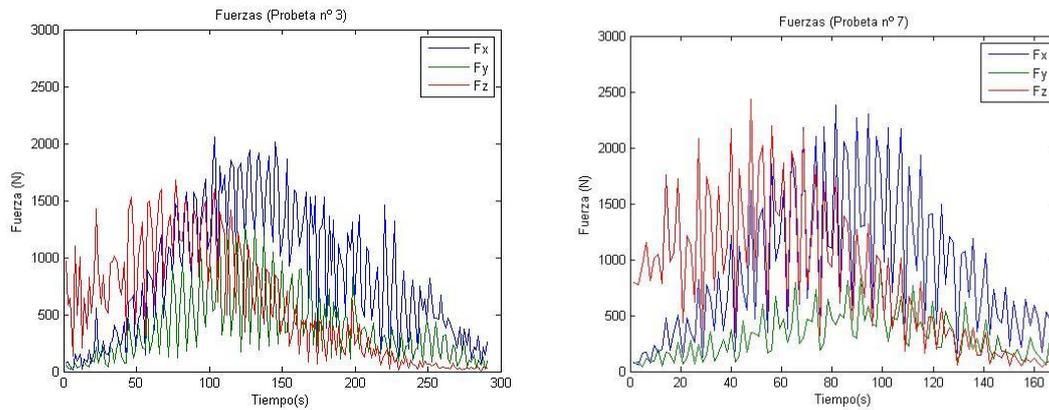


Figura 4.7-Fuerzas en ejes x,y,z para el ensayo número R50H12-C y R50H12-T respectivamente.

Las fuerzas para el ensayo de Shrink se encuentran ligeramente por debajo de las originadas en el ensayo de Stretch.

A continuación se recogen en una tabla las fuerzas producidas en todas las simulaciones numéricas realizadas, donde podemos comparar la variación de fuerzas al variar el espesor de la chapa.

Modelos	Nomenclatura	Fuerza en x (N)		Fuerza en y (N)		Fuerza en z (N)	
		1.2 mm	1.6 mm	1.2 mm	1.6 mm	1.2 mm	1.6 mm
1	R15H12-C	1000	2000	500	1000	1000	1500
2	R15H30-C	1500	3000	1000	1500	1200	2500
3	R50H12-C	2000	3000	1200	1500	1600	2000
4	R50H30-C	3000	5000	1000	2500	2500	6000
5	R15H12-T	1200	5000	400	1000	700	1500
7	R50H12-T	3000	6000	1500	2100	2000	5000
8	R50H30-T	600	4500	200	2000	1000	6000

Tabla 3.1-Fuerzas en ejes x,y,z para todos los ensayos realizados con 1.6 mm y 1.2 mm de espesor.

En color rojo se representan aquellos ensayos que no se han logrado completar con éxito.

El comportamiento como venimos describiendo en todas las gráficas es el mismo, exceptuando que en los ensayos de espesor 1,6 mm las fuerzas producidas por el punzón son mayores que en los de 1,2 mm. Como se observa, en los datos recogidos en la tabla, la diferencia entre los valores obtenidos de un espesor a otro dependen de el eje que elijamos, ya que dependiendo de éste y del ensayo ya sea Stretch o Shrink las variaciones pueden ser mayores o menores.

Como resumen de este punto se puede decir que se han llegado a varias hipótesis en el campo de fuerzas. Las fuerzas son mayores en ensayos con mayor longitud de pestaña, al igual que ocurre al aumentar el radio, que la fuerza ejercida por el punzón es mayor tanto para ensayos de Stretch como de Shrink.

Para ensayos con chapas de mayor espesor las fuerzas aumentan considerablemente si comparamos los obtenidos con 1,2 y 1,6 mm. Y finalmente se puede ver que las fuerzas obtenidas en un ensayo de Shrink frente a uno de Stretch las fuerzas son ligeramente mayores en Stretch.

4.2. Diagramas FLD's

En este apartado se van a representar los distintos diagramas límites de conformado que se han obtenido, que consisten en representar las deformaciones máximas frente a las medias en un punto durante todo el proceso. Los puntos que se han seleccionado corresponden a un corte que se ha realizado a las distintas probetas a lo largo de su bajada y así poder observar lo que ocurre a distintas alturas, también se han representado los puntos paralelos en la cara exterior, que sería la cara que no está en contacto con el punzón.

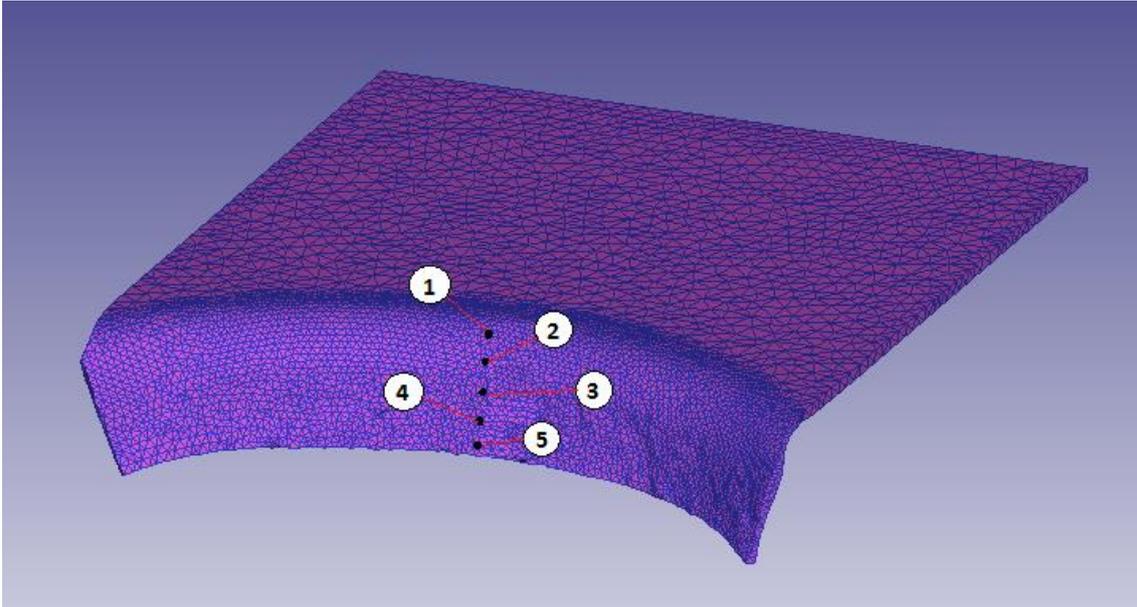


Figura 4.8-Puntos seleccionados para la representación de la FLD en la cara delantera.
(CONTACTO CON PUNZON)

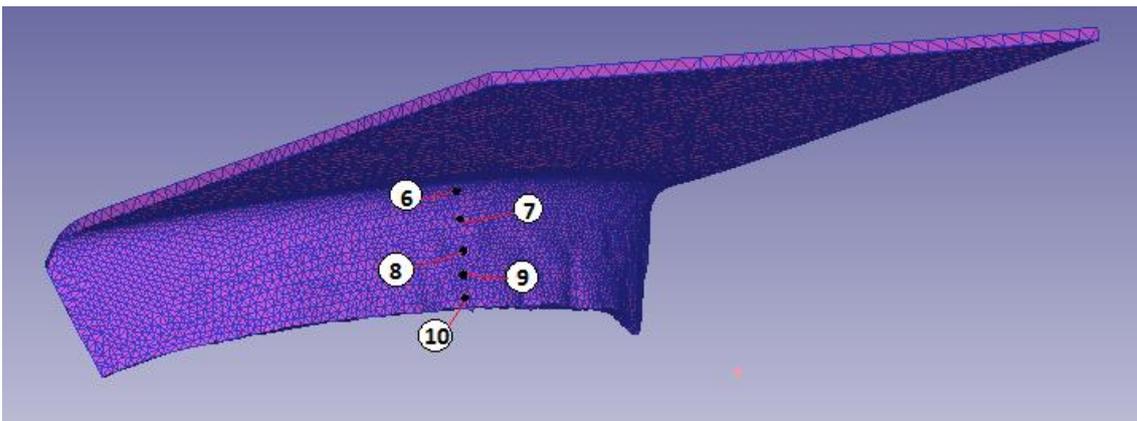


Figura 4.9-Puntos seleccionados para la representación de la FLD en la cara trasera.
(NO CONTACTO CON PUNZON)

Las siguientes FLD's pertenecen a la probeta de Stretch R50H30-T (número 8). Como podemos observar, las deformaciones son prácticamente iguales tanto en la cara interior (zona del punzón) como en la exterior, alcanzando la deformación principal máxima un valor de 0,35 en el punto del extremo inferior de la probeta. Podemos observar como todos los puntos se mueven prácticamente alrededor del eje vertical, lo que quiere decir que todos los puntos se encuentran en la zona de deformación biaxial pero cercanas a deformación plana. Los puntos más cercanos a la zona de doblado tienden a desplazarse hacia la derecha del diagrama. Tanto en la cara interior como exterior podemos observar que el comportamiento de las curvas FLD's son similares.

En todos los diagramas FLD's se ha representado el punto de fractura obtenido en el ensayo experimental para el Aluminio 2024-T3 con un diámetro de punzón de 20 mm.

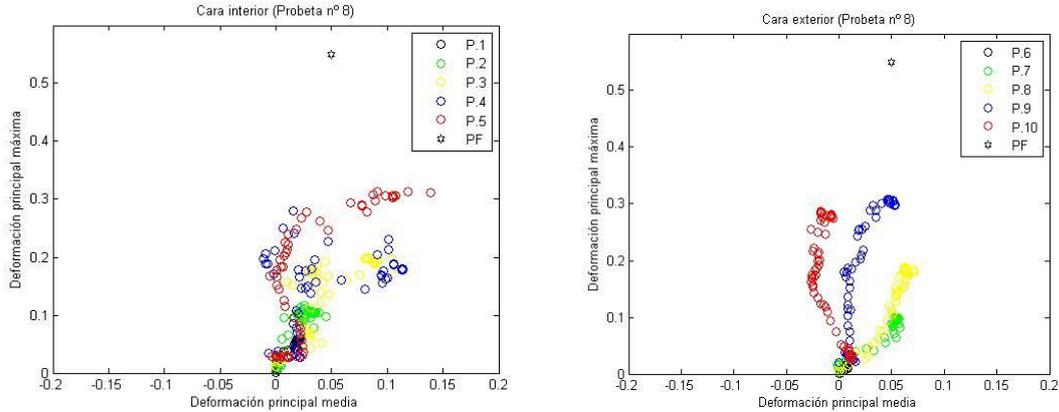


Figura 4.10- Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H30-T conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

A continuación se procede a analizar los resultados obtenidos en la probeta R50H12-T (número 7), como se puede observar, al igual que antes los puntos se sitúan cercanos a la zona de deformación plana, aunque entren alguno en la zona biaxial, aquí podemos observar como algunas de las trayectorias se curvan debido al paso del punzón sobre los puntos seleccionados. Las deformaciones principales máximas alcanzadas se encuentran en torno a 0.4.

