

Trabajo Fin de Máster Máster en Ingeniería Aeronáutica

Análisis numérico del rebordeado de chapas de uso aeronáutico mediante conformado con goma de poliuretano

Autor: Rosana Correro Sojo

Tutor: Domingo Morales Palma

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

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Análisis numérico del rebordeado de chapas de uso aeronáutico mediante conformado con goma de poliuretano

Autor:

Rosana Correro Sojo

Tutor:

Domingo Morales Palma

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

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Máster: Análisis numérico del rebordeado de chapas de uso aeronáutico mediante conformado con goma de poliuretano

Autor: Rosana Carrero Sojo
Tutor: Domingo Morales Palma

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

*A todas las personas que han caminado junto a mí en estos años.
A mis maestros, por haberme hecho crecer.
A mi tutor, por guiarme en cada paso.
A mis padres, por su apoyo incondicional y su lucha diaria para que esto sea posible.
A mi hermana, por su paciencia infinita y por ser mi mayor maestra.
A mis abuelos, por acompañarme en todas mis aventuras.
A mis amigos, por alegrarse de cada uno de mis logros.
A los que ya no están, por darme fuerza siempre.
A mí misma, por no desistir nunca.*

Desde lo más profundo de mi corazón, a todos ellos, gracias.

*Rosana Correro Sojo
Sevilla, 2023*

Resumen

Actualmente, la técnica del rebordeado se utiliza de manera extendida en las industrias automotriz y aeroespacial con el propósito de agregar resistencia o brindar soporte en la unión de piezas de chapa metálica. Por tanto, es necesario llevar a cabo estudios exhaustivos para determinar la respuesta del material ante estos procesos de fabricación, lo que permite mantener un estricto control sobre posibles fallos. Siguiendo esta línea de investigación, este Trabajo se centrará en un estudio numérico para optimizar la conformabilidad de chapas de aleación de aluminio mediante el conformado con poliuretano. Se analizarán diferentes modelos realizados mediante un software de elementos finitos, determinando la relevancia de la geometría en el tipo de fallo y la viabilidad del proceso de fabricación.

Abstract

Currently, flanging technique is widely used in the automotive and aerospace industries to add strength or provide support in joining sheet metal pieces. Therefore, it is necessary to conduct comprehensive studies to determine the material's response to these manufacturing processes, allowing for strict control over potential failures. In line with this research direction, this project will focus on a numerical study to optimize the formability of aluminum alloy sheets through polyurethane forming. Different models will be analyzed using finite element analysis software, determining the relevance of geometry in the type of failure and the feasibility of the manufacturing process.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Contexto del proyecto	1
1.2 Objetivo del proyecto	2
1.3 Estructura del documento	2
2 Antecedentes del rebordeado de chapa metálica	5
2.1 Conformado de chapa metálica	5
2.2 Inestabilidad y fallo en el conformado de chapa metálica	10
2.3 Estudios del área IPF sobre el rebordeado de chapa metálica	14
3 Modelado del rebordeado con bloques de poliuretano	25
3.1 Geometría del problema	25
3.2 Ley de comportamiento de los materiales	28
3.3 Contactos	31
3.4 Condiciones de contorno	33
3.5 Mallado	34
4 Simulaciones preliminares con Abaqus/Standard	37
4.1 Rebordeado con presión uniforme	37
4.2 Rebordeado con cojín de goma	40
4.3 Rebordeado con útil adicional de goma y prensachapas	42
4.4 Rebordeado con geometría alternativa	44
4.5 Resumen de resultados	47
5 Simulaciones con Abaqus/Explicit	49
5.1 Integración implícita y explícita	49
5.2 Rebordeado interior con cojín y útil de goma	50
5.3 Resumen de resultados	59
6 Conclusiones y líneas futuras de trabajo	61

<i>Índice de Figuras</i>	63
<i>Índice de Tablas</i>	67
<i>Bibliografía</i>	69

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Contexto del proyecto	1
1.2 Objetivo del proyecto	2
1.3 Estructura del documento	2
2 Antecedentes del rebordeado de chapa metálica	5
2.1 Conformado de chapa metálica	5
2.1.1 Plegado	5
2.1.2 Estirado	7
2.1.3 Estampación	7
2.1.4 Embutición	7
2.1.5 Rebordeado	8
2.1.6 Conformado incremental	9
2.2 Inestabilidad y fallo en el conformado de chapa metálica	10
2.2.1 Estricción localizada	12
2.2.2 Fractura dúctil	12
2.2.3 Arrugamiento	13
2.2.4 Diagramas límite de conformado	14
2.3 Estudios del área IPF sobre el rebordeado de chapa metálica	14
2.3.1 Rebordeado de agujero circular	15
Rebordeado convencional con punzón	16
Rebordeado mediante SPIF	17
2.3.2 Rebordeado de bordes abiertos cóncavos y convexos	19
2.3.3 Rebordeado de bordes cerrados cóncavos y convexos	22
3 Modelado del rebordeado con bloques de poliuretano	25
3.1 Geometría del problema	25
3.2 Ley de comportamiento de los materiales	28
3.2.1 Comportamiento de chapa de AA7075-O	28
3.2.2 Modelo hiperelástico de Mooney-Rivlin	29
3.3 Contactos	31
3.4 Condiciones de contorno	33

3.5	Mallado	34
4	Simulaciones preliminares con Abaqus/Standard	37
4.1	Rebordeado con presión uniforme	37
4.2	Rebordeado con cojín de goma	40
4.3	Rebordeado con útil adicional de goma y prensachapas	42
4.4	Rebordeado con geometría alternativa	44
4.5	Resumen de resultados	47
5	Simulaciones con Abaqus/Explicit	49
5.1	Integración implícita y explícita	49
5.2	Rebordeado interior con cojín y útil de goma	50
5.2.1	Caso 1: fallo por arrugamiento	50
5.2.2	Caso 2: fallo por estricción	55
5.3	Resumen de resultados	59
6	Conclusiones y líneas futuras de trabajo	61
	<i>Índice de Figuras</i>	63
	<i>Índice de Tablas</i>	67
	<i>Bibliografía</i>	69

1 Introducción

En este capítulo se presenta el contexto del proyecto, los objetivos del mismo y una breve descripción de la estructura de esta memoria.

1.1 Contexto del proyecto

En la actualidad, el proceso de rebordeado es ampliamente utilizado en las industrias automotriz y aeronáutica para añadir rigidez o proporcionar un soporte de ensamblaje en piezas de chapa metálica. Por este motivo, es imprescindible realizar estudios exhaustivos para determinar el comportamiento del material ante estos procesos de fabricación, permitiendo un alto control sobre el fallo del mismo.

El rebordeado convencional utilizado frecuentemente en la industria aeronáutica se realiza especialmente mediante conformado con herramientas elásticas (caucho o poliuretano) o hidroconformado. Sin embargo, estos procesos se encuentran limitados por restricciones severas en la geometría de la pestaña, habitualmente caracterizada por la relación de longitud inicial de la pestaña frente al radio de curvatura (l_0/R). Esto ha sido motivo de estudio para muchos autores, aumentando el interés de los científicos y técnicos por comprender los parámetros geométricos, materiales y de proceso que limitan la conformabilidad de la pestaña en la práctica industrial [1].

El grupo de investigación IPF (área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Sevilla) va a realizar un proyecto de investigación durante los próximos años enmarcado en la línea de investigación *Diseño, simulación y optimización de procesos de conformado plástico convencional e incremental de chapa*. El título de dicho proyecto es: *caracterización experimental y numérica de la conformabilidad del rebordeado convencional e incremental de aleaciones de aluminio aeronáuticas durante el envejecimiento natural*. En el proyecto se pretende caracterizar el comportamiento de chapas metálicas en procesos de rebordeado con el objetivo de desarrollar un estudio sistemático, experimental y numérico para optimizar la conformabilidad de chapas de aleación de aluminio mediante el conformado con poliuretano y el conformado incremental durante el envejecimiento natural del material.

Una de las primeras tareas consiste en evaluar el diseño de una probeta para el rebordeado con placas de poliuretano con la tecnología de conformado incremental SPIF (Single-Point Incremental Forming), mediante análisis con elementos finitos. El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster consiste en contribuir a la realización de esta tarea. Tras ello, se procederá al diseño y fabricación de herramientas para hacer ensayos experimentales, quedando esto último fuera del

alcance de este Trabajo.

1.2 Objetivo del proyecto

El principal objetivo de este Trabajo consiste en evaluar el diseño de una probeta para el rebordeado con placas de poliuretano mediante análisis con elementos finitos. La probeta consiste en un perfil cerrado en forma de trébol, con tres pestañas comprimidas y tres pestañas traccionadas (para más detalle véase el apartado 2.3.3). De esta forma, se pretende estudiar en una sola probeta hasta seis posibles zonas de fallo por arrugamiento (en pestañas comprimidas) o por estricción localizada y fractura dúctil (en pestañas traccionadas). El material de la probeta es una aleación de aluminio 7075-O de 1,6 mm de espesor.

El análisis se realizará con el paquete comercial SIMULIA/Abaqus 2020, realizándose una serie de simulaciones con diferentes parámetros de la geometría, observando la geometría final alcanzada tras la operación y la aparición o no del fallo del material. A su vez, se estudiará la viabilidad del proyecto, calculando la fuerza necesaria para conseguir la geometría final deseada.

Para ello se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Análisis de deformaciones plásticas y estudio del fallo por arrugamiento en pestañas comprimidas.
- Análisis de deformaciones plásticas y estudio del fallo por estricción localizada y fractura dúctil en pestañas traccionadas.
- Análisis de deformaciones plásticas y estudio de ambos tipos de fallo en una probeta con una geometría alternativa: con la misma forma de trébol pero con la pestaña interior en lugar de exterior (para más detalle véase el apartado 2.3.3).
- Viabilidad de la realización de ensayos experimentales a partir de los resultados de las simulaciones.

1.3 Estructura del documento

El capítulo 2 presenta los antecedentes del rebordeado de chapa metálica, centrándose en el proceso de conformado, así como en la inestabilidad y fallo en el mismo. Además, se hará una recopilación de diferentes estudios del área IPF sobre dicho proceso.

En el capítulo 3 se describe el modelado del problema con bloques de poliuretano, centrándose en la geometría empleada, así como en los modelos de comportamiento de los diferentes materiales, contactos entre distintas piezas del modelo, condiciones de contorno y mallado del mismo.

A continuación, se presentarán las primeras simulaciones realizadas con Abaqus/Standard con sus respectivos resultados, así como los problemas encontrados en cada uno de ellos que hacen necesario el rediseño del problema. Asimismo se presentará el diseño de una geometría alternativa.

Seguidamente, se presentará el modelado del problema con Abaqus/Explicit, incluyendo dos estudios para diferentes geometrías. Se analizará el tipo de fallo producido y la viabilidad de su fabricación.

En último lugar, se expondrán las conclusiones obtenidas a lo largo de la realización del Trabajo, así como líneas futuras de trabajo para continuar con la investigación.

2 Antecedentes del rebordeado de chapa metálica

El objetivo de este capítulo es presentar los procesos de fabricación sobre los que se basará el proyecto realizado. Para ello, se va a comenzar con una introducción al conformado de chapa metálica y a la inestabilidad y fallo en ella. Por último, se presentarán una serie de estudios sobre el rebordeado de las mismas.

2.1 Conformado de chapa metálica

El conformado de chapa incluye aquellos procesos de fabricación en los que a una lámina de material en bruto se le imprime una geometría permanente. Esto se consigue, en la mayoría de procesos, a través del contacto directo con las herramientas y matrices. Aunque comúnmente se realizan en frío, a veces pueden realizarse operaciones en caliente, elevando la temperatura del material para así disminuir la resistencia a la deformación del mismo, reduciendo la fuerza a emplear.

La ventaja principal que presentan las piezas producidas mediante conformado de chapa metálica es su alta relación resistencia/peso. Esto, junto con las buenas tolerancias geométricas y superficiales conseguidas, lo convierte en un proceso de fabricación frecuente en la industria aeronáutica y automotriz, especialmente para la fabricación de componentes estructurales. En estos procesos se consiguen piezas prácticamente terminadas en un corto periodo de tiempo y en una sola carrera de la prensa.

Algunos ejemplos de productos fabricados en conformado de chapa son carrocerías, elementos de construcción, fuselajes de aviones, recubrimientos para electrodomésticos y envases de conservas y bebidas. La Figura 2.1 muestra algunos de estos productos [2].

En el conformado de chapa se incluye una gran variedad de procesos, entre los que destacan las operaciones de plegado, estirado, estampación, embutición y rebordeado, todos ellos con unos principios básicos comunes. A continuación, se explicará cada uno de estos procesos. Finalmente, se explicará el proceso de conformado incremental de chapas.

2.1.1 Plegado

Existen varios tipos de plegado o doblado de chapas. El más sencillo consiste en el plegado a lo largo de una línea recta (ver Figura 2.2 (a)), aunque pueden realizarse también plegados a través de

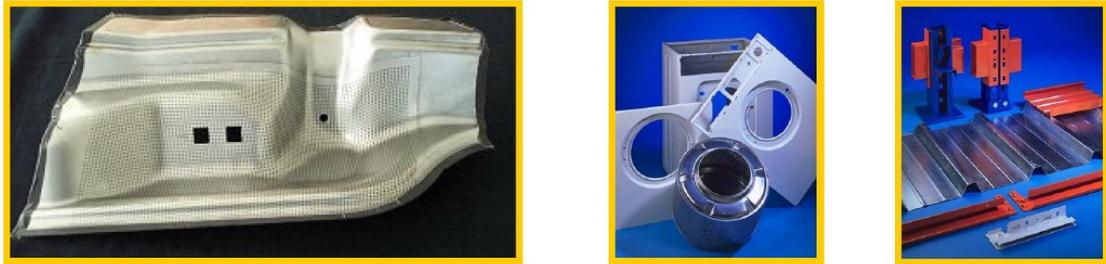


Figura 2.1 Ejemplos de productos fabricados en conformado de chapa.

directrices curvas. Estas operaciones pueden realizarse de diferentes formas, entre las que destacan el plegado en V (Figura 2.2 (b)), empleando una matriz con dicha geometría y un punzón para obligar al material a entrar en esa cavidad; el plegado en voladizo (Figura 2.2 (c)), donde la chapa es sujeta por un extremo a través de un prensachapas y en el otro es empujada por un punzón; y el conformado con rodillos, que se trata de un proceso no estacionario para el doblado progresivo de perfiles (Figura 2.2 (d)).