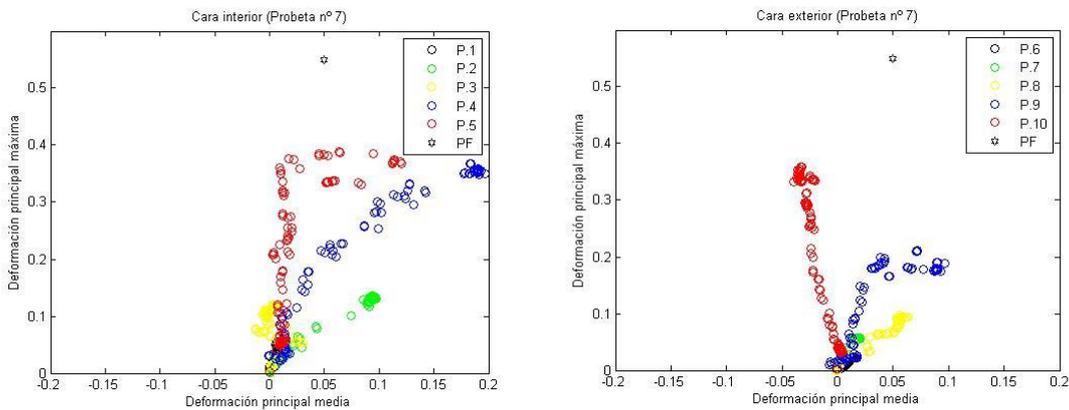


Figura 4.11- Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H12-T conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Como diferencia entre flancos mayores o menores en este tipo de probetas se puede observar que la deformación principal máxima es menor en probetas de mayor longitud de pestaña.

Ahora se procede a estudiar las probetas de Stretch simuladas. Primero se presenta la probeta R50H30-C (número 4). En ella podemos ver que los puntos se mueven en torno a la zona de deformación plana al igual que venía ocurriendo en las probetas de Shrink. Cabe destacar que el punto número 5 situado en el borde tiende hacia la zona biaxial.

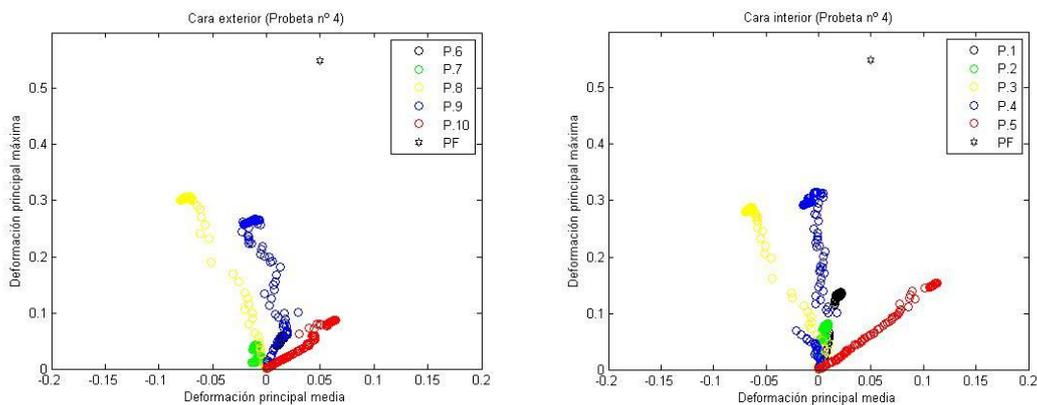


Figura 4.12- Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H30-C conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

En el diagrama anterior se observa como el punto del extremo se desplaza de la pestaña hacia la zona equibiaxial $\beta=1$. Éste fenómeno se va a contrastar con los resultados que se obtengan en futuros ensayos experimentales ya que no está muy claro el comportamiento.

A continuación se muestran las curvas obtenidas para la probeta R50H12-C (número 3). A simple vista podemos observar como viene ocurriendo en todos los ensayos que todos los caminos se encuentran en deformación plana. La única diferencia que puede verse es el nivel de deformación alcanzado que es mayor en la número 3.

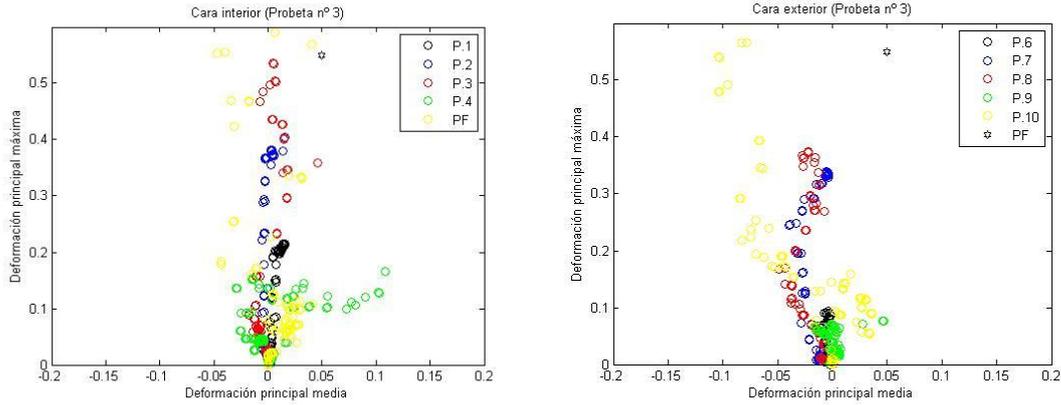


Figura 4.13- Diagramas FLD's numéricos para la chapa R50H12-C conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Por tanto, al igual que hemos visto en las probetas de Shrink a menor pestaña la deformación principal máxima es mayor.

El ensayo que se presenta a continuación es el R15H30-C en el cual los puntos se sitúan en la zona de deformación plana y las deformaciones principales máximas alcanzadas se encuentran en torno a 0.4. Si comparamos con el ensayo de mayor radio R50H30-C la única diferencia que presenta es el nivel de deformaciones alcanzado que es de 0.3, por tanto, menor.

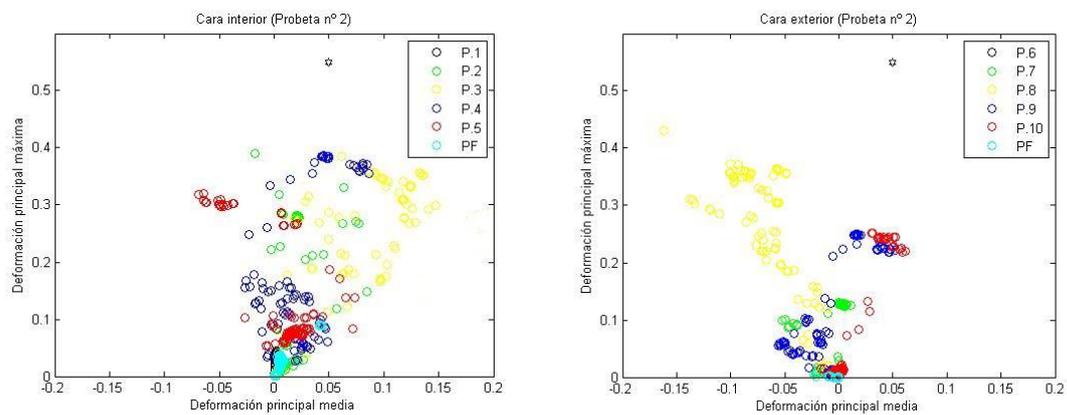


Figura 4.14 -Diagramas FLD's numéricos para la chapa R15H12-C conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

También se ha realizado el ensayo R15H12-T. Los caminos seguidos en el diagrama se encuentran en la zona deformación plana y la deformación principal máxima en torno

a 0.4 al igual que ocurría en el ensayo R50H12-T, por tanto no presentan diferencias al cambiar el radio del flanco.

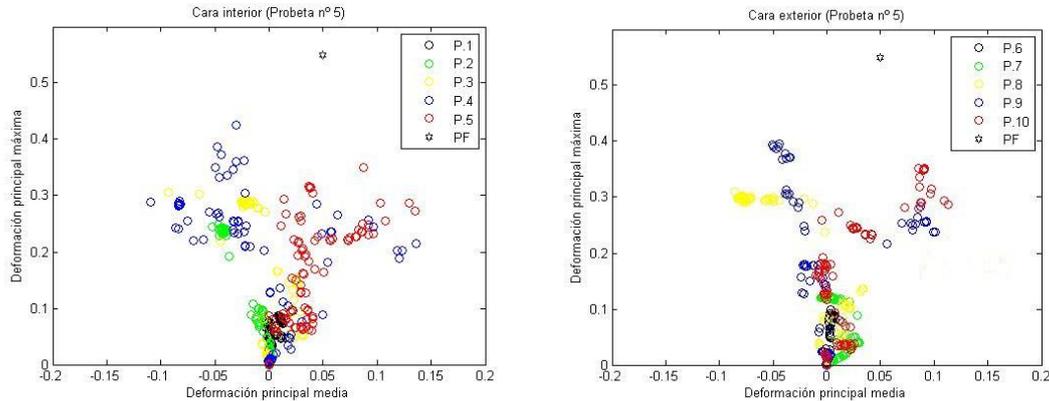


Figura 4.15- Diagramas FLD's numéricos para la chapa R15H12-T conformada por SPIF con una herramienta de 20 mm de diámetro

Como resumen a este apartado de FLD's podemos decir que en los ensayos de Shrink a mayor longitud de pestaña las deformaciones principales máximas alcanzadas son menores, mientras que si el radio disminuye éstas aumentan. Con respecto a los ensayos de Stretch las deformaciones principales máximas aumentan al disminuir la longitud del flanco y con respecto a la variación de radio no presenta ningún cambio en las deformaciones.

4.3. Deformaciones en los bordes

Una vez ensayadas todas las probetas, se puede observar a simple vista que los bordes de las chapas han aumentado en longitud, al igual que la altura de la pestaña se ha visto afectada. Esto se debe a las deformaciones que produce el punzón tanto al bajar como al desplazarse tangencialmente provocando este efecto en las chapas.

A continuación, se muestra una tabla que recoge las deformaciones que se han producido en el borde de la pestaña, para ello se ha medido antes y después de la simulación obteniendo los valores recogidos en la siguiente tabla.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L_f}{L_i}\right)$$

Fórmula 2.1-Fórmula utilizada para el cálculo de la deformación.

La fórmula anterior ha sido utilizada para el cálculo de la deformación producida en los flancos, siendo L_f la longitud final alcanzada por el flanco y L_i la longitud que tenía inicialmente.

		Borde				
		Probeta	Nomenclatura	Inicial (mm)	Final (mm)	Deformación
SHRINK	1	R15H12-C	45,79	48,1	5%	
	2	R15H30-C	76,32	81,2	6%	
	3	R50H12-C	105,15	108	3%	
	4	R50H30-C	77,19	80,1	4%	
STRETCH	5	R15H12-T	8,48	9,43	11%	
	7	R50H12-T	59,36	70	16%	
	8	R50H30-T	33,92	40,4	17%	

Tabla 4.1-Deformaciones producidas en el borde en ensayos de 1.2 mm de espesor.

Como se puede ver en la tabla anterior las deformaciones obtenidas en el borde oscilan en torno a un valor del 4% para las probetas de Shrink y de un valor de un 15% para probetas de Stretch. Por tanto, a la hora de tomar resultados de deformación podemos señalar que ni la diferencia de radio ni de altura es muy significativa a la hora de medir las deformaciones obtenidas en el borde de las probetas.

Una vez se han tomado todas las medidas, se han simulado algunas probetas con el fin de determinar una preforma inicial que nos permita obtener un resultado final cuyo flanco sea totalmente vertical una vez conformadas. Para ello se ha realizado una disminución de la longitud del borde un porcentaje aproximadamente igual al valor de la deformación que se va a producir en esta zona de la probeta.

En el siguiente sub-apartado podemos ver el procedimiento llevado a cabo para las nuevas probetas y los resultados obtenidos.

4.3.1. Probetas a medida (Tailored test parts).

Una vez terminadas las simulaciones numéricas de las probetas de 1.2 mm se tomaron las medidas necesarias para calcular las deformaciones que se habían producido en el borde de la chapa. La finalidad de esta medida era la de idear unas nuevas preformas

iniciales que nos permitieran obtener un flanco recto. Dichas medidas se pueden ver a continuación en la tabla 4.1.

		Borde				
		Probeta	Nomenclatura	Inicial (mm)	Final (mm)	Deformación
SHRINK	1	R15H12-C	45,79	48,1	5%	
	2	R15H30-C	76,32	81,2	6%	
	3	R50H12-C	105,15	108	3%	
	4	R50H30-C	77,19	80,1	4%	
STRETCH	5	R15H12-T	8,48	9,43	11%	
	7	R50H12-T	59,36	70	16%	
	8	R50H30-T	33,92	40,4	17%	

Tabla 4.1-Deformaciones producidas en el borde en ensayos de 1.2 mm de espesor.

Una vez recogido todos estos datos se procedió a realizar unas nuevas preformas como las que podemos ver en la figura 4.16 en la cual se redujo en el extremo un porcentaje de longitud igual que la deformación producida en las chapas de 1.2 mm de espesor, donde:

$$L_f = (1 - \epsilon) L_i$$

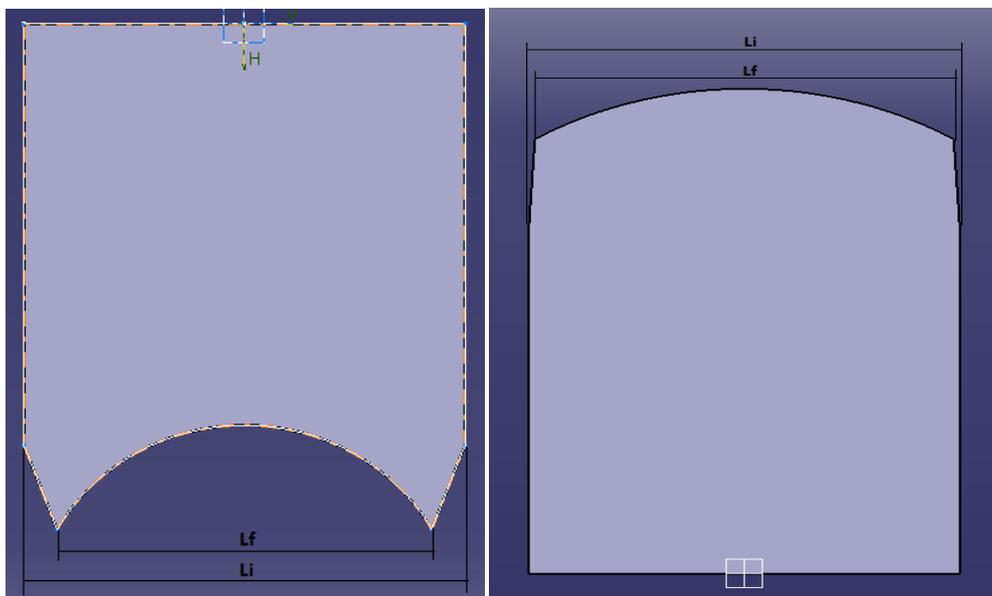


Figura 4.16-Nuevas preformas de Stretch y Shrink respectivamente.

A continuación, se muestran los distintos resultados numéricos que se han obtenido al realizar dichos cambios a la preforma. Se han ensayado tanto probetas de Stretch como de Shrink.

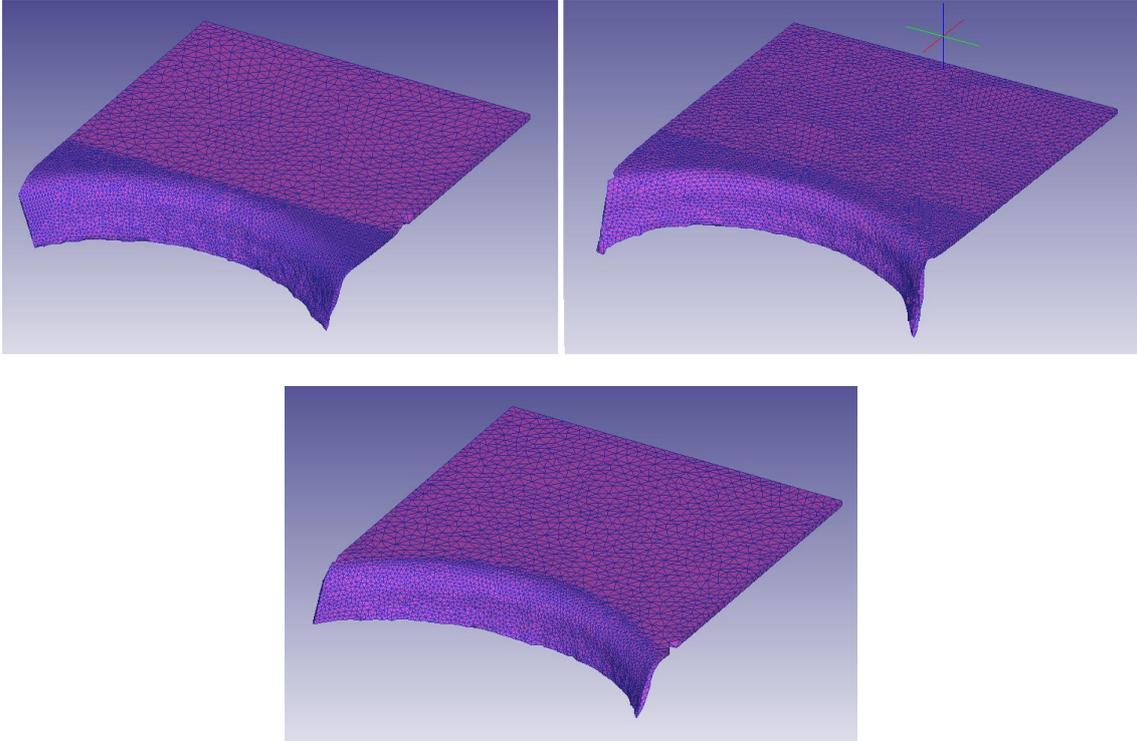


Figura 4.17- Resultado del flanco en el ensayo R50H12-T (número 7) antes y después de los dos cambios realizados en la probeta (vista superior).

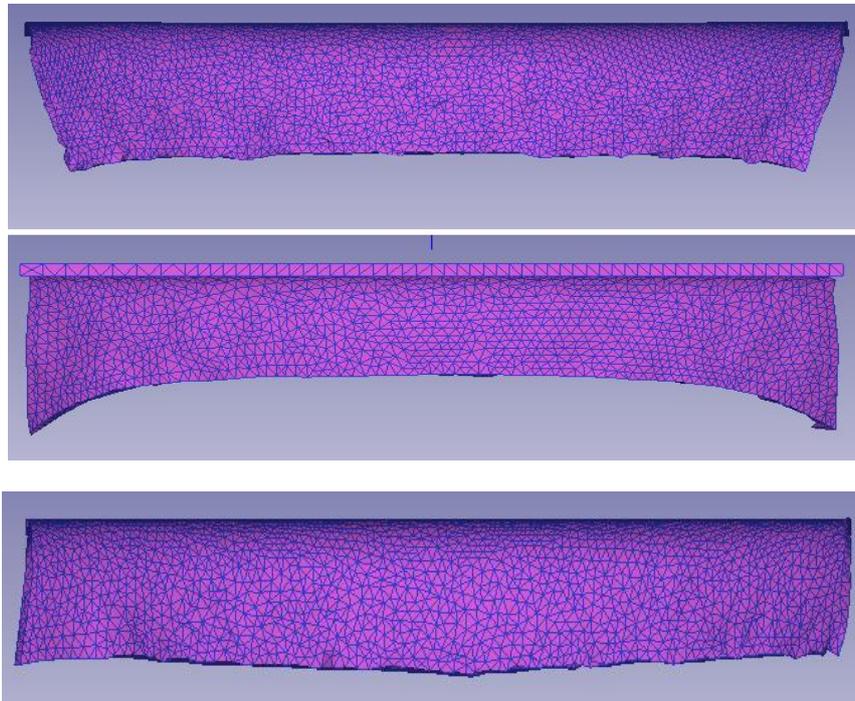


Figura 4.18-Resultado del flanco en el ensayo R50H12-T (número 7) antes y después de los dos cambios realizados en la probeta (vista frontal).

Como se puede ver en las imágenes el segundo resultado es bastante favorable obteniendo un flanco recto por los extremos. Para ello, en la preforma inicial se utilizó un decremento de la longitud del borde de un 16 % aproximadamente que es el valor medio de deformación obtenido para las probetas de Stretch.

Finalmente se procedió a intentar eliminar los picos que se producían en el ensayo de la probeta adaptada, por ello se simuló un último ensayo en el cual el radio de 50 mm se desplaza una distancia igual a la anchura de la pestaña que se quería conseguir, como se explicó en el apartado 4.3.1. En la siguiente imagen podemos ver el resultado final que se obtuvo al realizar este cambio.

También se ha procedido a modificar la probeta R50H30-T (número 8), dándole una amplitud al borde de un 15%, obteniendo como resultado un flanco prácticamente vertical como se observa en la siguiente imagen.

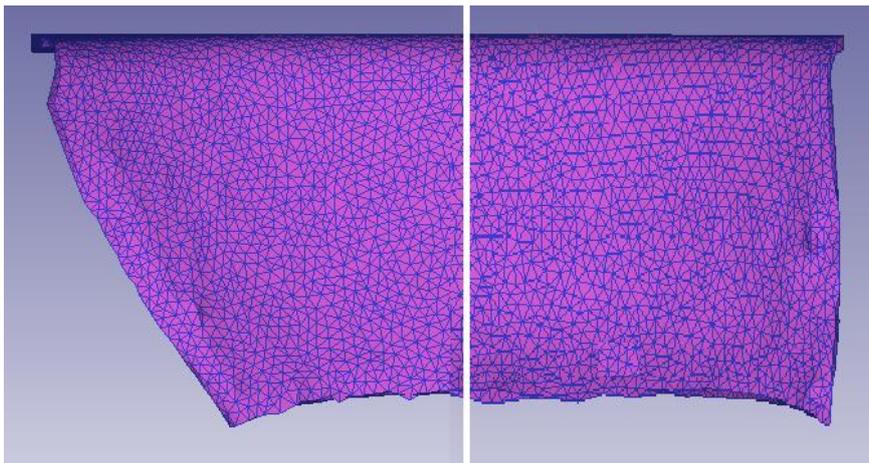


Figura 4.19-Resultado del flanco en el ensayo R50H30-T (número 8) antes y después del cambio realizado en la probeta (vista frontal).