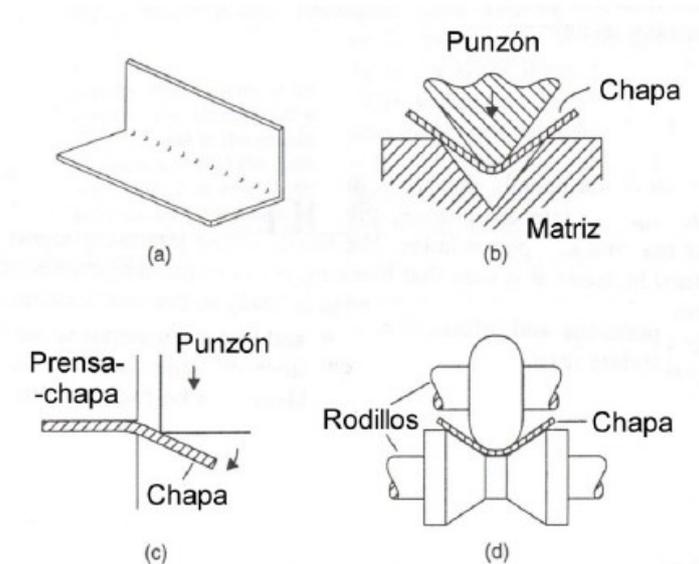


Figura 2.2 Procesos de doblado de chapa: (a) chapa plegada a lo largo de línea recta; (b) plegado en V; (c) plegado en voladizo; (d) plegado de perfiles con rodillos [3].

Las láminas sometidas a flexión pura presentan esfuerzos de tracción en la cara exterior y esfuerzos de compresión en la cara interior, siendo el eje neutro la línea teórica que no está sometida ni a tensión ni a compresión [1]. En el caso de que el plegado se realice a través de una línea recta, la deformación plástica se concentra a lo largo de dicho tramo, permaneciendo el resto de la lámina indeformada.

Uno de los inconvenientes de este proceso consiste en la dificultad para obtener una gran precisión en el ángulo de plegado final debido al fenómeno de recuperación elástica como consecuencia del comportamiento elástico del material. Además, pueden aparecer grietas en la superficie externa doblada en el caso de que el material no sea lo suficientemente dúctil [3].

El uso de matrices en el doblado en U y en V tiene como objetivo reducir dicha recuperación

elástica. A su vez, la flexión rotativa es también empleada para reducir dicho fenómeno, así como para producir ángulos de flexión superiores a 90 grados [1].

2.1.2 Estirado

En este proceso, la chapa es sujeta por prensachapas o mordazas en sus extremos, a la vez que un punzón aplica presión a lo largo de su superficie, encontrándose así en estado de tracción. Una de las ventajas de esta operación es que disminuye el fenómeno de recuperación elástica, aumentando la precisión final obtenida. Este proceso de conformado es altamente empleado en la fabricación aeronáutica para los fuselajes de las distintas aeronaves [3].

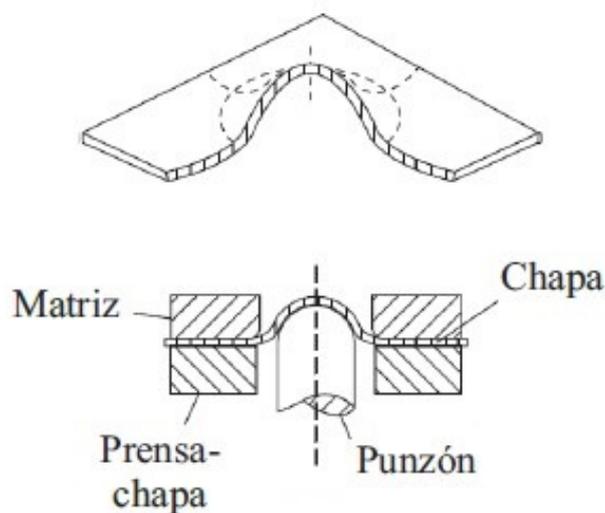


Figura 2.3 Proceso de conformado de chapa por estirado [3].

2.1.3 Estampación

El proceso de conformado por estampación es muy similar al de estirado. La diferencia radica en que en el proceso de estampación sí se permite que el material que queda bajo las mordazas pueda introducirse en la cavidad de la matriz, permitiendo fabricar piezas mucho más complejas que con el proceso explicado anteriormente. Esta operación es empleada con frecuencia en la industria del automóvil y del electrodoméstico [3].

2.1.4 Embutición

Uno de los grandes inconvenientes del proceso de conformado por estampación radica en que no pueden fabricarse piezas demasiado profundas sin provocar el fallo del material. Para ello, es necesario que el material se desplace por el hueco de la matriz más fácilmente. Por ello se emplea el proceso de conformado por embutición, donde la deformación se produce fundamentalmente en las paredes de la pieza. Para la obtención de piezas todavía más profundas se emplea una embutición en varias etapas o proceso de re-embutición.

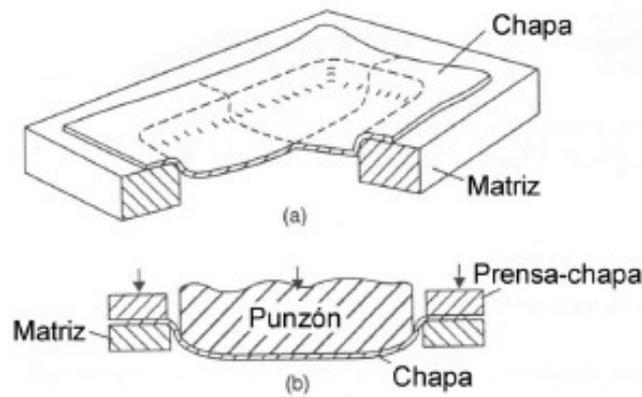


Figura 2.4 Proceso de conformado de chapa por estampación [3].

En esta operación, el prensachapas además es el encargado de regular la cantidad de material que fluye hacia el hueco de la matriz, de forma que se evite el arrugamiento de la chapa en la zona de la brida debido a los esfuerzos circunferenciales de compresión generados en la zona [3].

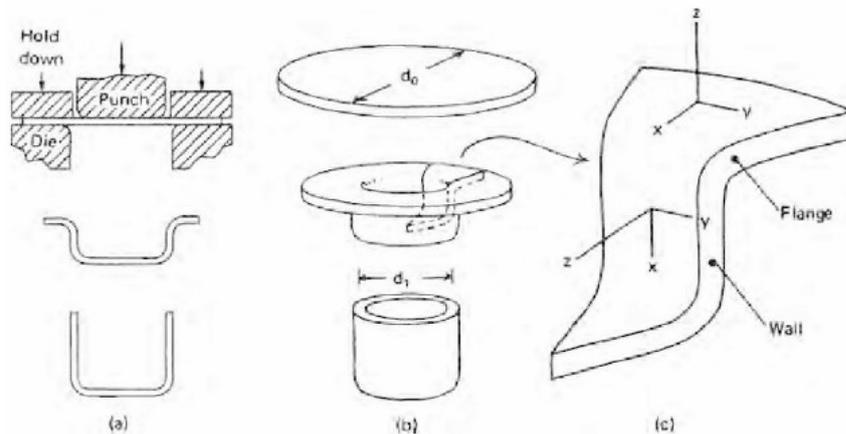


Figura 2.5 Proceso de conformado por embutición [2].

2.1.5 Rebordeado

El proceso de rebordeado también está ampliamente implantado en las industrias automotriz y aeronáutica. Estas operaciones consisten en doblar, normalmente a 90° , el perímetro de la pieza siguiendo una línea determinada. En estos procesos, se pueden distinguir tres tipos elementales de pestañas: pestaña recta (Figura 2.6 (a)), cóncava (Figura 2.6 (b)) o convexa (Figura 2.6 (e)). También son comunes en la práctica diferentes combinaciones de estas pestañas elementales (Figura 2.6 (c, d y f)) [4].

La principal diferencia con una operación de plegado es la curvatura de la matriz sobre la que se pliega la chapa. Las aplicaciones más comunes tienen el propósito de agregar rigidez, aumentar la resistencia o simplemente dar un borde suave a un componente [1].

Si el pliegue no es recto o la chapa no es plana, se produce deformación plástica no sólo en el pliegue, sino también en la chapa contigua. En el rebordeo por contracción (Figura 2.7 (a)), el borde se acorta, sometiéndose así a compresión, y el rebordeo puede pandearse, apareciendo arrugamiento.

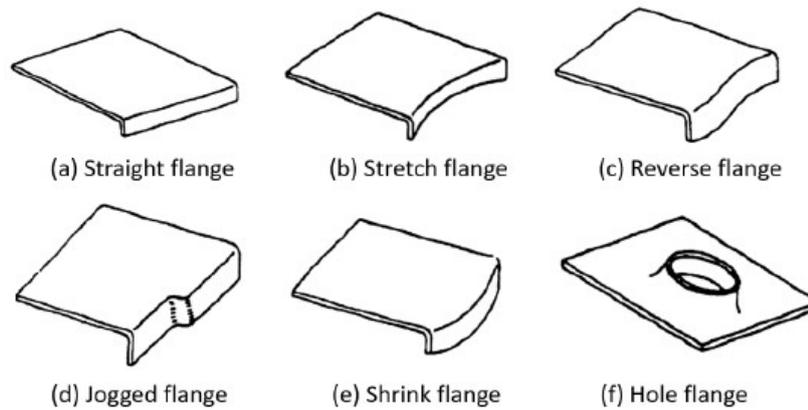


Figura 2.6 Tipos de pestañas en el conformado de chapa por rebordeado [1].

En el caso en que esté sometido a tracción (Figura 2.7 b), la longitud del borde debe aumentar y la fractura podría ser un problema [3].

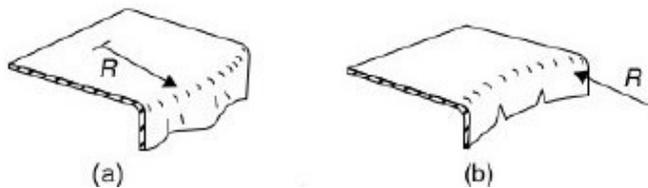


Figura 2.7 Procesos de doblado de chapa con directriz curva: (a) pestaña a compresión; (b) pestaña a tracción.

La Figura 2.8 muestra algunos ejemplos típicos de piezas aeronáuticas rebordeadas.



Figura 2.8 Piezas aeronáuticas típicas fabricadas por rebordeado [2].

2.1.6 Conformado incremental

Los procesos de conformado incremental de chapas consisten en la deformación progresiva e incremental de una pieza. Esto provoca que la superficie de contacto entre la herramienta y la pieza

sea reducida, provocando unas tensiones muy localizadas. Aunque este proceso ha sido menos empleado en la fabricación que los procesos convencionales, en las últimas décadas han asumido un gran papel debido a la búsqueda del ahorro en los costos de las herramientas y de tecnologías más flexibles. A su vez, este crecimiento se ha visto potenciado por el desarrollo de las máquinas de control numérico computerizado (CNC) y de las herramientas CAD/CAM.

Un caso particular de este tipo de proceso es el conformado incremental de un solo punto (SPIF, Single-Point Incremental Forming). En él, se sujeta la chapa por su perímetro a la vez que una herramienta describe trayectorias programadas, como se muestra en la Figura 2.9. La herramienta va deformando plásticamente el material de forma incremental hasta obtener la pieza final deseada. [1]

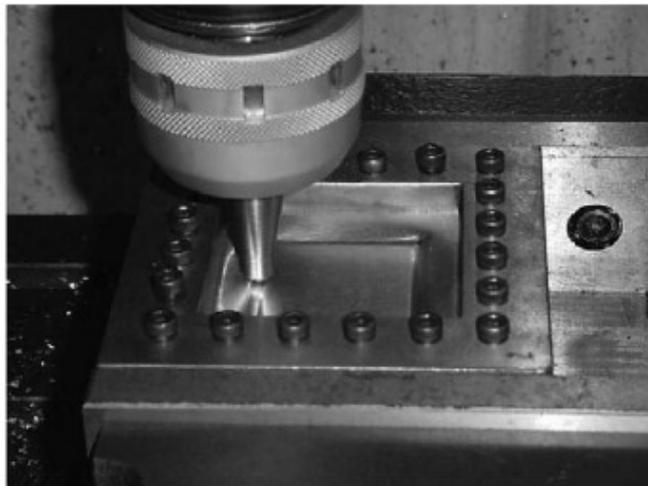


Figura 2.9 Ejemplo de proceso de conformado incremental de un solo punto (SPIF) [1].

La gran ventaja de este tipo de operación radica en las geometrías complejas que es capaz de alcanzar. Además permite la fabricación de piezas personalizadas o producciones en lotes pequeños. La Figura 2.10 muestra algunos ejemplos de piezas fabricadas con geometrías diversas [1].

2.2 Inestabilidad y fallo en el conformado de chapa metálica

El límite de los procesos de conformado está determinado por el fallo del material. Para evitar esto, es preciso incluir cambios o en el proceso de conformado o en el propio material, para lo que es necesario un estudio exhaustivo sobre la predicción del fallo. De esta forma se podrá optimizar el proceso, reduciendo los costes del mismo.

Para evaluar la conformabilidad del material se pueden realizar diferentes tipos de ensayos siguiendo el procedimiento propuesto en la normativa ISO 12004 (2008). Siguiendo dicha norma, durante el ensayo se deberán tomar medidas de la deformación principal máxima a lo largo de secciones predefinidas perpendiculares a la zona de fallo. Dependiendo del procedimiento seguido, los ensayos se puede clasificar en ensayos en el plano y en ensayos fuera del plano.

El primero de ellos incluye el ensayo típico de tracción, el ensayo en deformación plana (con un ancho mayor para hacer desaparecer la contracción lateral) y el ensayo de Marciniak (sujetando una probeta por sus extramos con mordazas y deformándola con un punzón plano ejerciendo presión en una de sus caras, como se ilustra en la Figura 2.11). Por otro lado, entre los ensayos fuera del



Figura 2.10 Ejemplo de piezas de geometría compleja conseguidas con SPIF [1].