A continuación, se puede observar otra imagen del ensayo de la probeta número 2, también de Shrink y como se aprecia los bordes del flanco también se han deformado verticalmente, para este modelo se tomó un aumento de un 6% para el borde inicial.

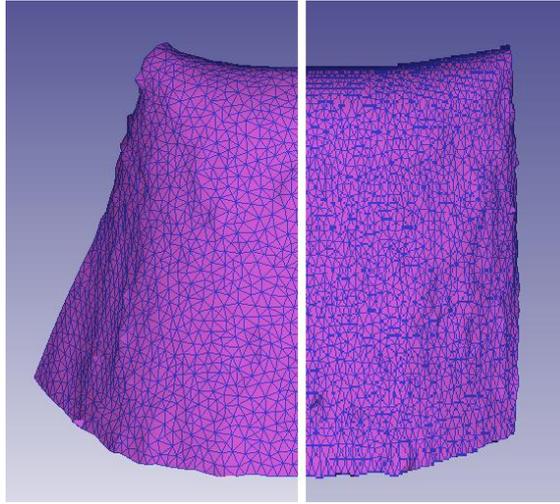


Figura 4.20-Resultado del flanco en el ensayo R12H30-C (número 2) antes y después del cambio realizado en la probeta (vista frontal).

4.3.2. Recuperación elástica en flancos

En este apartado se le han realizado tres cortes distintos a la probeta R50H12-T, que es la misma que va a ser realizada en futuros ensayos experimentales con la finalidad de ver la recuperación elástica que presenta en estas tres zonas.

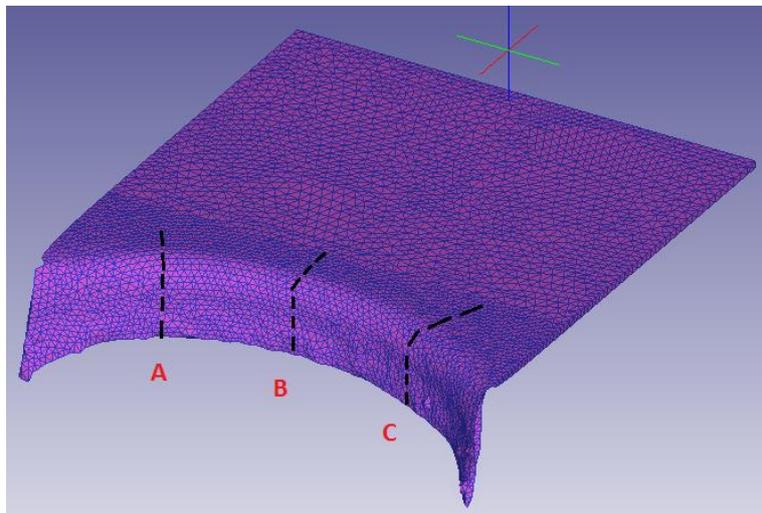


Figura 4.21-Cortes realizados en la chapa R50H12-T (número 7) para calcular la recuperación elástica producida.

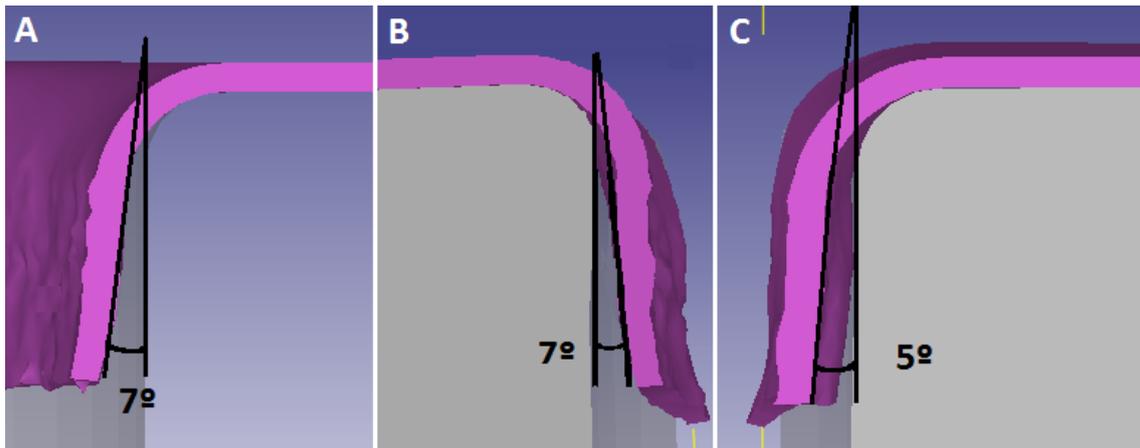


Figura 4.22-Springback producido en los cortes A, B y C para el ensayo R50H12-T (número 7).

Como se observa en las imágenes el springback producido en el corte A y B es de 7° , mientras que el del corte C es de 5°. Podemos decir entonces que numéricamente se produce recuperación elástica de la chapa, sólo faltaría comprobar la diferencia con el ensayo experimental que se realizará.

4.4. Características generales producidas en los ensayos.

A continuación se describen dos características que se producen en este tipo de ensayos que Bambach et al (2015) recogió en un artículo tras unos ensayos experimentales y que se han podido ver tras las simulaciones numéricas realizadas en este proyecto.

4.4.1. Bulge

Bambach et al. (2015) realizó numerosos ensayos experimentales con probetas tanto de stretch como de shrink con el fin de comprobar la precisión que se producían en los acabados de éstas. Comprobó que se formaban unas elevaciones (bulge) en los extremos de las chapas e ideó un elemento para la herramienta que permitía la reducción de este bulge. Otra de las comprobaciones que realizó fue aumentar la zona de contacto brida-chapa consiguiendo reducir prácticamente la formación del bulge. Para ello, representó las distintas alturas de este defecto conforme variaba el radio y la longitud de pestaña.

En la siguiente imagen podemos ver la zona donde se produce este defecto para las probetas de shrink.

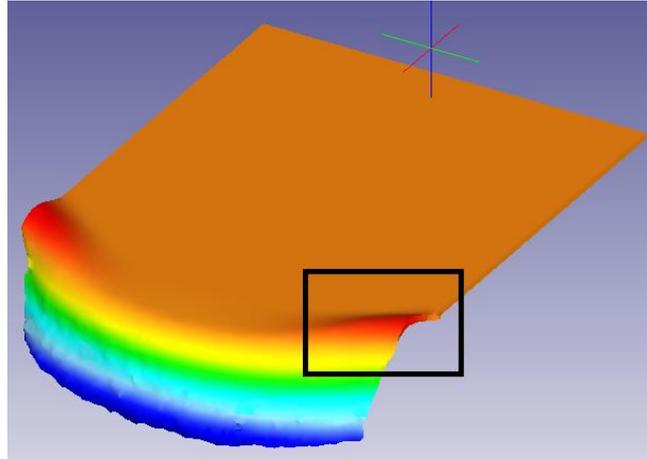


Figura 4.23-Bulge.

Éste defecto depende también de la distancia entre el borde del backing plate y la zona de empotramiento que se ha seleccionado para llevar a cabo el proceso. En la siguiente imagen podemos ver la distancia desde la zona de empotramiento al borde que se ha elegido para este proyecto que ha sido de 2mm.

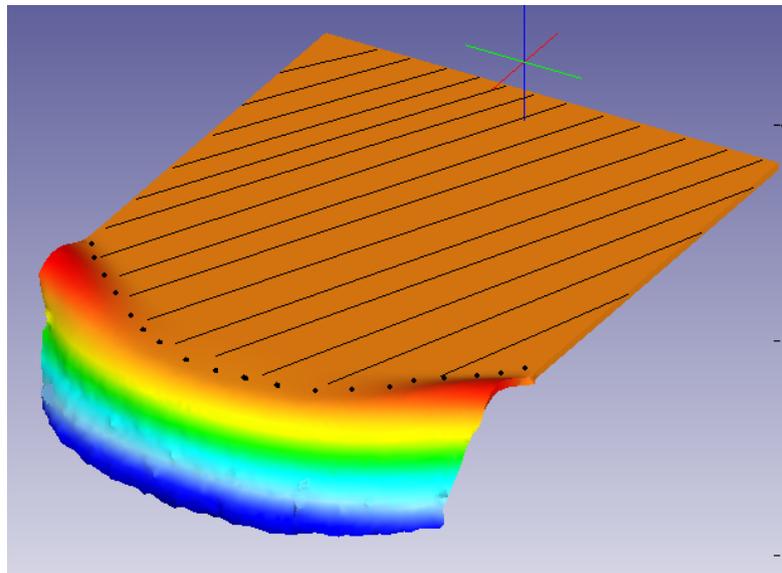
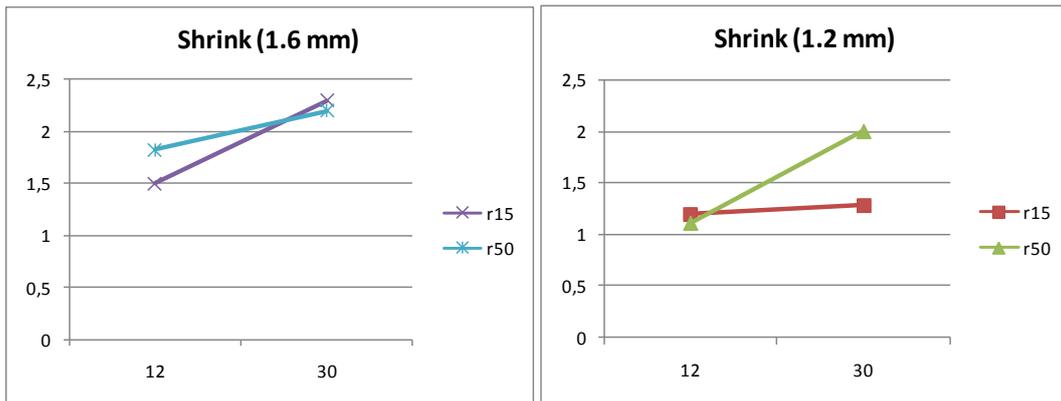


Figura 4.24-Zona de empotramiento.

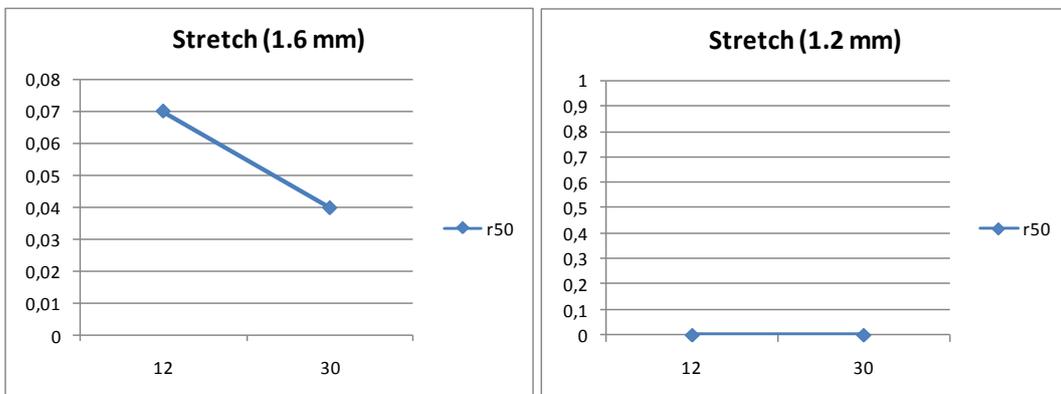
En este proyecto se han realizado las medidas de los bulges obtenidos utilizando un punzón de 20 mm de diámetro, hay que tener en cuenta que dependiendo de la superficie que estén presionando las bridas la altura del bulge puede variar.



Gráfica 4.1-Bulges en ensayos de Shrink para chapas de 1.6 mm y 1.2 mm de espesor respectivamente.

Como se puede apreciar en los gráficos, los bulges obtenidos para las chapas de Shrink con espesor de 1.6 mm son mayores que los obtenidos para 1,2 mm.

También podemos decir que mientras mayores sean las pestañas este defecto se hará más notable, alcanzando una altura mayor al igual que puede verse en el artículo de Bambach et al. mencionado anteriormente.



Gráfica 4.2-Bulges en ensayos de Stretch para chapas de 1.6 mm y 1.2 mm de espesor respectivamente.

Se observa como para probetas de stretch el bulge es nulo, al igual que los resultados expuestos por Bambach et al (2015), esto se debe a que la superficie presionada por el blank holder es la mayor posible permitiéndonos la deformación de la chapa a la forma deseada ya que no afecta a los procesos de doblado de ésta.

En la simulación numérica ésta zona se ha definido impidiendo los desplazamientos de los elementos como podemos ver en la siguiente imagen:

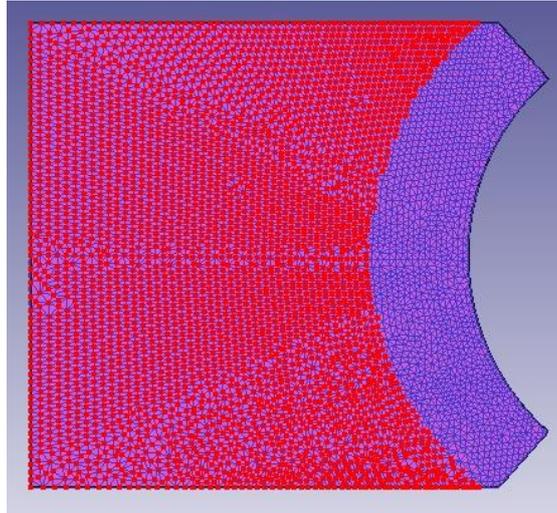


Figura 4.25- Empotramiento modificado para ensayos de Stretch.

Como se puede ver, se ha dejado libre solo aquella zona donde se van a producir las deformaciones, permitiéndonos de esta forma evitar la formación del bulge en la zona central de la chapa.

4.4.2. Cracks

Otro de los defectos estudiados por Bambach et al. (2015) fueron las roturas o cracks que se producían en los extremos de los ensayos de Stretch.

Al realizar las simulaciones numéricas podemos comprobar cómo este defecto que se produce en ensayos experimentales también se ha producido en los ensayos numéricos llevados a cabo en este proyecto. A continuación, se muestran unas imágenes de *DEFORM-3D™* en las cuales podemos ver una probeta de radio 50 mm y longitud de flanco de 12 mm.

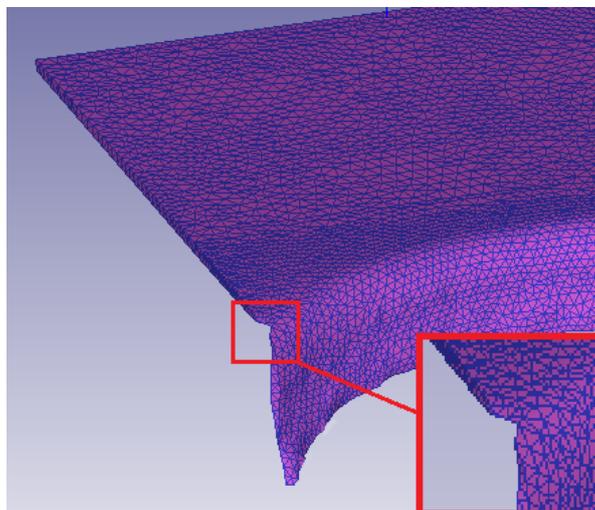


Figura 4.26-Crack.

Como se puede apreciar en las imágenes se ve claramente una reducción de espesor considerable en la zona del extremo de la chapa y la aparición de una rotura en dicha zona.

Esto se debe a la flexión repetitiva producida en las esquinas al utilizar una trayectoria de una sola estrategia para la herramienta. Para radios muy grandes, como por ejemplo 100 mm este defecto desaparece según Bambach et al. además del conformado de pestañas de poca longitud.

4.5. Tensión hidrostática.

La tensión hidrostática producida en el material durante el proceso de conformado, es un mecanismo que provoca el aumento de la conformabilidad, por ello el interés de ser estudiado.

En cualquier estado de tensiones σ_{ij} , hay una componente hidrostática σ_H , causante del cambio de volumen, que se puede expresar en función de las tensiones principales $\sigma_1, \sigma_2, \text{ y } \sigma_3$.

$$\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

Como ha descrito *Emmens et al.* (2009) si la componente hidrostática es negativa tendrá un efecto de compresión en dicha zona evitando el crecimiento de los microhuecos internos, por tanto ésta no tendrá influencia en la estabilización y localización de la deformación pero si en el retraso de la fractura.

A continuación se va a proceder a analizar el comportamiento de la tensión hidrostática en un intervalo de tiempo, sobre un determinado punto, observando de esta forma como varía al pasar por encima de éste el punzón en un ensayo de una chapa de Stretch. Se ha representado la tensión al comienzo y al final del proceso para ver las diferencias que presenta.

El punto seleccionado se muestra en la imagen a continuación, que como puede observarse se ha seleccionado un punto cercano a la zona inferior de la pestaña.

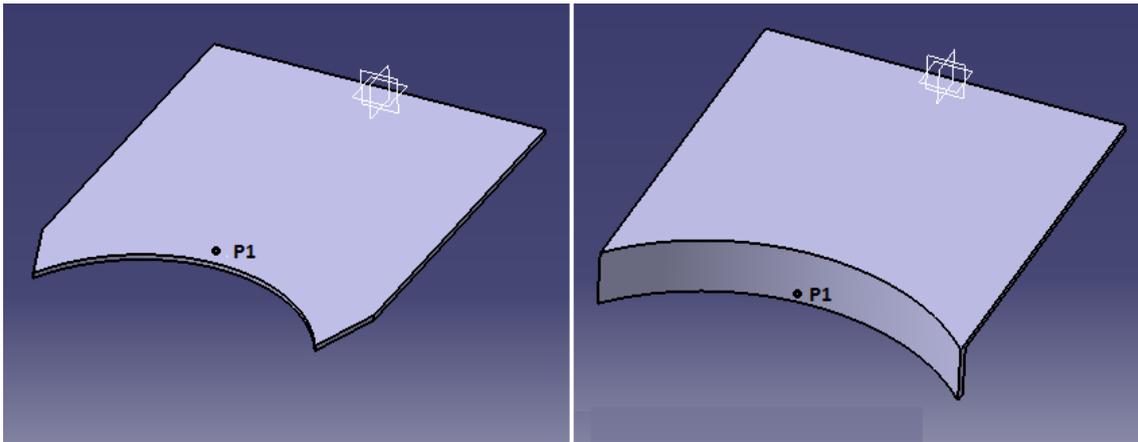


Figura 4.27- Selección de un punto para la representación de la tensión hidrostática en la zona inferior de la bajada

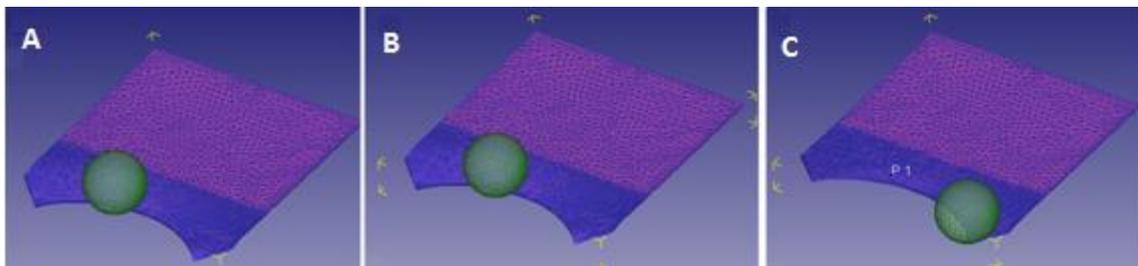


Figura 4.28-Captura de un instante de tiempo inicial durante el proceso de conformado de una chapa de Stretch.

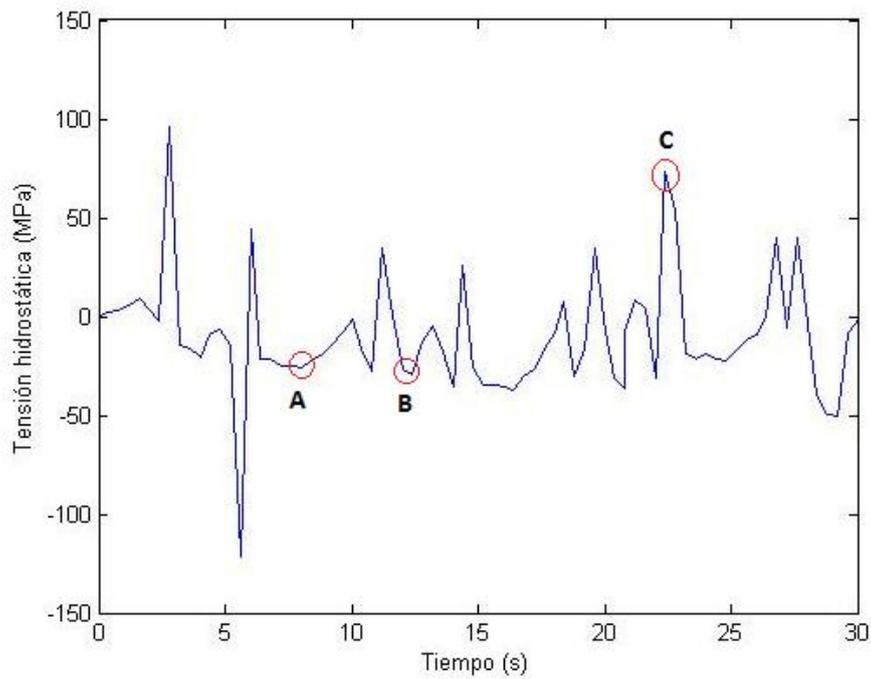


Figura 4.29- Tensión hidrostática en un intervalo de tiempo en un ensayo de Stretch

Como podemos observar en la gráfica, al pasar el punzón por encima del punto seleccionado se produce un pico de tensión y conforme se aleja éste valor decrece. Éstos decrementos que se producen son los causantes del retraso del fallo en el proceso de conformado.