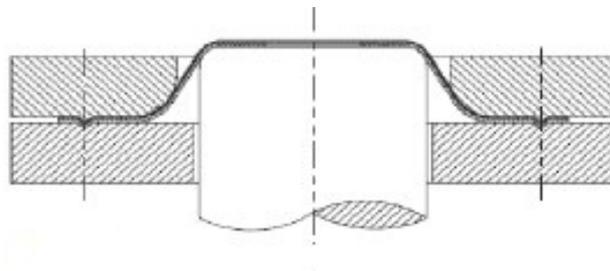


Figura 2.11 Esquema del ensayo de Marciniak [3].

plano destacan los ensayos de abombamiento hidráulico y el ensayo de Nakazima (análogo al de Marciniak pero con punzón semiesférico, representado en la Figura 2.12). La Figura 2.13 muestra una serie típica de probetas usadas en ensayos Nakazima para la obtención de los valores límite de fallo en diferentes condiciones de deformación [3].

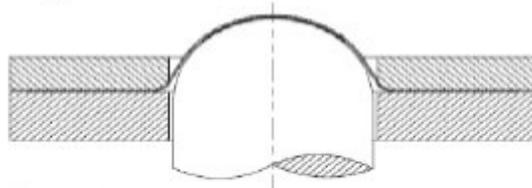


Figura 2.12 Esquema del ensayo de Nakazima [3].



Figura 2.13 Geometrías de probetas en ensayos Nakazima [3].

2.2.1 Estricción localizada

Hay ocasiones en la práctica, al realizar procesos de conformado de chapa, en las que la deformación del material se concentra en un tramo específico de la chapa del tamaño del espesor de la misma, mientras que el resto se encuentra prácticamente indeformada. Esto se conoce como estricción localizada. La aparición suele conducir rápidamente al desgarro (fractura dúctil) de la pieza. La Figura 2.14 muestra un componente de automóvil con un par de bandas de estricción localizada (teóricamente se formaron justo al terminar el proceso de estampado, dado que no se observa el habitual desgarro posterior) [3].



Figura 2.14 Estricciones localizadas encontradas durante la producción de piezas de automóviles [5].

Hill (1952) formuló su famoso criterio para predecir la estricción localizada en chapas de metal. Una formulación simplificada de este modelo establece que la estricción se inicia cuando la carga por unidad de ancho T_1 (N/mm) alcanza su máximo. Este no debe confundirse con el modelo de Swift (1952) para estricción "difusa", que establece que este modo de fallo aparece cuando la carga F_1 (N) alcanza su máximo [5].

2.2.2 Fractura dúctil

En la práctica pueden encontrarse dos tipos de fractura: fractura frágil y fractura dúctil, aunque la primera de ellas no es común en las chapas utilizadas para el conformado [5].

La fractura frágil se produce por una rápida aparición y propagación de grietas por clivaje en el material. Sin embargo, la fractura dúctil (Figura 2.15) aparece tras originarse grandes deformaciones plásticas. Esta última puede producirse por esfuerzo cortante, como se observa en la Figura 2.16 (a), o por la formación de huecos, posterior coalescencia de los mismos y propagación (formación de grietas), como se ve en la Figura 2.16 (b). Este último es el predominante en el conformado de chapa [3].

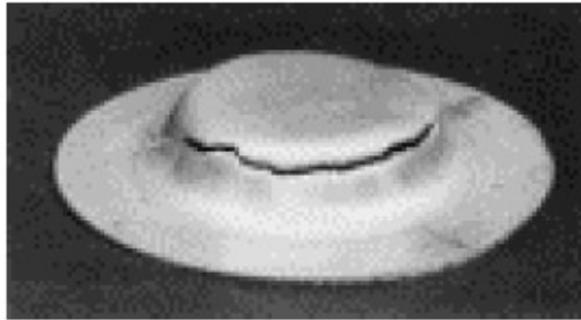


Figura 2.15 Ejemplo de grieta encontrada en una chapa conformada [5].

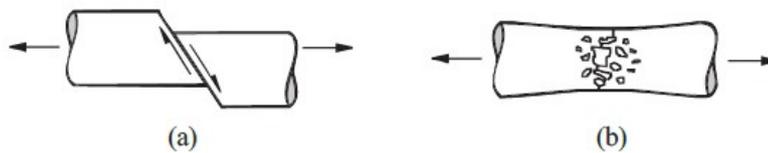


Figura 2.16 Modos de fractura dúctil: (a) por cortante; (b) por nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos en la microestructura [3].

2.2.3 Arrugamiento

Si una tensión principal en un elemento es de compresión, la lámina puede pandearse o arrugarse. Se trata de una inestabilidad compresiva y se asemeja al pandeo de una columna sometida a compresión longitudinal [5].

La Figura 2.17 muestra el ejemplo típico de arrugamiento en la zona de la brida (sujeta por el prensachapas) en la embutición de piezas huecas. Es en esta zona donde se producen tensiones de compresión. Para evitar este tipo de arrugamiento se suele aumentar la fuerza del prensachapas, aunque al mismo tiempo aumenta el riesgo de desgarro en la pared de la pieza, fallo que también se aprecia en la pieza cuadrada de la Figura 2.17.

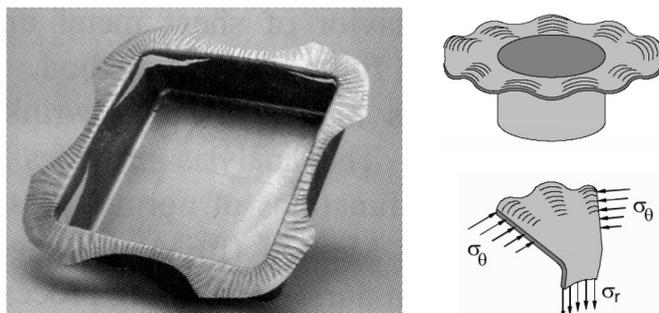


Figura 2.17 Ejemplo de fallo por arrugamiento en operaciones de embutición [5].

2.2.4 Diagramas límite de conformado

El diagrama límite de conformado (FLD, Forming Limit Diagram) ha llegado a ser una herramienta práctica muy útil para el conocimiento de la capacidad de conformado de las chapas metálicas. Se trata de una representación gráfica donde aparece la deformación principal mayor en el plano de la chapa (ε_1) frente a la deformación principal menor (ε_2). Esto permite la representación de los diferentes estados de deformación del material.

En dichos diagramas se incluye una línea, obtenida comúnmente a partir de ensayos experimentales, conocida como curva límite de conformado (FLC, Forming Limit Curve), dividiendo el diagrama en dos zonas: la zona donde se permite el correcto conformado de la chapa y la zona donde se produciría el fallo. El objetivo durante la fabricación es modificar parámetros para encontrarse dentro de esa curva [3].

Nótese que en la Figura 2.18 aparece representado una única FLC por estricción, debido a que, como se mencionó previamente, la estricción localizada es el modo de fallo típico en el conformado de chapa. Esta curva suele presentar forma de V y su valor más bajo, conocido como FLC_0 , es un valor característico de cada material. Este valor suele ocurrir en condiciones de deformación plana.

Puede definirse un parámetro β para relacionar los incrementos infinitesimales de deformación principal máxima y mínima en el plano de la chapa para así caracterizar las condiciones de deformación del proceso de conformado [3]:

$$\beta = d\varepsilon_2/d\varepsilon_1$$

Si el proceso de carga es proporcional, la deformación seguirá una trayectoria lineal en el FLD y dicho parámetro se definirá por el estado de deformación final [3]:

$$\beta = \varepsilon_2/\varepsilon_1$$

Los valores más característicos de β son 1 (deformación equibiaxial), 0 (deformación plana), -1/2 (tracción uniaxial), -1 (compresión tangencial pura) y -2 (compresión uniaxial). En el FLD suelen representarse estos valores mediante líneas rectas de β constante, como las que se pueden observar en la Figura 2.18. En ese FLD se muestra la curva FLC típica en forma de V de valores de deformaciones límite de estricción localizada para varios materiales.

En la práctica, la FLC se puede obtener por métodos analíticos (como el criterio de Hill mencionado más arriba) o por métodos experimentales. La Figura 2.19 muestra un ejemplo de FLC experimental, línea que resulta de unir los puntos experimentales de cada ensayo de tracción y Nakazima.

2.3 Estudios del área IPF sobre el rebordeado de chapa metálica

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en varios trabajos experimentales del grupo de investigación IPF (área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Sevilla) sobre el rebordeado de chapa metálica, incluyendo el rebordeado de agujero circular (tanto el proceso convencional con punzón como el rebordeado mediante SPIF) y el rebordeado de bordes cóncavos y convexos tanto abiertos como cerrados.

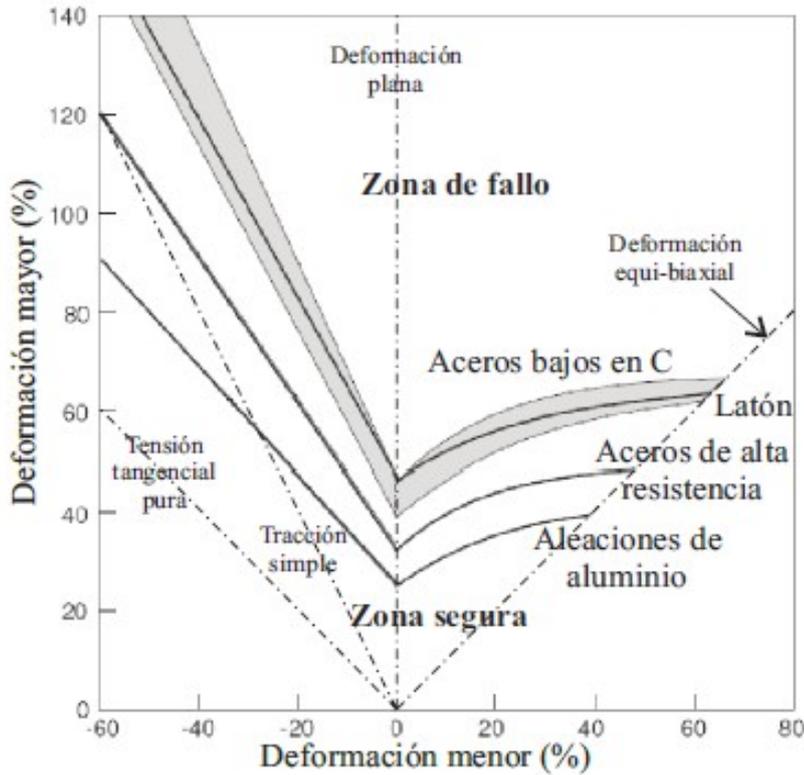


Figura 2.18 Diagrama límite de conformado esquemático con las curvas límite de conformado por estricción (FLC) para varios materiales [3].

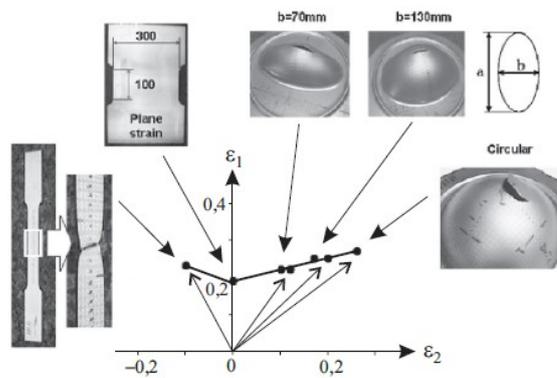


Figura 2.19 Ejemplo práctico de obtención experimental de la curva límite de conformado (FLC) [3].

2.3.1 Rebordeado de agujero circular

En primer lugar, se analizará el rebordeado de agujero circular. Para ello se emplearán dos análisis: en primer lugar, el rebordeado convencional con punzón; y en segundo lugar, el rebordeado mediante SPIF mencionado anteriormente en el apartado 2.1. Este tipo de rebordeado es muy empleado en la industria para conseguir aumentar la rigidez de las piezas, así como facilitar la soldadura para unir las a tubos o mejorar el ajuste a presión, aportando soporte suplementario [6].

Rebordeado convencional con punzón

El rebordeado convencional con punzón consiste en una operación de rebordeado de agujeros en la que una prensa es capaz de deformar con una sola carrera del punzón la lámina de material, la cual contiene un agujero precortado. De esta forma, el material que se encuentra alrededor de dicho agujero se somete tanto a un estiramiento circunferencial como a una flexión meridional.

Un parámetro relevante a definir es la relación límite de conformado (Limit Forming Ratio, LFR), dada por el valor máximo que puede alcanzar el material sin producir fallo. Este es una constante dependiente de la relación entre diámetros final e inicial (d_f/d_0), siendo independiente del radio del borde del punzón. Esto es congruente con el hecho de que el material en el filo del agujero está libre de la influencia de la flexión del punzón.

Como puede verse en la Figura 2.20, la estricción y posterior grieta se propagan en el borde libre de la pestaña. Nótese que esta zona se encuentra sometida a esfuerzos de tracción uniaxial a lo largo del borde [6].

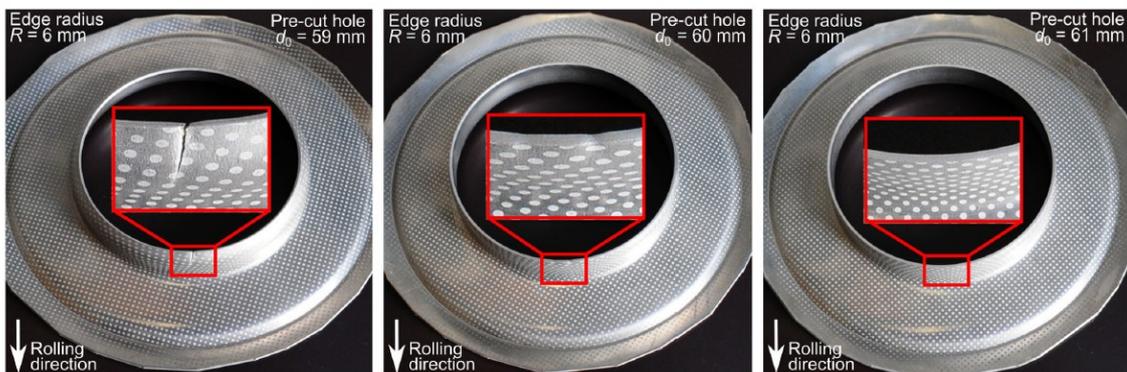


Figura 2.20 Pestañas de orificios precortados con diámetros de 59 (fracturado), 60 (estricción) y 61 mm (exitoso) con un radio de borde del punzón de 6 mm [6].

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la influencia de la trayectoria de deformación en la aparición de estricciones localizadas. Diferentes autores en la literatura científica han demostrado que cambios en estas trayectorias influyen de forma notoria tanto en la forma como en la ubicación de la curva límite de conformado, FLC.