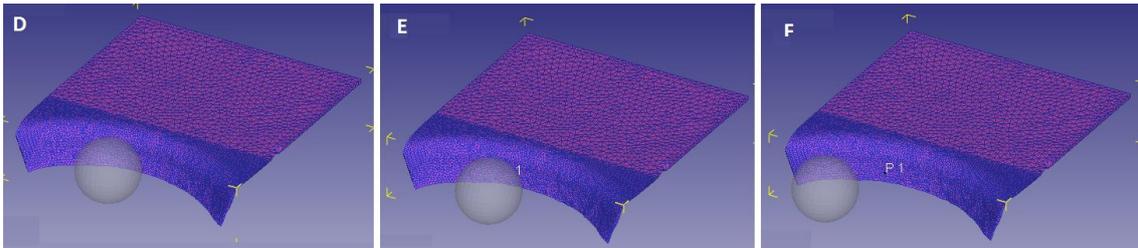


Figura 4.30-Captura de un instante de tiempo durante el proceso de conformado de una chapa de Stretch.

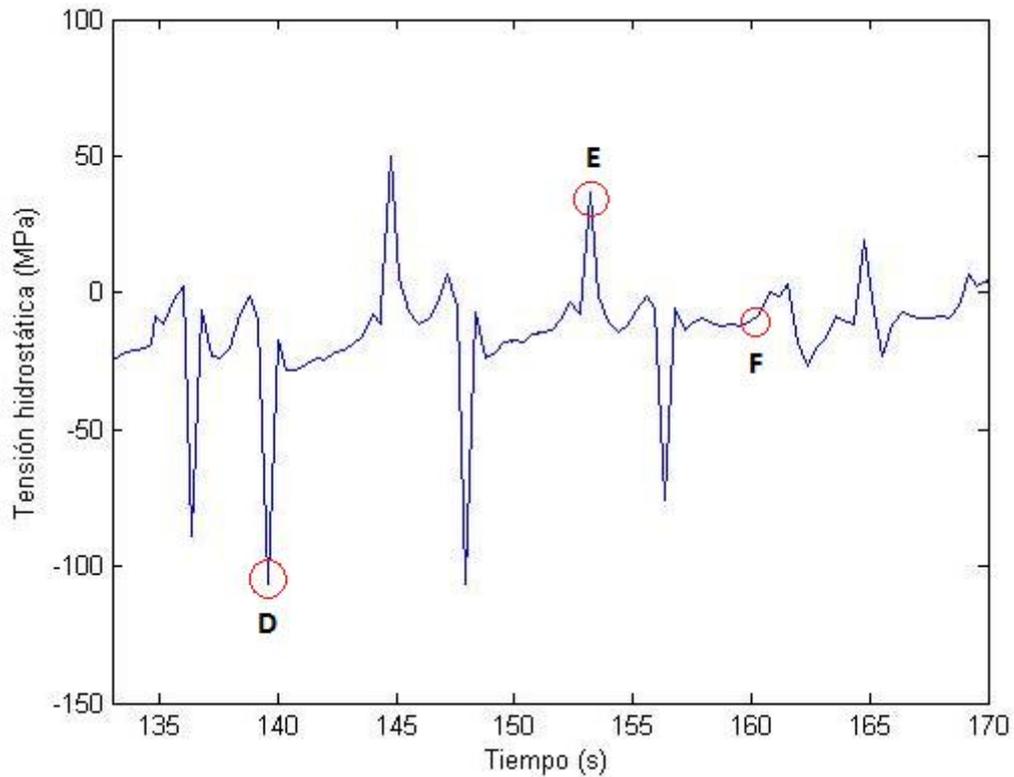


Figura 4.31- Tensión hidrostática en un intervalo de tiempo en un ensayo de Stretch

Una vez el punto ha bajado, se puede observar que se producen picos mayoritariamente en la zona negativa de tensión cuando el punzón se sitúa encima del punto estudiado. Esto se debe a que en la chapa tenemos una zona de compresión hidrostática.

La siguiente gráfica muestra la tensión hidrostática producida a lo largo de todo el proceso de conformado:

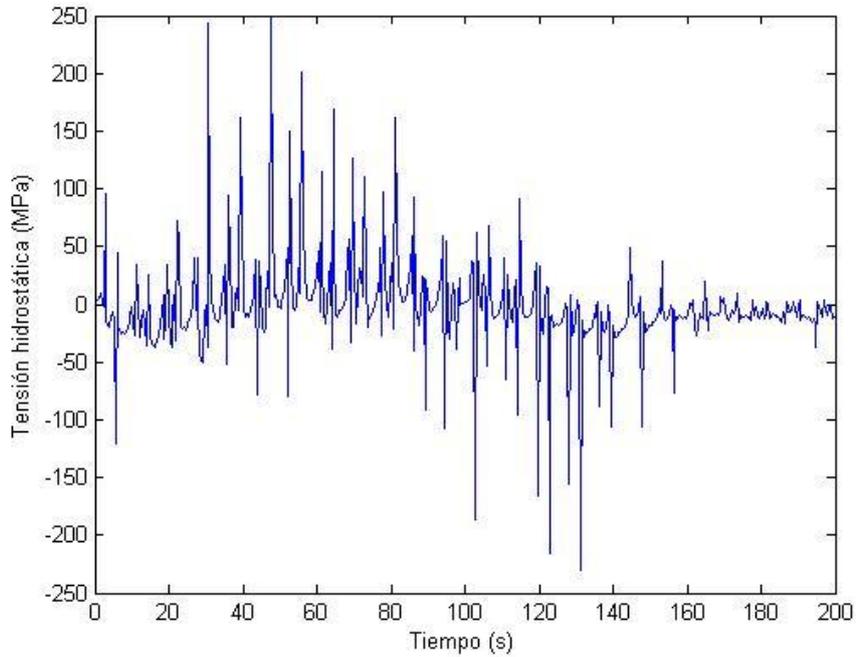


Figura 4.32- Tensión hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Stretch

En la gráfica se pueden observar dos zonas, la primera en la que predominan las tensiones hidrostáticas positivas y la segunda en la que tiende a estabilizarse en torno a un valor ligeramente negativo. Esto se debe a que una vez la pestaña ha bajado se producen unas tensiones de compresión en el centro del flanco curvo como se ha dicho anteriormente.

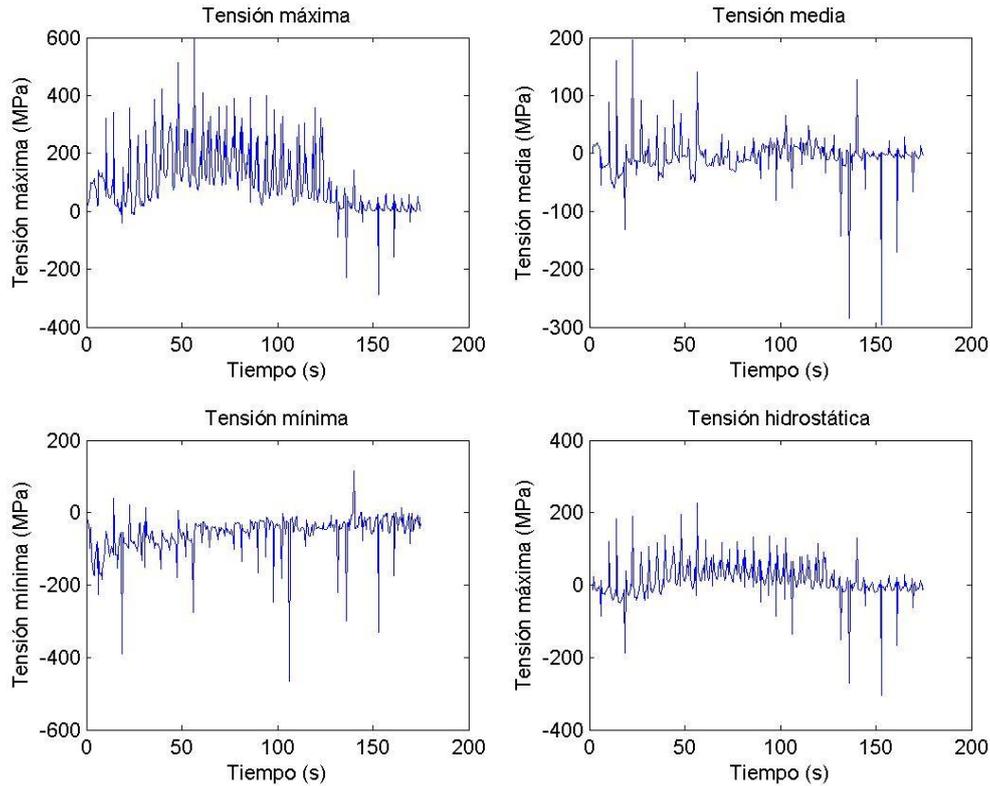


Figura 4.33- Tensión principal máxima, media, mínima e hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Stretch R50H12-T

En la imagen anterior se representa la tensión máxima, media y mínima principal junto con la hidrostática en un punto cercano al elegido anteriormente, a lo largo de todo el proceso de conformado. Aquí se puede observar, que la tensión máxima comienza siendo positiva ya que el punzón se encuentra cercano punto en estudio. Con respecto a la tensión media se observa un valor oscilando siempre con respecto a cero y la tensión mínima es negativa ya que existe en todo momento una tendencia a la reducción de espesor durante el proceso. Y finalmente la tensión hidrostática resultante que ya se comentó anteriormente.

A continuación se representan las mismas cuatro gráficas pero en una probeta con una pestaña de mayor longitud (30 mm).

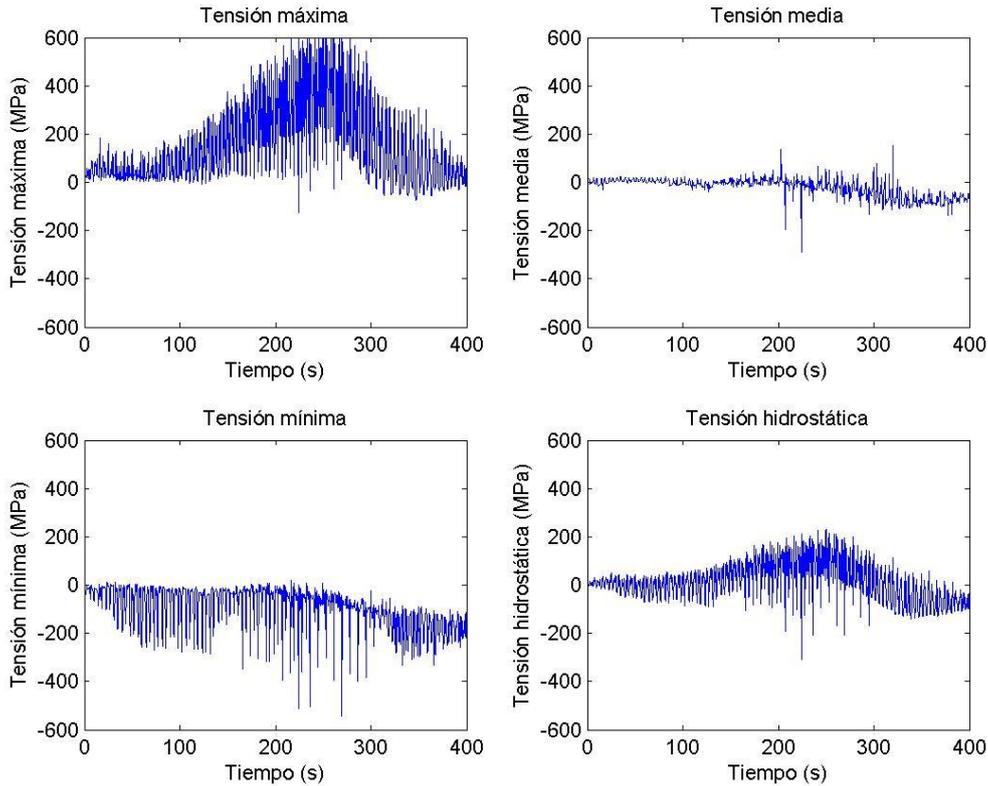


Figura 4.34- Tensión principal máxima, media, mínima e hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Stretch R50H30-T

Aquí a diferencia de la anterior la tensión máxima se hace notable más tarde ya que tarda más en pasar el punzón por el punto seleccionado. Con respecto a la tensión media estamos al igual que con el ensayo de pestañas más corta, en la que oscila en torno a cero y la tensión mínima es ligeramente negativa, no tanto como en el otro ensayo. Finalmente, se obtiene una tensión hidrostática de una forma similar a la anterior, aunque se puede ver que tarda más tiempo en alcanzar la zona de máxima tracción debido al efecto de la tensión máxima.

A continuación, se va a proceder a estudiar las tensiones hidrostáticas pero en un ensayo de Shrink, que como podemos observar se produce el mismo efecto que el comentado anteriormente en ensayos de Stretch.

El punto que se ha seleccionado es similar al anterior, en la parte inferior de la pestaña y sobre la zona central de la curva.

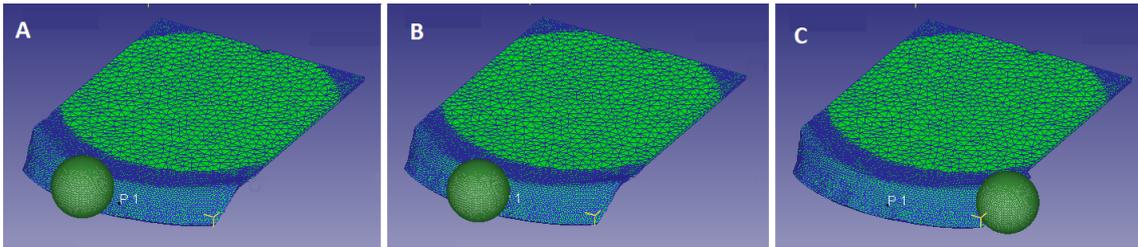


Figura 4.35-Captura de un instante de tiempo durante el proceso de conformado de una chapa de Shrink

En la imagen anterior se observa el proceso bastante avanzado, cuando la pestaña ha bajado una altura considerable. Y en la siguiente gráfica se observa el instante de tiempo en el que se ha producido.

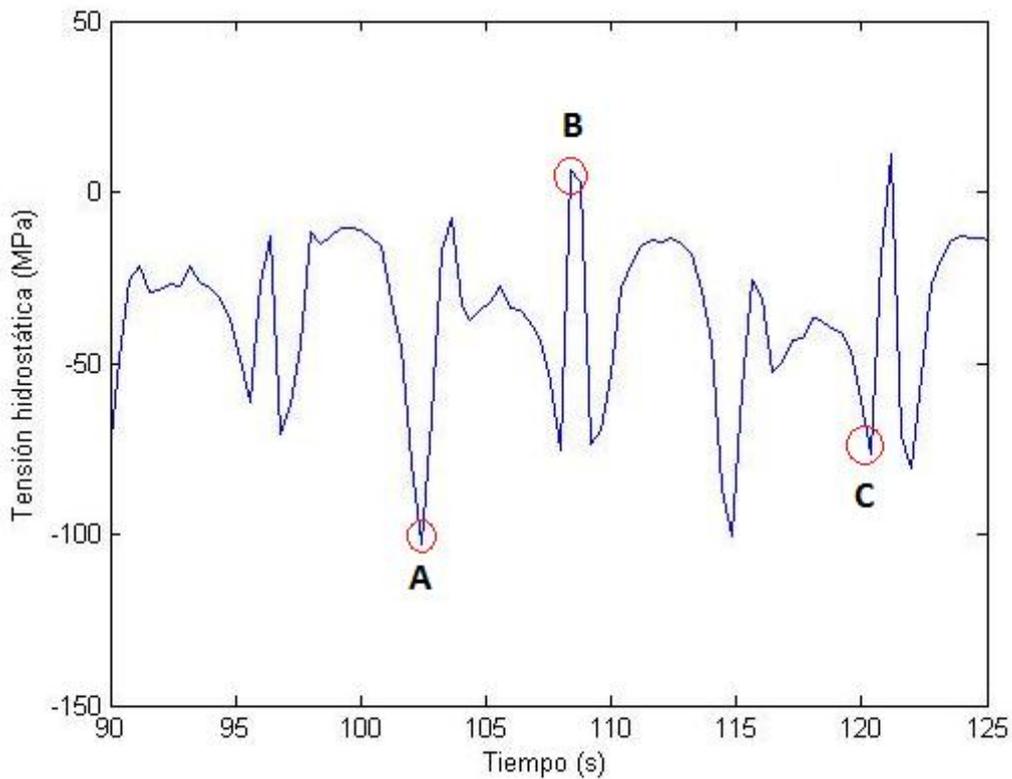


Figura 4.36- Tensión hidrostática en un intervalo de tiempo en un ensayo de Shrink

Que como podemos ver igual que ocurría con la otra chapa, se producen picos de tensión en aquellos instantes de tiempo en los que el punzón pasa por encima del punto seleccionado. Y a continuación, se ha representado la tensión hidrostática a lo largo de todo el proceso de deformación.

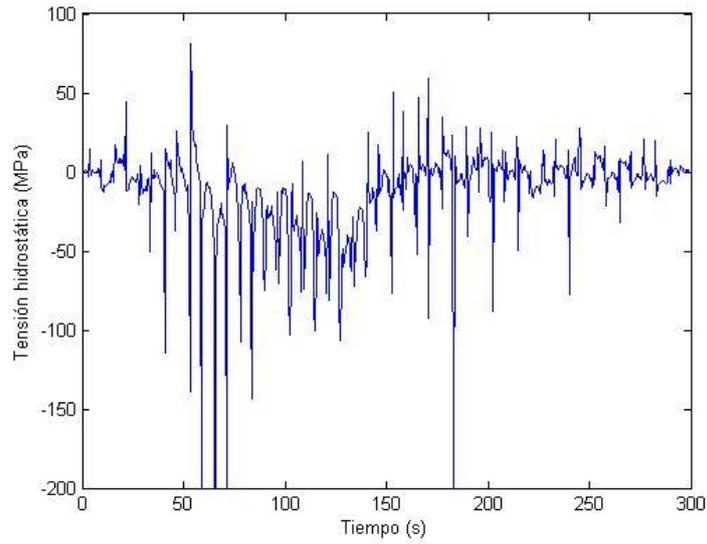


Figura 4.37- Tensión hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Shrink

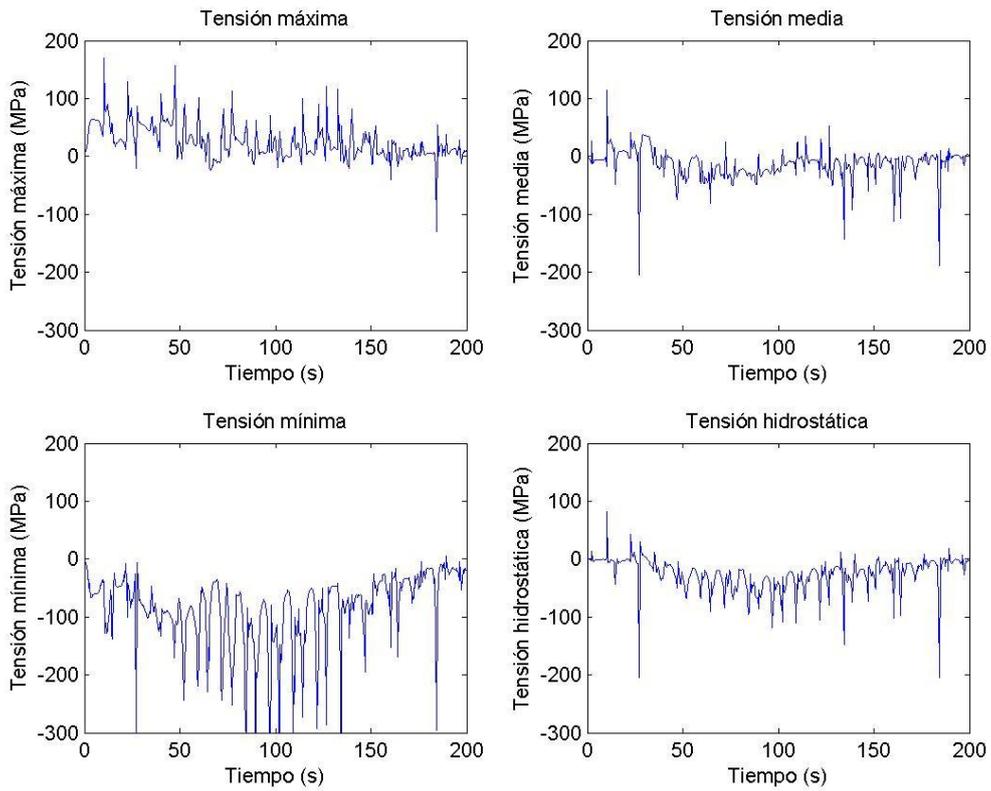


Figura 4.38- Tensión principal máxima, media, mínima e hidrostática a lo largo de todo el tiempo en un ensayo de Shrink R50H12-C

Al igual que con los ensayos de Stretch, se representan la tensión máxima, media y mínima principal junto con la hidrostática en un punto cercano al elegido anteriormente para los ensayos de Shrink. Aquí se puede observar que la tensión máxima comienza siendo positiva ya que el punzón se encuentra cercano al borde de la chapa, al igual que el punto que se ha seleccionado. Con respecto a la tensión media se observa un valor oscilando siempre con respecto al cero. La tensión mínima es negativa notablemente durante la mayor parte del proceso, de aquí que la tensión hidrostática presente esas tensiones de compresión diferenciándolas de las obtenidas en los ensayos de Stretch.

A continuación, se van a representar para un ensayo cualquiera la distribución de presiones hidrostáticas en el espesor cuando el punzón está incidiendo en el punto representado.