En el caso del rebordeado de agujero circular, el grupo IPF realizó ensayos interrumpiendo la carrera del punzón a diferentes alturas con el objetivo de estudiar de nuevo las trayectorias de deformación. Dichas alturas diferentes pueden observarse en la Figura 2.21 (izquierda). Las dimensiones del agujero precortado fueron de 61 mm y las del punzón cilíndrico de un radio de borde de 6 mm. Tras finalizar cada una de las cuatro pruebas, se midió la deformación principal en cada una de ellas. En la Figura 2.21 (derecha) puede observarse la deformación en cinco puntos distintos (A-E) a lo largo de la dirección meridional de la pestaña.

Mientras que el punto E, situado en el borde libre del agujero, se encontraba sometido a tracción uniaxial y creciendo de forma lineal y proporcional desde el inicio hasta la etapa final, los puntos D y C, situados entre el punto E y la pared de la pestaña, fueron cambiando desde un estiramiento uniaxial hasta una deformación casi plana. En estos puntos también se observa una trayectoria lineal, excepto en la última etapa del proceso. Por otro lado, en el punto B, situado en la pared de la pestaña, puede observarse una trayectoria no proporcional, comenzando con un estiramiento biaxial

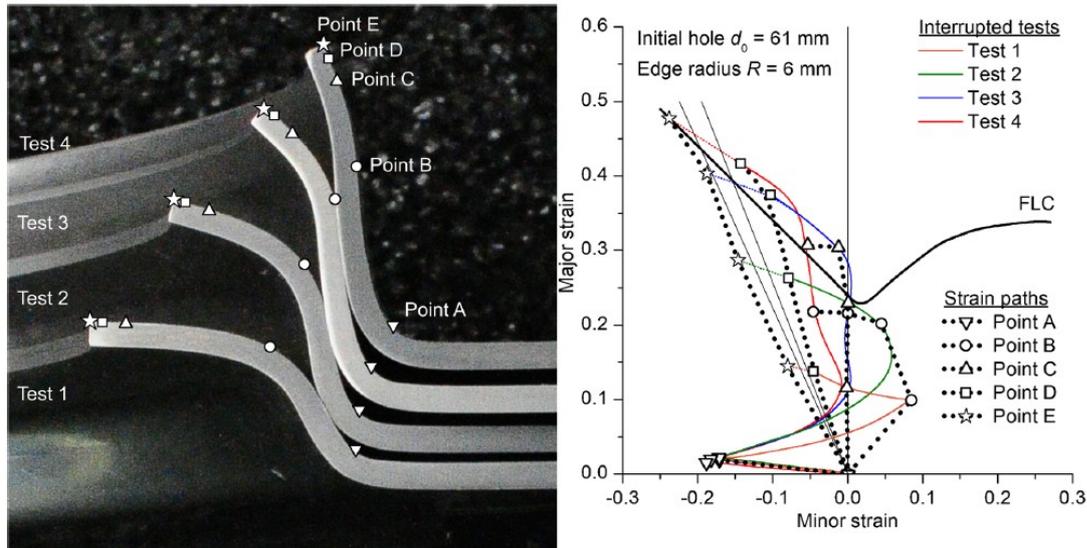


Figura 2.21 Trayectorias de deformación en el plano de la chapa durante el proceso de rebordeado de agujeros obtenidas de las pruebas interrumpidas utilizando el agujero precortado de 61 mm de diámetro y un radio de borde del punzón de 6 mm [6].

y acabando con un estiramiento uniaxial. Por último, el punto A, situado en el radio de la matriz, está sometido a una compresión relevante y su trayectoria es lineal.

Por tanto, puede concluirse que los puntos alejados del borde están sometidos a una no proporcionalidad en las trayectorias de deformación, mientras que sí son proporcionales en aquellos puntos que se encuentran en el borde de la pestaña, siendo la proporcionalidad más acentuada cuanto más al borde se encuentre el punto en cuestión. Sin embargo, puede observarse que hay deformaciones en la región cercana al borde de la pestaña que superan el FLC convencional, por lo que los efectos no proporcionales de estas trayectorias son incapaces de explicar por qué no se observó fallo en estos puntos [6].

Rebordeado mediante SPIF

Otro experimento llevado a cabo tuvo como objetivo analizar el conformado incremental de un solo punto (SPIF), donde se emplearon tres radios diferentes de la herramienta (6, 8 y 10 mm) para analizar la influencia en la conformabilidad de la relación espesor de la chapa/radio de la herramienta. La configuración experimental puede verse en la Figura 2.22 (a). La misma estaba formada por un soporte y una placa de respaldo con un agujero de 100 mm de diámetro, ambos fijados a la mesa de la máquina a través de un soporte rígido. La chapa se deforma gradualmente con una herramienta semiesférica.

El objetivo final del experimento era lograr la geometría final de la chapa con pestaña en el agujero en una sola pasada de la herramienta. Para ello, se planificó un agujero final cilíndrico con un diámetro interior (d_f) de 95,8 mm, mecanizándose una serie de agujeros precortados (d_0) en las chapas indeformadas para obtener los límites de conformabilidad del proceso en una sola etapa de SPIF, es decir, el máximo de la relación d_f/d_0 que permite conseguir la pestaña completa sin llegar al fallo (LFR).

La trayectoria de la herramienta puede modelarse a través de herramientas CAD. En su inicio, la herramienta seguirá una trayectoria de círculos concéntricos en sentido antihorario en el eje z,

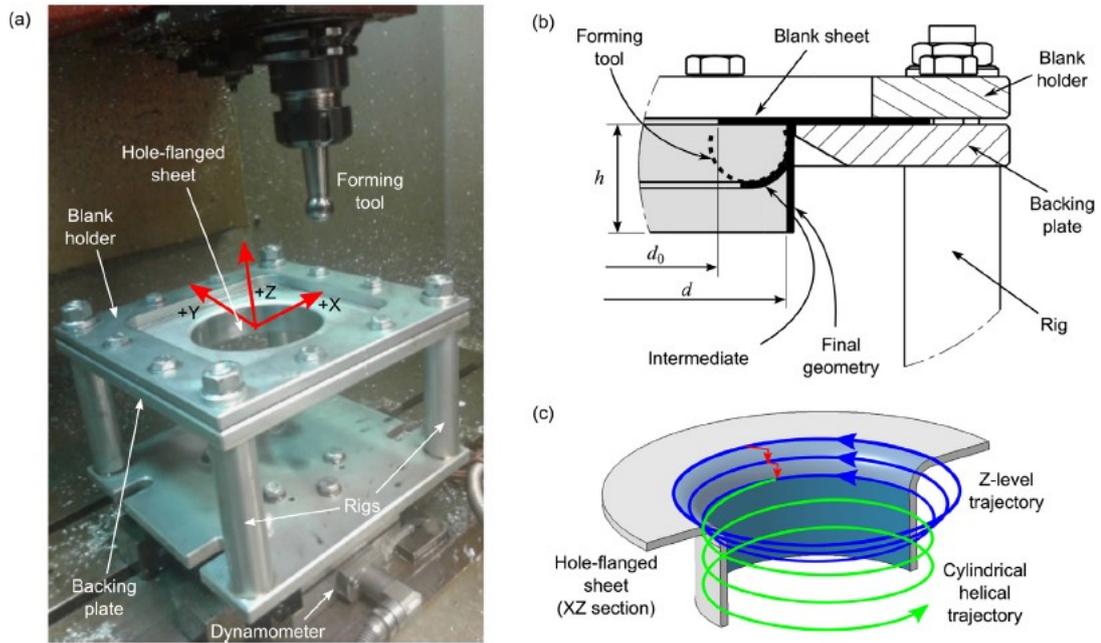


Figura 2.22 (a) Configuración experimental para SPIF. (b) Esquema del proceso de rebordeado de agujeros de una sola etapa por SPIF. (c) Esquema de la trayectoria en z para el tronco cónico y la trayectoria helicoidal cilíndrica. [7].

debiendo disminuir el diámetro de los mismos para ir ajustando la chapa a la placa, con un paso de 0,2 mm/vuelta. Tras esto, seguirá una trayectoria helicoidal cilíndrica en el mismo sentido y con el mismo paso.

Como se hizo para el rebordeado convencional con punzón, se analizaron también los resultados del experimento (descrito en [7]). En la Figura 2.23 pueden verse las representaciones de las deformaciones principales obtenidas para distintos puntos de la pestaña y para distintos diámetros de los agujeros precortados.

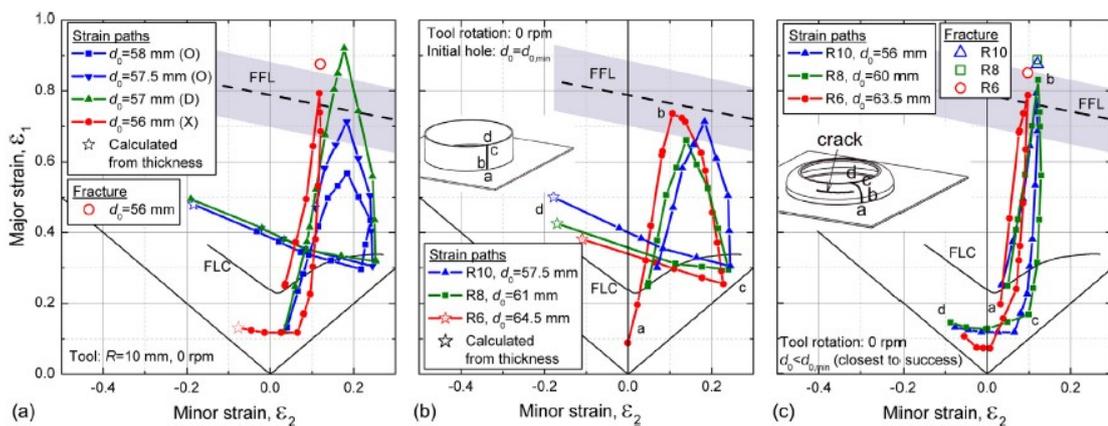


Figura 2.23 FLD con la evolución de las trayectorias de deformación a lo largo de la pestaña final para: (a) diferentes diámetros de orificios precortados para un radio de herramienta determinado; (b) pruebas exitosas con los diámetros mínimos de orificios precortados; y (c) pruebas fallidas más cercanas al éxito [7].

Como se observa en la Figura, la deformación mayor crece en la región central de la pestaña (punto b) conforme menor sea el diámetro del orificio precortado. Además, también se observa que la pieza cuyo agujero tenía un diámetro de 56 mm llegó al fallo antes de finalizar el proceso. Un caso especial aparece en la pieza con agujero de diámetro 57 mm, ya que, aunque no se produjo fractura tras el proceso, sí que aparecieron microfisuras superficiales en la pestaña, lo que permitió el alcance de una deformación principal por encima de la curva límite de fractura (FFL, Fracture Forming Limit).

Por otro lado, siguiendo de nuevo la Figura 2.23, los puntos a-b-c están sometidos a una deformación biaxial, alcanzando la deformación principal en la dirección axial un valor máximo en el punto b. Sin embargo, en la zona c-d, cerca del borde, se encuentra sometido fundamentalmente a estiramiento y flexión circunferencial, evolucionando desde un estiramiento equibiaxial (en el punto c) hasta una tracción uniaxial (en el punto d).

En la Figura 2.23 (c) se muestran las pruebas fallidas más cercanas al éxito, observándose que el pico de deformación es más agudo. No obstante, en la zona c-d se observa una deformación mucho menor como consecuencia de la interrupción del ensayo tras la aparición de la fractura.

2.3.2 Rebordecado de bordes abiertos cóncavos y convexos

Este proceso de fabricación se suele realizar por hidroconformado o por conformado con placas de poliuretano, de igual forma que se explicará en el rebordecado de bordes cerrados (Apartado 2.3.3). Su ventaja principal es que se trata de un proceso de fabricación rápido, lo que lo convierte en uno de los más empleados para la fabricación de grandes lotes. Sin embargo, se encuentra en auge el uso del conformado incremental monopunto o SPIF para rebordecado de agujeros, como se presenta en este proyecto, de forma que pueda aprovecharse la flexibilidad y el ahorro de material propios de esta operación.

A continuación, se analizarán los resultados del equipo de investigación IPF obtenidos para operaciones de rebordecado realizadas con SPIF. Estas han sido realizadas en un centro de mecanizado CNC de 3 ejes EMCO VMC-200, como puede verse en la Figura 2.24, la cual contiene una matriz, un soporte para la chapa, un punzón con el que se realizará la operación y un sistema de refrigeración y lubricación [1].

En cuanto a las trayectorias seguidas por la herramienta, consistirán en un patrón de arcos circunferenciales concéntricos con radio igual al de la matriz (Figura 2.25). Cada vez que la herramienta completa un arco, se desplazará sobre el eje z para repetir la operación desde la nueva posición. Las trayectorias empleadas en los diferentes experimentos fueron calculadas a través de MATLAB [1].

Tras la realización de los experimentos, se pasó al análisis de la deformación del material utilizando el software *Argus*. La técnica CGA se basa en trazar una rejilla en la superficie de la chapa antes de la prueba, generalmente formada por un patrón de puntos circulares. Tras los experimentos, se mide la distorsión sufrida por estos puntos tomándose varias fotografías desde diferentes perspectivas con una cámara de alta resolución (Figura 2.26). El software analiza dichas imágenes, obteniendo así las principales deformaciones de la superficie de la chapa [1].