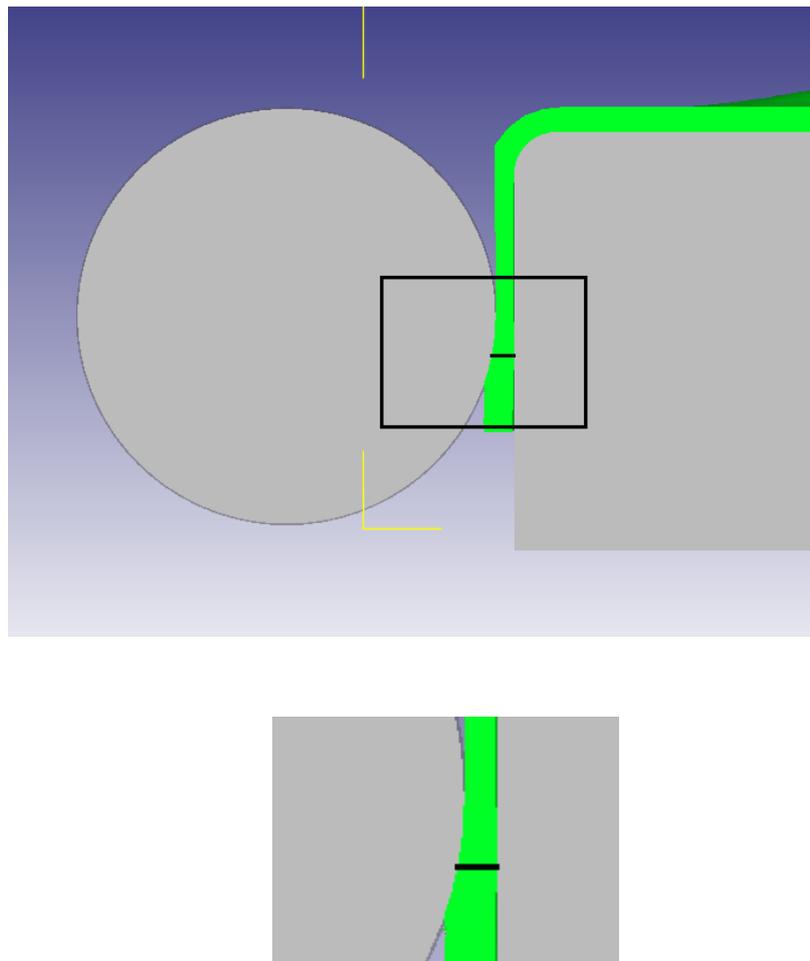


Figura 4.39- Selección de un punto para la representación de la tensión hidrostática en el espesor

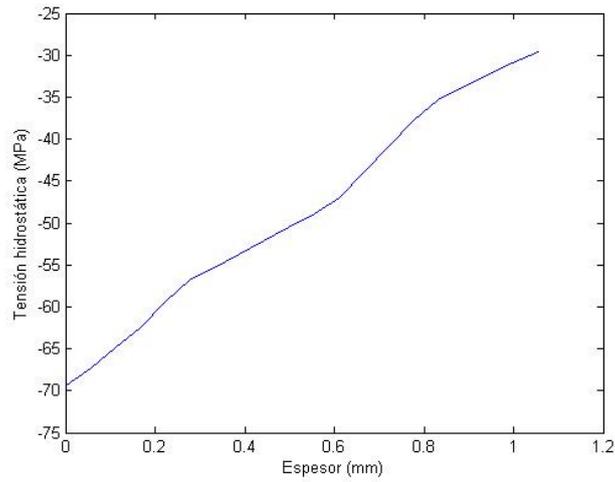


Figura 4.40- Representación de la *tensión hidrostática creada durante el contacto punzón-chapa en un punto.*

Como se observa, la tensión es menor en la cara interior de la chapa y crece linealmente hasta alcanzar un máximo en la cara exterior de ésta. Fang et al. (2014) realizó un estudio sobre ello obteniendo la siguiente evolución a través del espesor:

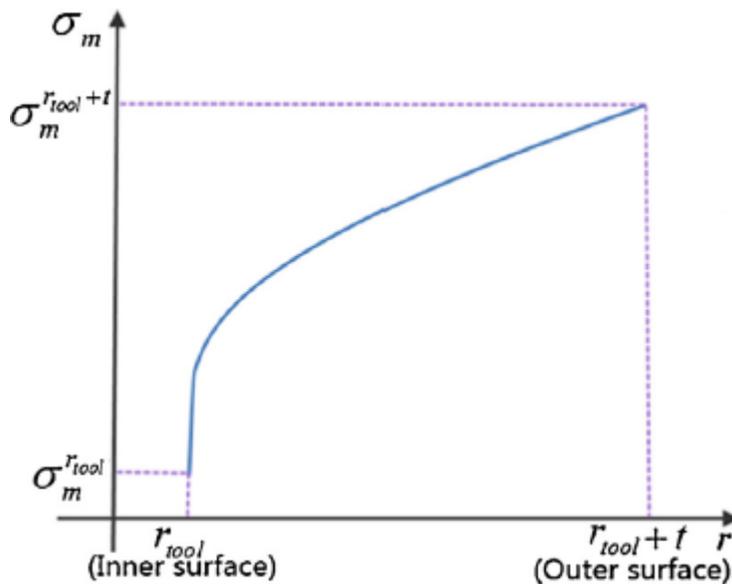


Figura 4.41- Evolución de la presión hidrostática en el espesor (Fang et al. (2014))

Como se puede ver, los resultados obtenidos numéricamente se asemejan a los obtenidos experimentalmente, siendo la tensión hidrostática en la cara interior menor que en la exterior. Esto se debe a que en la cara exterior no tenemos tensión en la

dirección 3 (σ_3), y en la cara interior esta tensión es negativa, por tanto, al sustituir en la ecuación descrita al principio de este subcapítulo la tensión es menor en la cara interior que en la exterior.

Capítulo 5

Conclusiones y desarrollos futuros

5.1. Conclusiones

En este proyecto se ha conseguido simular distintos flancos con radios de 15 y 50 mm y pestañas de 12 y 30 mm tanto de Stretch como de Shrink mediante un programa de elementos finitos. Una vez simulados, se han obtenido resultados con la finalidad de obtener unas hipótesis iniciales y poder ser contrastadas con resultados que se obtengan tras la simulación de ensayos experimentales. Los resultados obtenidos han sido de fuerzas, tensiones hidrostáticas, deformaciones en flanco y bordes entre otros.

Se han llegado a varias hipótesis en el campo de fuerzas. Las fuerzas son mayores en ensayos con mayor longitud de pestaña, al igual que ocurre al aumentar el radio, que la fuerza ejercida por el punzón es mayor tanto para ensayos de Stretch como de Shrink.

Para ensayos con chapas de mayor espesor, las fuerzas aumentan considerablemente si comparamos los obtenidos con 1,2 y 1,6 mm. Y finalmente, se puede ver que las fuerzas obtenidas en un ensayo de Shrink frente a uno de Stretch, las fuerzas son ligeramente mayores en Stretch.

En los resultados del apartado de FLD's podemos decir que en todos los ensayos los puntos de la pestaña se encuentran situados cerca de deformación plana, exceptuando algunos puntos que se sitúan en la zona biaxial. En los ensayos de Shrink a mayor longitud de pestaña las deformaciones principales máximas alcanzadas son menores, mientras que si el radio disminuye éstas aumentan. Con respecto a los ensayos de Stretch las deformaciones principales máximas aumentan al disminuir la longitud del flanco y con respecto a la variación de radio no presenta ningún cambio en las deformaciones.

Las deformaciones producidas en los bordes son mayores en los ensayos de Stretch rondando el 15% de deformación, mientras que en ensayos de Shrink las deformaciones han sido menores situándose en torno a un 4%.

También se han estudiado dos fenómenos producidos en las chapas que son los bulges y las roturas o craks. Los bulges que se han obtenido en ensayos de Shrink, son mayores conforme la longitud de pestaña aumenta, esto ha ocurrido tanto en ensayos con espesor de 1,6 mm como de 1,2 mm mientras que en las probetas de Stretch éste fenómeno no se ha apreciado prácticamente y por tanto podría considerarse nulo. Con respecto a las roturas, solo se ha producido en ensayos de Stretch como indicaba uno de los autores que ha realizado ensayos convencionales de este tipo de chapas.

Otra de los resultados que se han obtenido han sido las tensiones principales máximas, medias, mínimas e hidrostáticas que se han generado en los distintos ensayos. Aquí se ha observado que en los ensayos de Stretch se han producido tensiones hidrostáticas de tracción durante un periodo de tiempo del proceso, mientras que en los ensayos de Shrink éstas tensiones se han situado en la parte positiva del diagrama y por tanto, estaríamos hablando de tensiones de tracción.

Finalmente se ha medido la recuperación elástica producida en el ensayo R50H12-T, con el fin de contrastarlo con el que se va a realizar próximamente. Se ha obtenido una recuperación elástica de aproximadamente 7° en la pestaña una vez el punzón se ha retirado.

5.2. Desarrollos futuros

Como desarrollo futuro se procederá a la realización del ensayo experimental con el fin de comparar con los resultados que se han obtenido numéricamente, así como la simulación de flancos con mayor variedad de radios y longitudes de pestaña.

También se puede proceder a realizar los distintos ensayos con otros programas de elementos finitos, con el fin de contrastar los resultados con los obtenidos en este proyecto.

Otra tarea es la simulación tanto experimental como numérica de otro tipo de ensayos de flancos, pero con un escalón o esquina para poder ver la calidad de los resultados. Otra tipología que podría ser estudiada sería una pestaña en la cual tengamos curvas tanto de Stretch como de Shrink.

6. Bibliografía

Andrés Jesús Martínez Donaire. *Análisis del efecto del gradiente de deformaciones en el conformado de Chapa Metálica*. 1-34(2012)

David Palomo Vázquez. *Simulación numérica de pirámides truncadas de chapa mediante conformado incremental*. (2014).

G. Centeno, C. Vallellano, J. Vázquez, D. Morales, A. J. Martínez- Donaire, and F. J. García-Lomas. *Numerical analysis of the deformation mechanisms in incremental forming of AA2024-T3 sheets*. (2012).

GhulamHussain, Gao Lin and Nasir Hayat. *A new parameter and its effect on the formability in single point incremental forming: A fundamental investigation*. Journal of Mechanical Science and Technology, 1617-1621 (2010).

Holger Voswinckel & Markus Bambach & Gerhard Hirt. *Improving geometrical accuracy for flanging by incremental sheet metal forming*. (2014)

Lei Chen, Huiqin Chen, Qiaoyi Wang, Zhihua Li. *Studies on wrinkling and control method in rubber forming using aluminium sheet shrink flanging process*. (2014).

Markus Bambach, Holger Voswinckel, Gerhard Hirt. *A new process design for performing hole-flanging operations by incremental sheet forming* (2014).

M. Borrego, D. Morales-Palma,*, A. J. Martínez-Donaire, G. Centeno, C. Vallellano. *On the study of the single-stage hole-flanging process by SPIF*. (2015).

Tong Wen, Suo Zhang, Jie Zheng, Qian Huang, Qing Liu. *Bi-directional dieless incremental flanging of sheet metals using a bartool with tapered shoulders*. (2015).

W.C. Emmens, A.H. van den Boogaard. *An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming* (2008).

Y. Fang, B. Lu, J. Chen, D.K. Xu, H. Ou. *Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming*. Journal of Materials Processing Technology. (2013)

Zhaobing Liu, Yanle Li, and Paul Anthony Meehan. *Experimental Investigation of Mechanical Properties, Formability and Force Measurement for AA7075-O Aluminum Alloy Sheets Formed by Incremental Forming* (2013).