Los resultados de este análisis de deformación para cada muestra fueron representados utilizando el FLC, así como los principales contornos de deformación (Figuras 2.27 y 2.28). En dichas imágenes se representan los contornos 3D de deformación mayor y menor junto con sus respectivas direcciones. Cabe destacar que los datos de deformación fueron obtenidos de la superficie que no estaba en contacto con la herramienta. Además, esta técnica necesita cuatro puntos de la rejilla para

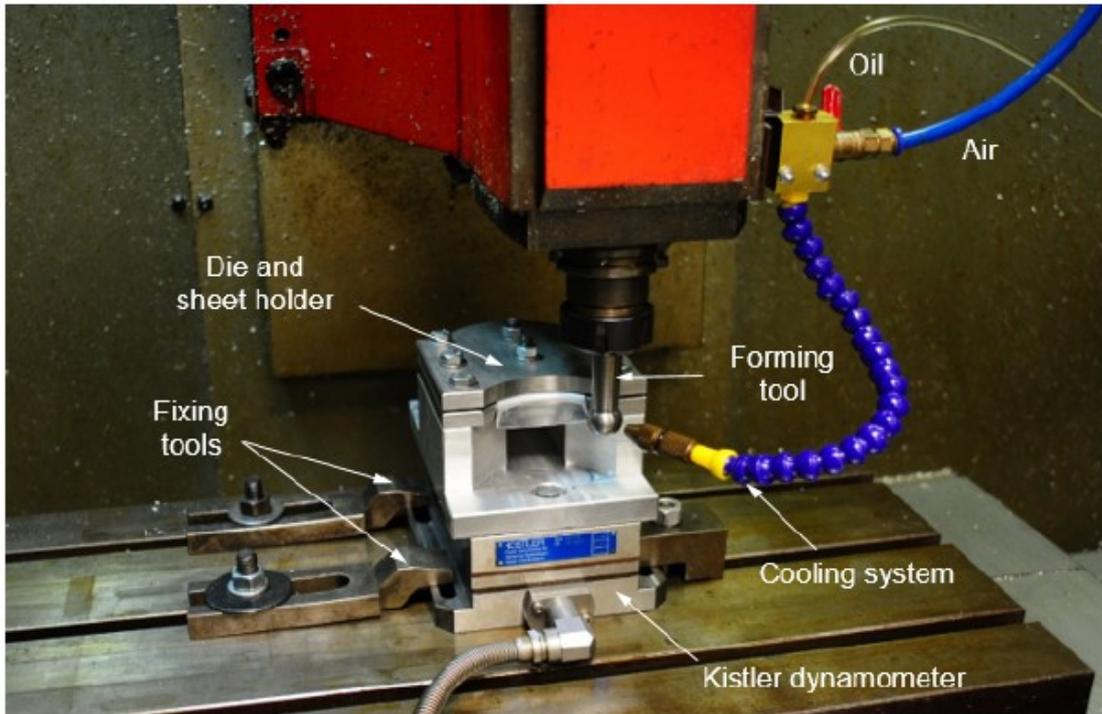


Figura 2.24 Configuración experimental utilizada en los experimentos de rebordeado SPIF [1].

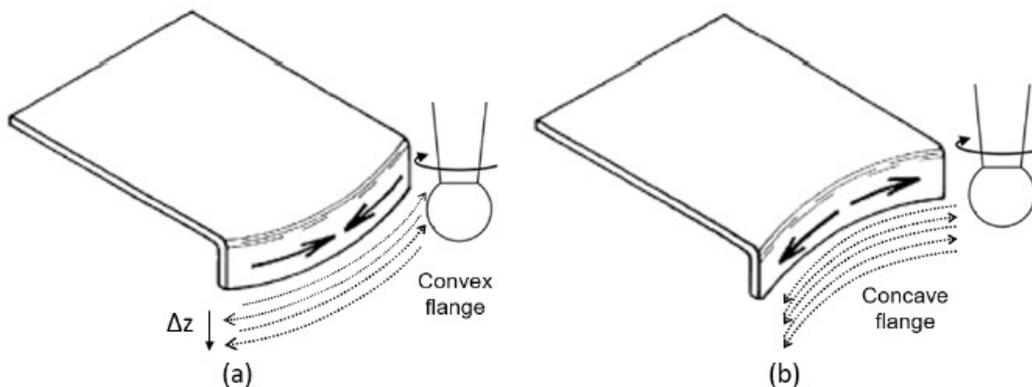


Figura 2.25 Esquema de las trayectorias de la herramienta [1].

interpolando las deformaciones intermedias, lo que impide analizar las deformaciones del borde de la pestaña. En este caso, la distancia desde el último punto medido hasta el borde fue de, aproximadamente, 0,5 mm [1].

Así, se empleó un método alternativo a CGA para la deformación del borde de la pestaña. Suponiendo que dicho borde se encuentra bajo condiciones de tracción pura, los puntos de deformación en el borde de la chapa deben estar en la línea $\beta = -0,5$ para un material isotrópico, que es la relación entre ε_1 y ε_2 en el borde.

Además, la deformación ε_3 es calculada a través de la medición del espesor, teniendo en cuenta que ε_1 y ε_2 se obtienen aplicando la conservación del volumen. Para la chapa en cuestión, el valor

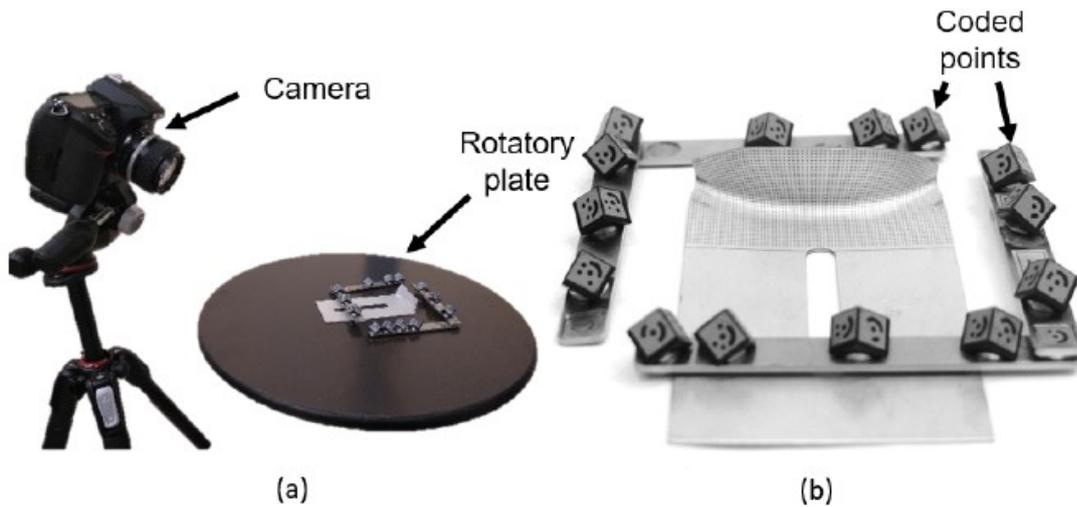


Figura 2.26 (a) Elementos que intervienen en el proceso de medición. (b) Ejemplo de distribución de puntos codificados [1].

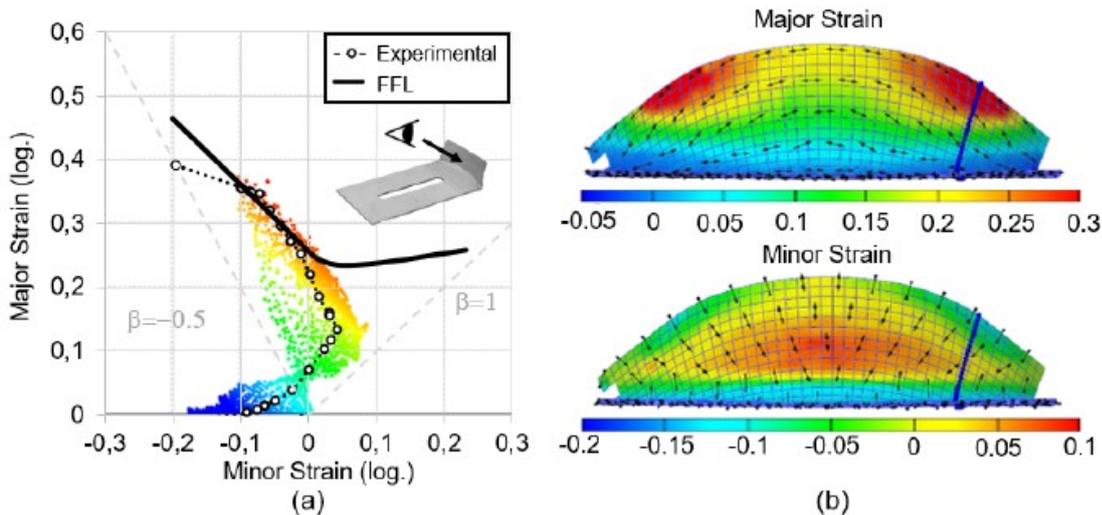


Figura 2.27 Análisis de deformaciones de una pestaña cóncava producida por SPIF. (a) Puntos de deformación y sección del FLD. (b) Contornos de deformación [1].

obtenido utilizando el criterio de anisotropía de Barlat’89 fue $\beta = -0,43$, por lo que los valores de ϵ_1 y ϵ_2 difieren ligeramente de los del caso anisótropo [1].

Por último, se procede al análisis de fallo para determinar si la pestaña conseguida por rebordeado es viable desde el punto de vista funcional. Para ambos casos (rebordeado convexo y rebordeado cóncavo) se observaron dos modos de fallo.

En el primero de los casos bajo estudio, rebordeado cóncavo, se observó fractura en el borde en uno de los experimentos (Figura 2.29 (a)), mientras que en el otro se observó fractura en la esquina (Figura 2.29 (b)). Este modo de fallo es típico en materiales sometidos a altas tensiones de tracción. No obstante, el inicio de la fractura no se produce en el borde de la pieza en cuestión, sino que este es producido ligeramente desplazado para posteriormente propagarse hacia él [1].

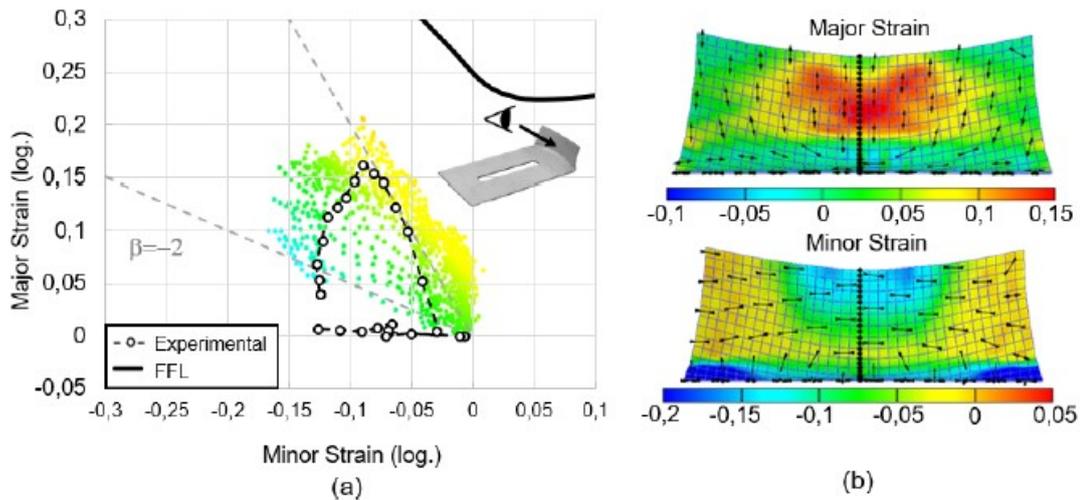


Figura 2.28 Análisis de deformaciones de una pestaña convexa producida por SPIF. (a) Puntos de deformación y sección del FLD. (b) Contornos de deformación [1].

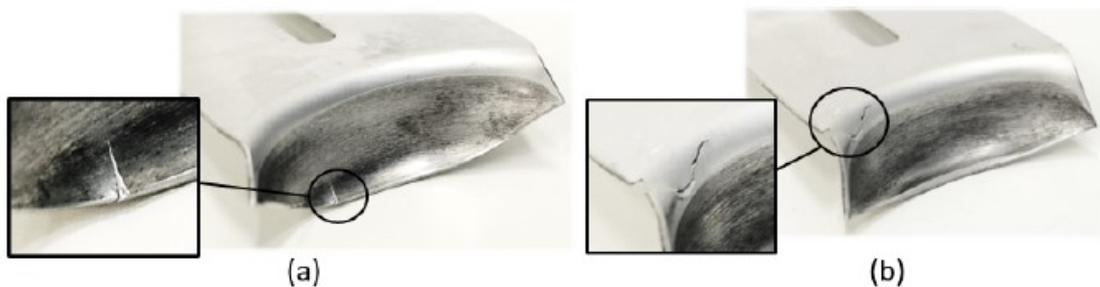


Figura 2.29 Modos de fallo en rebordeado cóncavo mediante SPIF. (a) Fractura en el borde. (b) Fractura en la esquina [1].

En cuanto al rebordeado convexo, se observaron también dos modos de fallo: fallo por arrugamiento (Figura 2.30 (a)) y fallo por inicio de arrugamiento Figura (2.30 (b)). La diferencia entre ambos radica en la intensidad de las arrugas observadas, siendo más grandes y situadas en el centro de la pestaña en el primero de los casos, mientras que resultan más pequeñas y situadas a una distancia relevante del centro las segundas. Además, en el fallo por inicio de arrugamiento, las pestañas no mostraban un borde circular sino que presentaban forma poligonal [1].

2.3.3 Rebordeado de bordes cerrados cóncavos y convexos

Como se mencionó previamente, en la actualidad, el grupo de investigación IPF está empezando un proyecto sobre la conformabilidad en procesos de rebordeado de materiales con un comportamiento de envejecimiento natural. Una de las primeras tareas del proyecto consiste en evaluar el diseño de una probeta para el rebordeado con placas de poliuretano y por SPIF, mediante análisis con elementos finitos. El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster consiste en contribuir a la realización de esta tarea.

A continuación se describe el proceso a realizar en su variante de conformado convencional: el rebordeado con placas de poliuretano.

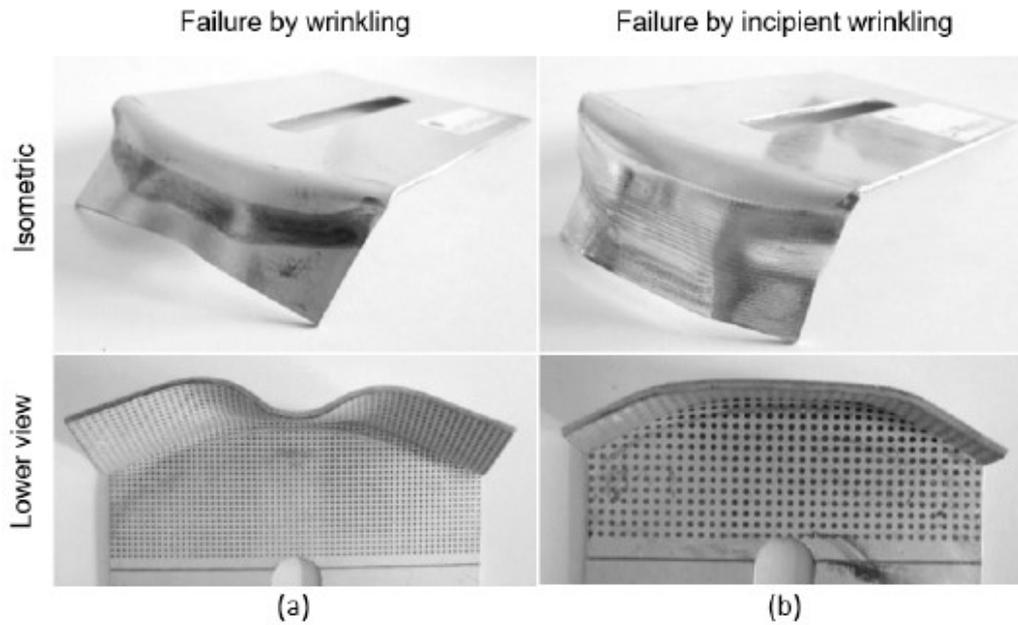


Figura 2.30 Modos de fallo en rebordeado convexo mediante SPIF. (a) Fallo por arrugamiento. (b) Fallo por inicio de arrugamiento. [1].

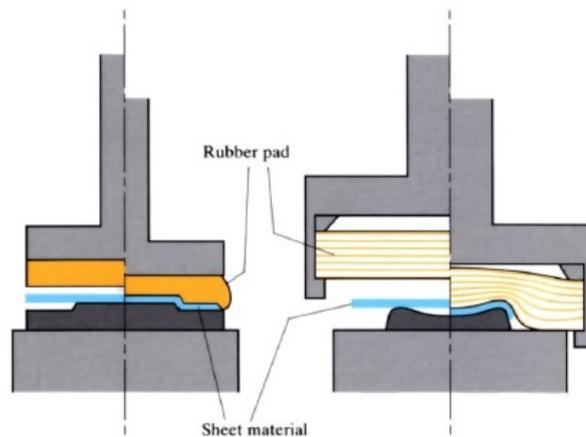


Figura 2.31 Ensayos de conformado con caucho [4].

Los modelos empleados para el análisis serán chapas con un perfil precortado inicial con forma de trébol (Figura 2.32 (a)). La gran ventaja de esta geometría radica en que permite realizar pestañas estiradas y contraídas en una sola probeta (en total, 3 estiradas y 3 contraídas) y en una sola operación.

Los radios cóncavos y convexos de la geometría con forma de trébol serán variables para así completar el análisis del problema. El análisis se enfocará en los parámetros geométricos que influyen de manera significativa en la conformabilidad: el radio de curvatura (R) y la altura de la pestaña (h), siendo este último el parámetro con mayor influencia en la conformabilidad. Además, se tendrá en cuenta que en la práctica se emplean pestañas con la altura más pequeña funcionalmente posible para garantizar el ahorro de material y prevenir defectos durante el conformado [4].

El estudio analizará también un diseño alternativo de la probeta en el que el perfil exterior en forma

de trébol se sustituye por un agujero en una chapa de 250×250 mm, de forma que el rebordeado produzca una pestaña interior (Figura 2.32 (b)).

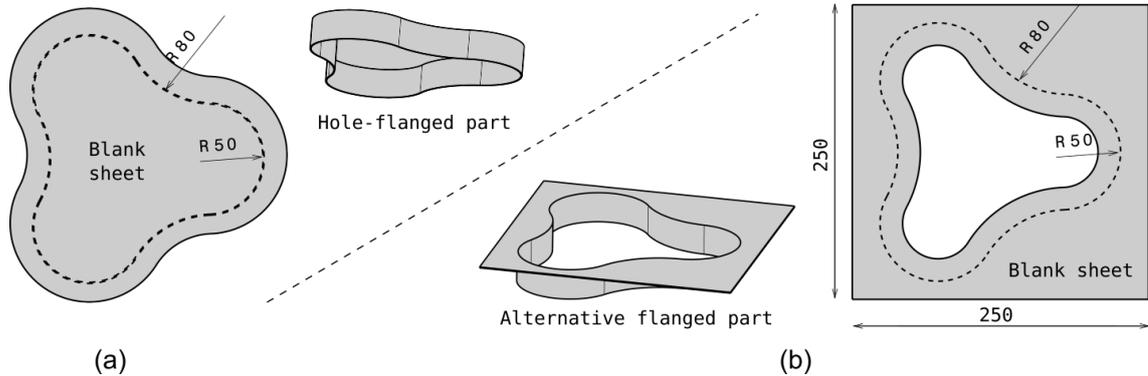


Figura 2.32 Geometría propuesta de especímenes para los ensayos de rebordeado: (a) diseño principal; (b) diseño alternativo [4].

El estudio se basará en un modelo de elementos finitos empleando Abaqus. Se considerará un comportamiento elastoplástico isotrópico de la chapa. Para el comportamiento de la almohadilla de caucho se considerará el modelo de Mooney-Rivlin.

En primer lugar, se empleará un modelo de integración implícito (Abaqus/Standard). Posteriormente, como se explicará más adelante, se empleará un modelo de integración explícito (Abaqus/Explicit).

3 Modelado del rebordeado con bloques de poliuretano

3.1 Geometría del problema

Como geometría inicial se ha planteado la chapa con forma de trébol cuya pestaña se pliega por el perímetro exterior de la misma (Figura 2.32(a)). Como puede verse en la Figura 3.1(a), la geometría de la pestaña, en la que se concentrará toda la deformación plástica, tiene varios planos de simetría de forma que el modelo puede simplificarse considerando solo una cuña de 60° , lo que implica una relevante reducción del tiempo de cálculo. Lo mismo ocurre con el diseño alternativo de probeta (Figura 3.1(b)).

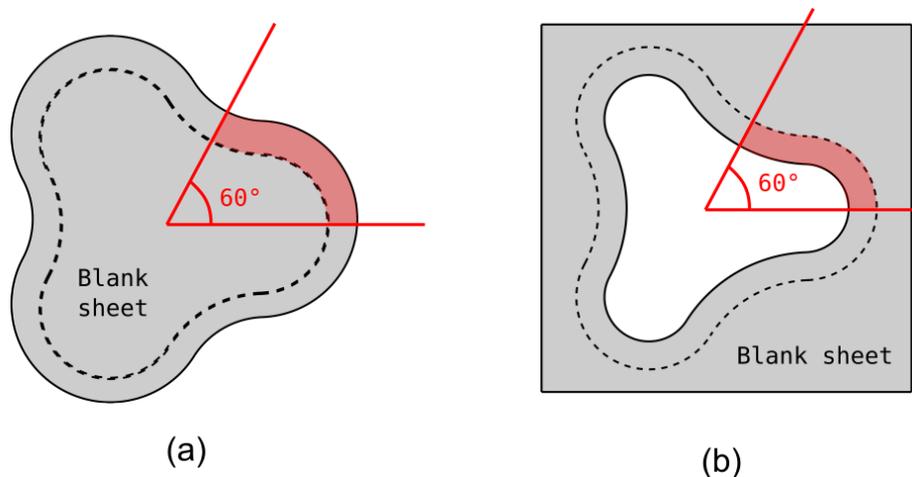


Figura 3.1 Doble simetría de la chapa con forma de trébol.

La geometría del modelo ha sido diseñada en CATIA, como puede verse en las Figuras 3.2 y 3.3. La chapa (5), empujada por una goma de poliuretano (2), tomará la forma de la matriz rígida sobre la que se apoya (3). A su vez, esta matriz se apoyará sobre una placa inferior rígida (4). La goma será empujada por otra placa superior rígida (1), sobre la que se impondrá un desplazamiento vertical.

Tanto la geometría de la matriz como de la chapa han sido parametrizadas. Para ello se han tomado como variables $R_{stretch}$ (radio de la parte de la pestaña sometida a tracción), R_{shrink} (radio de la parte de la pestaña sometida a compresión), y h_0 (altura de la pestaña). Esto puede verse con

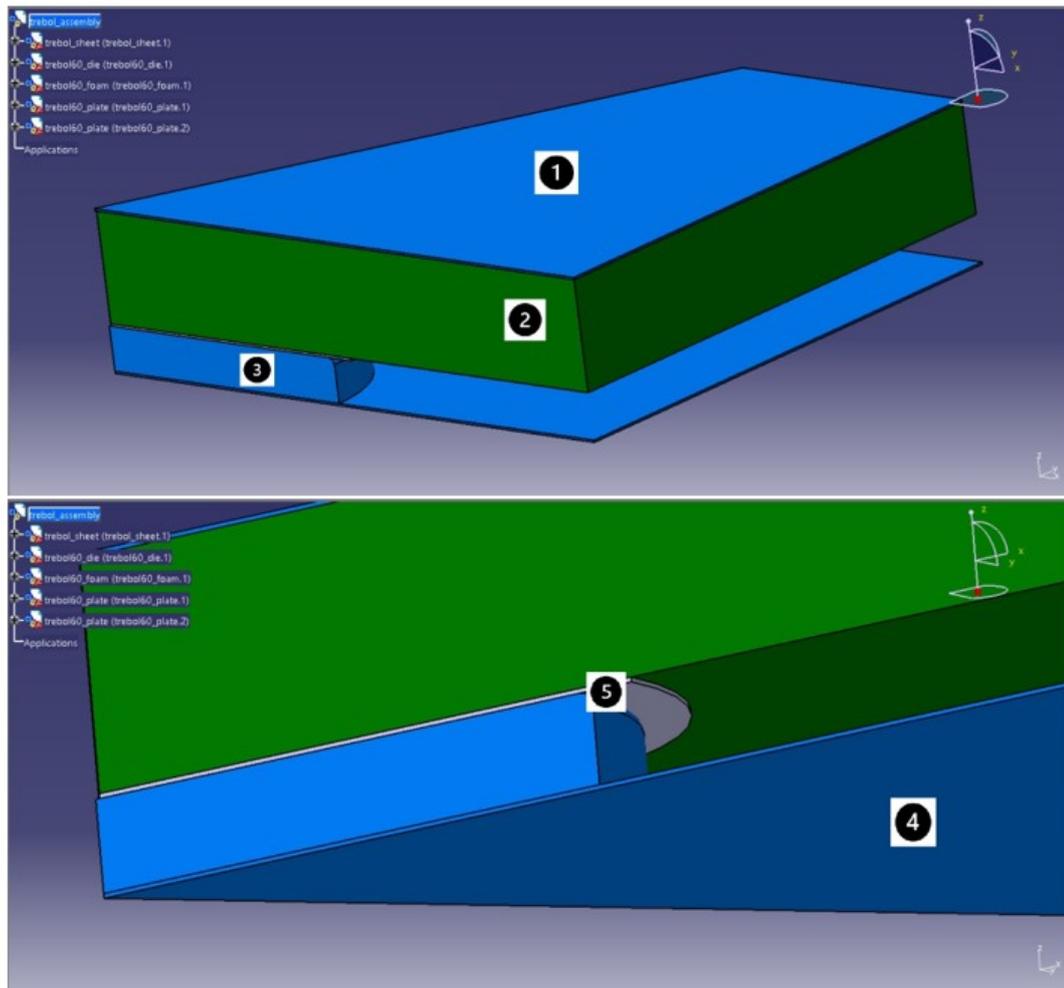


Figura 3.2 Modelado de la geometría del problema en CATIA.

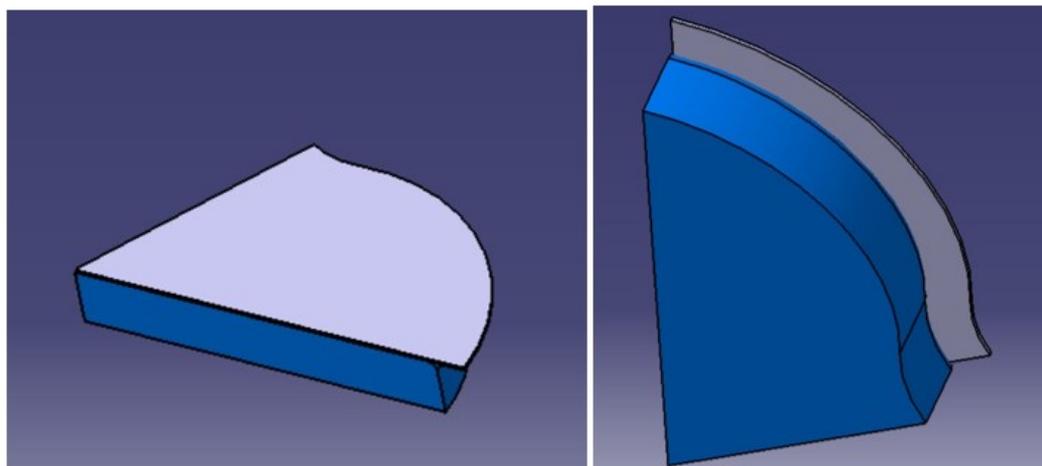


Figura 3.3 Detalle de la geometría de la matriz y la chapa.

detalle en la Figura 3.4.

También se ha parametrizado la geometría alternativa planteada en el capítulo 2, plegando la

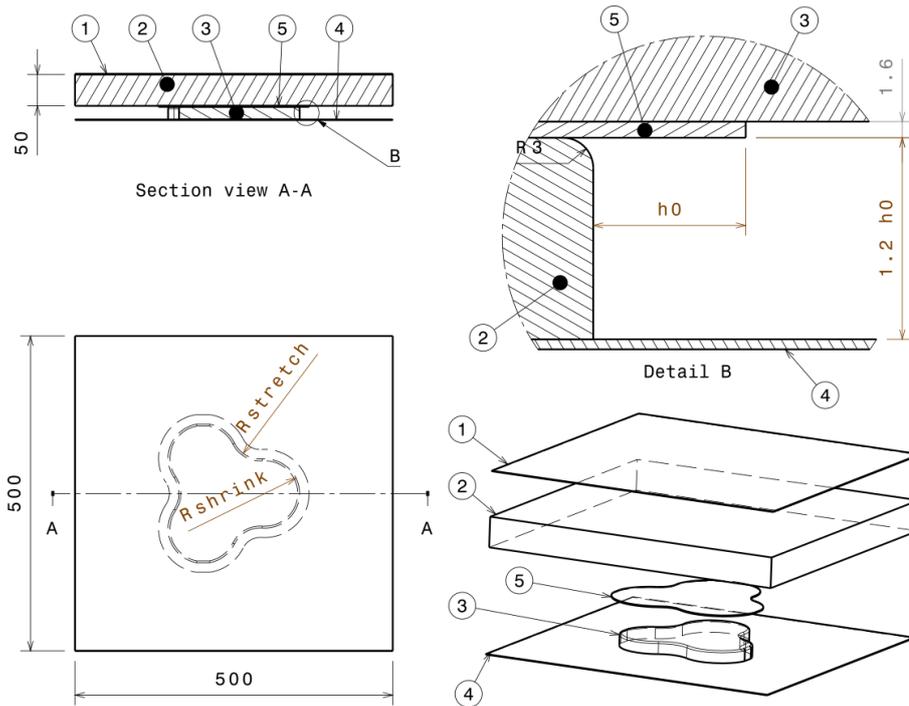


Figura 3.4 Plano del modelo preliminar empleado.

pestaña interiormente, como puede verse en la Figura 3.5. Además, en este modelo se ha unificado las piezas correspondientes al plato inferior y a la matriz (3) y (4) en Figura 3.2) para simplificarlo.

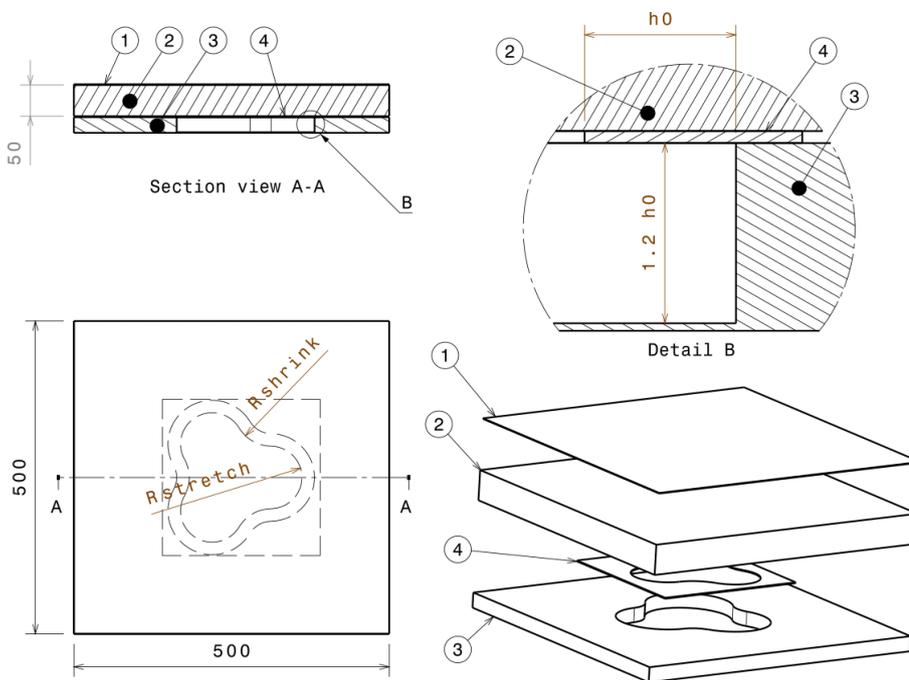


Figura 3.5 Plano del modelo alternativo empleado.

Como se verá en los capítulos siguientes, fue necesario rediseñar el modelo para reducir la fuerza de conformado a valores inferiores a 1 MN. Este nuevo modelo es el mostrado en la Figura 3.6. Se añade una pieza de goma personalizada (1) y un dique con pared inclinada para

facilitar la presión de la goma contra la matriz (2), ambos con dimensiones proporcionales a la longitud de la pestaña y optimizadas después de varias simulaciones de forma que la goma entre adecuadamente en el alojamiento entre la matriz y el dique. Por último, se añade un prensachapas (3).

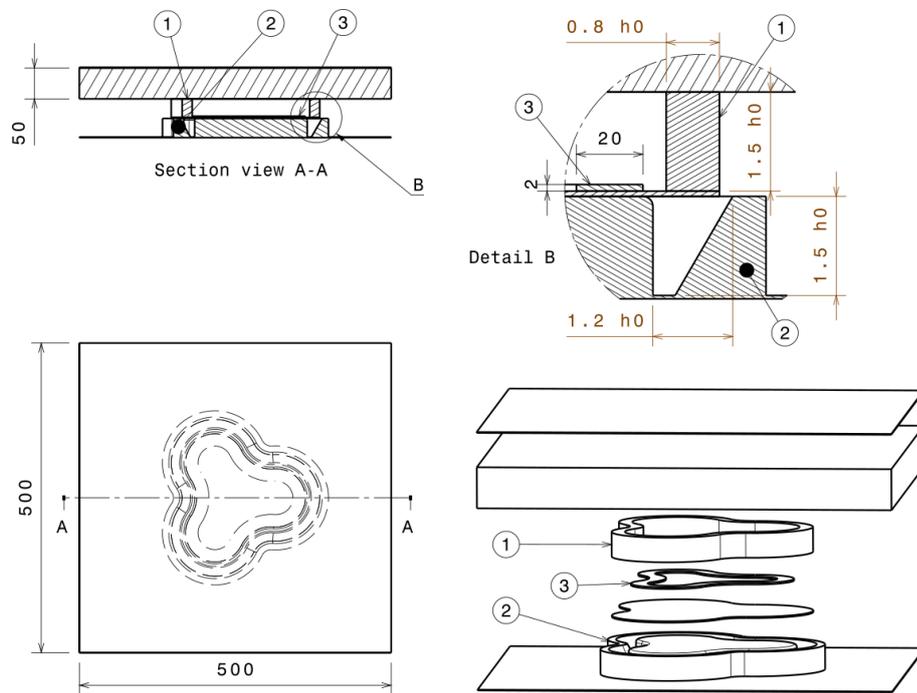


Figura 3.6 Plano del rediseño para reducir la fuerza. Pestaña exterior.

Por último, en la Figura 3.7 se presenta también el rediseño para reducir la fuerza para el modelo alternativo (pestaña interior).

3.2 Ley de comportamiento de los materiales

En esta sección se van a explicar los modelos empleados para formular la ley de comportamiento tanto del material metálico (modelo elastoplástico isótropo) como del elastómero (modelo hiperelástico de Mooney-Rivlin).

3.2.1 Comportamiento de chapa de AA7075-O

El material de las chapas es el mismo que ha utilizado el equipo IPF en trabajos anteriores. El material ya fue ensayado y se conocen sus propiedades mecánicas. Se trata de una aleación de aluminio 7075-O de 1,6 mm de espesor.

Se ha considerado un comportamiento elasto-plástico isótropo de la chapa. Aunque se conocen los datos de anisotropía del material se ha optado por no considerar la anisotropía en el modelo por simplicidad.

Para el comportamiento elástico se ha considerado un límite de Young $E = 70$ GPa y un coeficiente de Poisson $\nu = 0,33$. El comportamiento plástico se ha modelado mediante el criterio de plastificación de Mises con un límite elástico de 109 MPa y una ley de endurecimiento de Hollomon

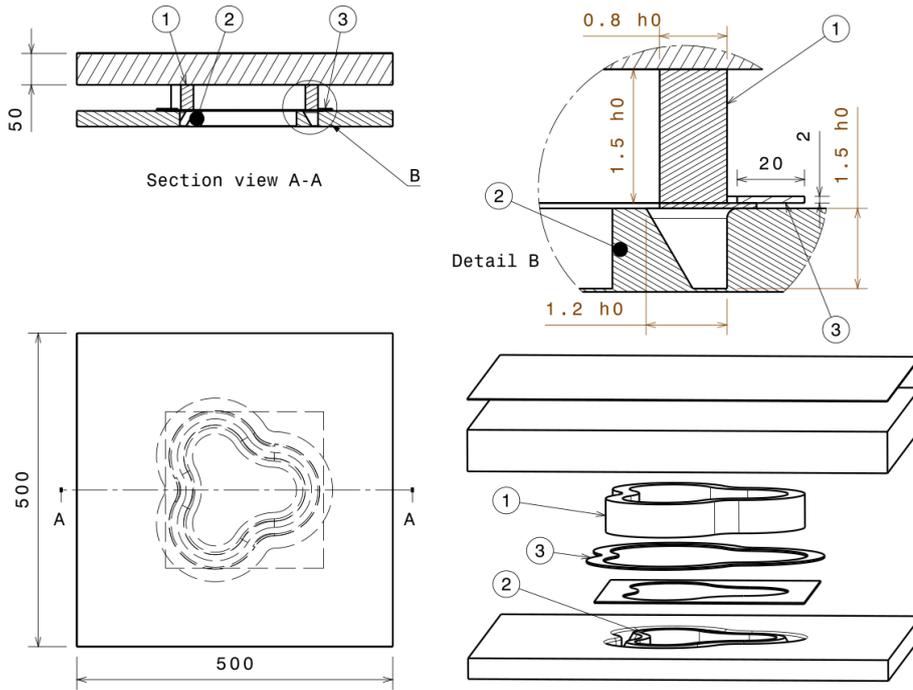


Figura 3.7 Plano del rediseño para reducir la fuerza. Pestaña interior.

$\sigma = 314\epsilon^{0.13}$ ajustada a partir de ensayos experimentales [Borrego 2019]. Esta ley se suministra a Abaqus mediante una tabla con valores de deformación plástica y tensión. Además, la densidad del material se tomará como $\rho = 2,81 \text{ g/cm}^3$.

3.2.2 Modelo hiperelástico de Mooney-Rivlin

Los materiales hiperelásticos se describen en términos de una "energía de deformación potencial", $U(\epsilon)$, que define la energía de deformación almacenada en el material por unidad de volumen de referencia (volumen en la configuración inicial) en función de la deformación en ese punto. Hay varias formas de potenciales de energía de deformación para modelar elastómeros isotrópicos aproximadamente incompresibles: el modelo de Arruda-Boyce, el modelo de Marlow, el modelo de Mooney-Rivlin, el modelo neohookeano, el modelo de Ogden, el modelo polinómico, el modelo polinómico reducido, el modelo de Yeoh y el modelo de Van der Waals.

Generalmente, cuando los datos de múltiples ensayos experimentales están disponibles (normalmente, esto requiere al menos datos de ensayos de tracción y equibiaxiales), los modelos de Ogden y Van der Waals son más precisos [8].

La forma del potencial de energía de deformación de Mooney-Rivlin es [8]:

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2$$

donde U es la energía de deformación por unidad de volumen de referencia; C_{10} , C_{01} y D_1 son parámetros del material dependientes de la temperatura; y \bar{I}_1 y \bar{I}_2 son el primer y segundo invariante del tensor desviador de deformación definidos como:

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \\ \bar{I}_2 &= \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)}\end{aligned}$$

donde $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}}\lambda_i$, J es la relación de volumen total y λ_i son los tramos principales.

El módulo de cizallamiento inicial y el módulo de volumen son dados por:

$$\begin{aligned}\mu_0 &= 2(C_{10} + C_{01}) \\ K_0 &= \frac{2}{D_1}\end{aligned}$$

La relación de volumen elástico, J^{el} , relaciona la relación de volumen total, J , y la relación de volumen térmico, J^{th} :

$$J^{el} = \frac{J}{J^{th}}$$

donde:

$$J^{th} = (1 + \varepsilon^{th})^3$$

siendo ε^{th} la deformación de expansión térmica lineal que se obtiene a partir de la temperatura y el coeficiente de expansión térmica isotrópica:

$$\varepsilon^{th} = \alpha(\theta, f_\beta)(\theta - \theta^0) - \alpha(\theta^I, f_\beta^I)(\theta^I - \theta^0)$$

donde

- $\alpha(\theta, f_\beta)$ es el coeficiente de expansión térmica;
- θ es la temperatura actual;
- θ^I es la temperatura inicial;
- f_β son los valores actuales de las variables de campo predefinidas;
- f_β^I son los valores iniciales de las variables de campo; y
- θ^0 es la temperatura de referencia para el coeficiente de expansión térmica.

Para este modelo se han tomado de la literatura científica los siguientes valores de los coeficientes para el poliuretano [9]:

$$\begin{aligned}C_{10} &= 0,302 \quad MPa \\ C_{01} &= 0,076 \quad MPa \\ D_1 &= 0\end{aligned}$$

No obstante, tras comprobar un mejor resultado a partir de unas propiedades más duras de la goma, en las simulaciones finales se emplearon los siguientes valores [9]:

$$\begin{aligned} C_{10} &= 2,824 \text{ MPa} \\ C_{01} &= 0,706 \text{ MPa} \\ D_1 &= 0 \end{aligned}$$

A su vez, la densidad del material empleada es $\rho = 1,25\text{g/cm}^3$.

3.3 Contactos

A continuación, se muestra el tipo de contacto entre superficies definido en Abaqus. Este módulo es imprescindible para evitar la penetración de unas piezas del modelo sobre otras.

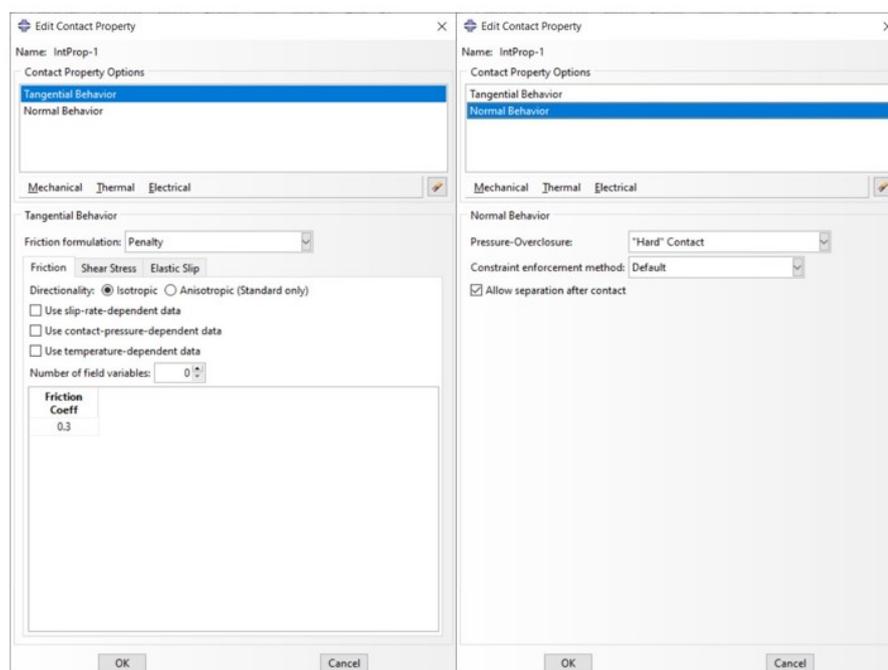


Figura 3.8 Definición de las propiedades de contacto en Abaqus.

En primer lugar, se definen las propiedades de contacto (Figura 3.8). Para ello, se define un comportamiento tangencial entre superficies con un coeficiente de fricción $\mu = 0,3$, valor típico en este tipo de modelo. A su vez, se define también un comportamiento normal entre superficies de tipo contacto "duro", de forma que se evite la penetración entre superficies.

Tras la definición de las propiedades, se procede a la definición de los contactos entre las distintas superficies. Para ello, se selecciona "surface-to-surface contact" entre todas aquellas superficies que tengan algún tipo de contacto durante la simulación (Figura 3.9).

Como puede observarse, es necesario definir una superficie esclava y otra maestra, ya que los pares de contactos en Abaqus/Standard utilizan un algoritmo de contacto maestro-esclavo puro: los

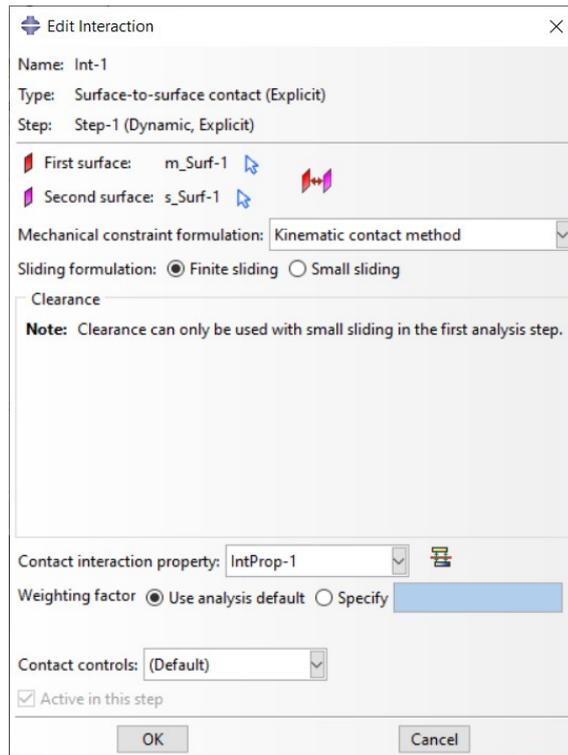


Figura 3.9 Definición de los contactos entre superficies en Abaqus.

los nodos de la superficie esclava no pueden penetrar los segmentos que forman la superficie maestra, como se muestra en la Figura 3.10. Sin embargo, la superficie maestra sí que puede penetrar entre los nodos de la esclava [10].

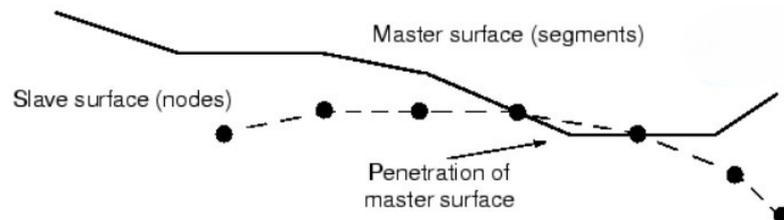


Figura 3.10 La superficie maestra puede penetrar la superficie esclava [10].

Las restricciones de contacto se utilizan para unir dos superficies durante la duración de una simulación. Cada nodo de la superficie esclava está obligado a tener el mismo movimiento que el punto de la superficie maestra al que está más cercano. Esto significa que los grados de libertad traslacional (y, opcionalmente, rotacional) están restringidos [11].

Debido a la estricta formulación maestro-esclavo, se debe tener cuidado al seleccionar correctamente las superficies esclava y maestra para lograr la mejor simulación de contacto posible. Algunas reglas a seguir son:

- La superficie esclava debe ser la superficie de malla más fina.
- Si las densidades de la malla son similares, la superficie esclava debe ser la superficie con el material subyacente más blando.
- La superficie rígida es siempre la superficie maestra en una interacción de contacto [12].

3.4 Condiciones de contorno

Una vez definidos los contactos entre las distintas partes del conjunto, es necesario definir las condiciones de contorno del problema.

En primer lugar, se impondrá que la goma se introduce dentro de una cavidad que le impide desplazarse de forma perpendicular a la bajada de la misma, de forma que pueda empujar a la chapa de forma efectiva. Así, se tomará una condición de desplazamiento nulo en las dos caras de la goma que no pertenecen al corte por simetría de 60° , como se ilustra en la Figura 3.11. A su vez, también se imponen las condiciones de simetría en las caras del conjunto recortadas a 60° , reflejando la doble simetría de la geometría, como se observa en la Figura 3.12). Para poder aplicar la condición de simetría en el plano girado 60° con respecto al sistema global de coordenadas ha sido necesario definir un sistema de coordenadas auxiliar.

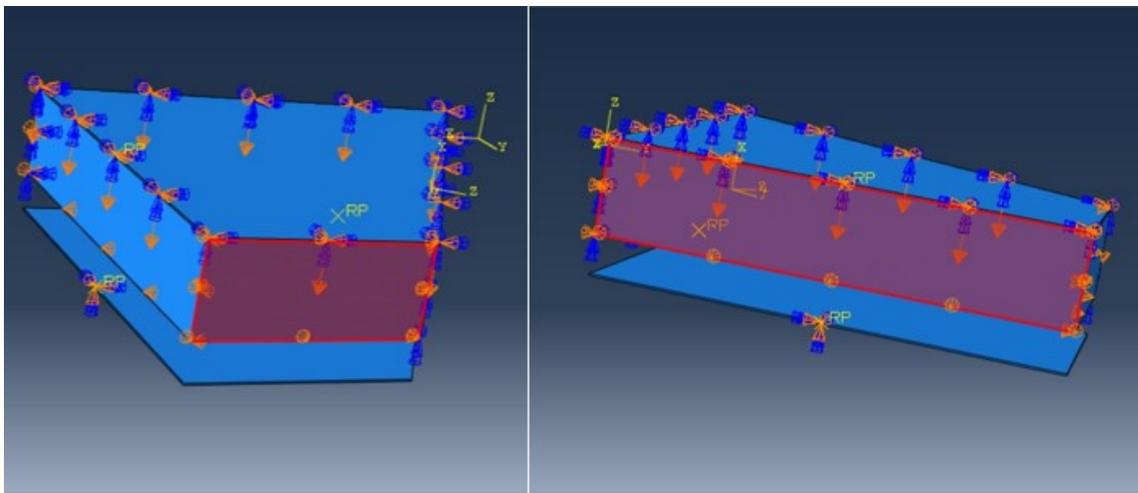


Figura 3.11 Condición de contorno que impide el desplazamiento de la goma en el eje perpendicular a su bajada.

A continuación, se restringe el movimiento tanto de la matriz como de la placa inferior (Figura 3.13). Por último, se impone el desplazamiento vertical de la goma que ejercerá presión sobre la chapa para conseguir la geometría final deseada (Figura 3.14).

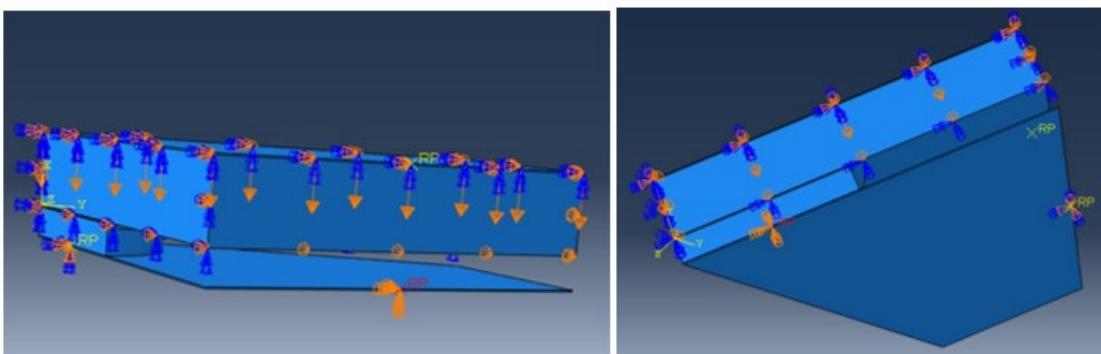


Figura 3.13 Condición de contorno de encastrado de la matriz y de la placa inferior.

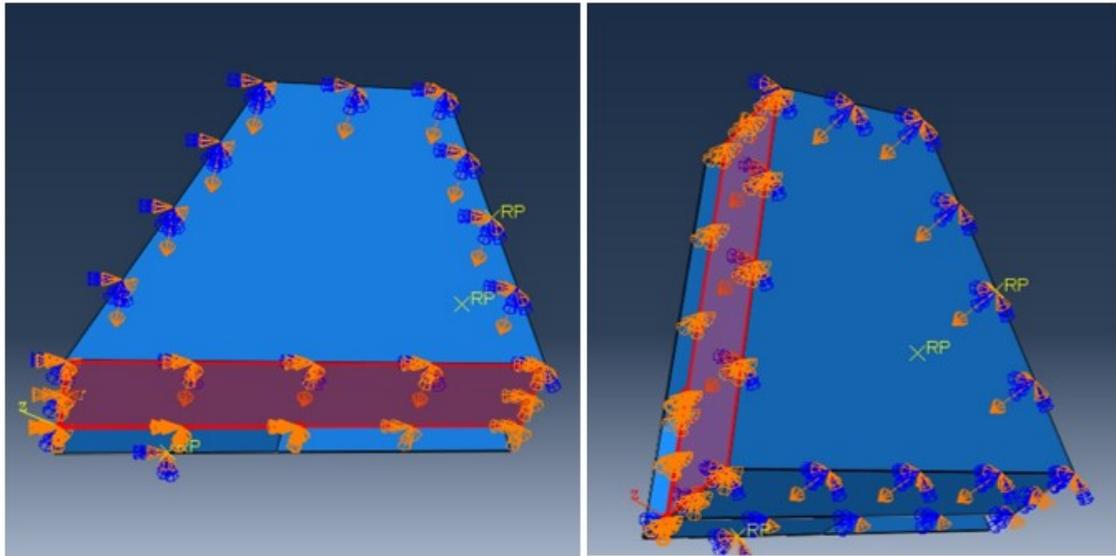


Figura 3.12 Condición de simetría en las caras a 60° .

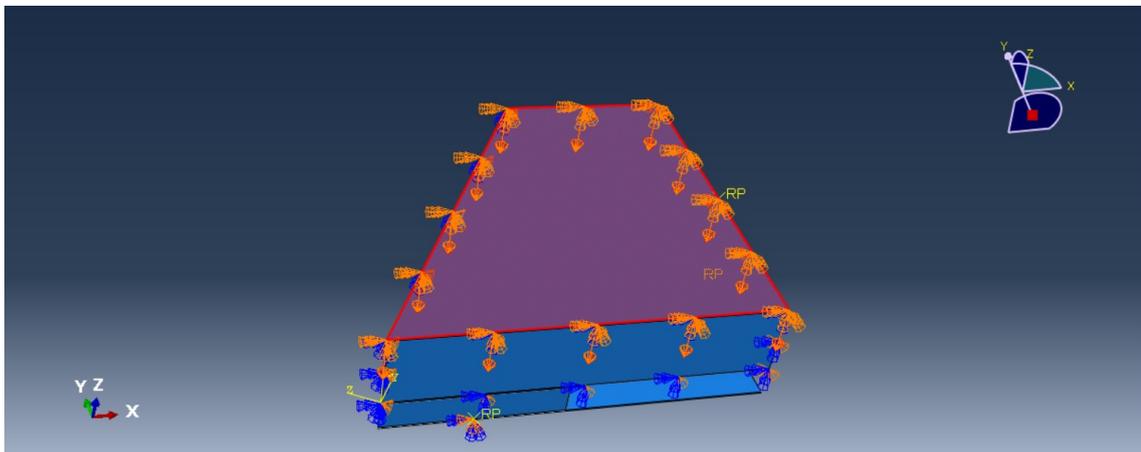


Figura 3.14 Condición de contorno desplazamiento vertical de la goma.

3.5 Mallado

El módulo de mallado se trata de uno de los más importantes del modelo. Uno de los principales objetivos es encontrar una solución de compromiso entre aliviar el tiempo de cálculo (malla gruesa) y refinar la solución (malla fina). Además, las distintas piezas del modelo deben tener tamaño de elemento de malla similar para evitar discontinuidades y permitir un correcto desarrollo del cálculo.

La chapa se ha mallado con elementos de entre 0,8 y 1 mm de tamaño. En las primeras simulaciones se usaron elementos 3D pero en las últimas simulaciones se cambió a elementos tipo *shell* para poder obtener las deformaciones principales en el plano de la chapa y poder así analizar los resultados en un diagrama límite de conformado. También se empleará un mallado estructurado para mejorar la solución obtenida (Figura 3.15).

La placa de poliuretano se ha mallado con elementos 3D de tamaño entre 4 y 6 mm. En el caso de la goma personalizada se han usado elementos de 2 mm. En las simulaciones con Abaqus/Standard fue necesario usar una formulación híbrida y reducida para este tipo de material hiperelástico porque

así lo requería el sistema.

Así, el mallado obtenido para el conjunto ensamblado puede verse en la Figura 3.16.

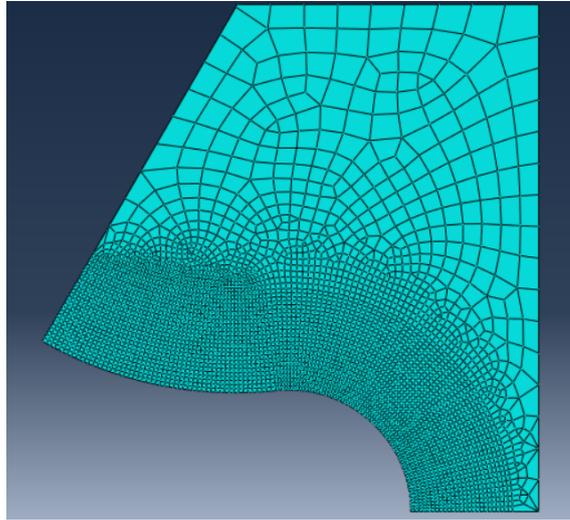


Figura 3.15 Mallado estructurado de la chapa.

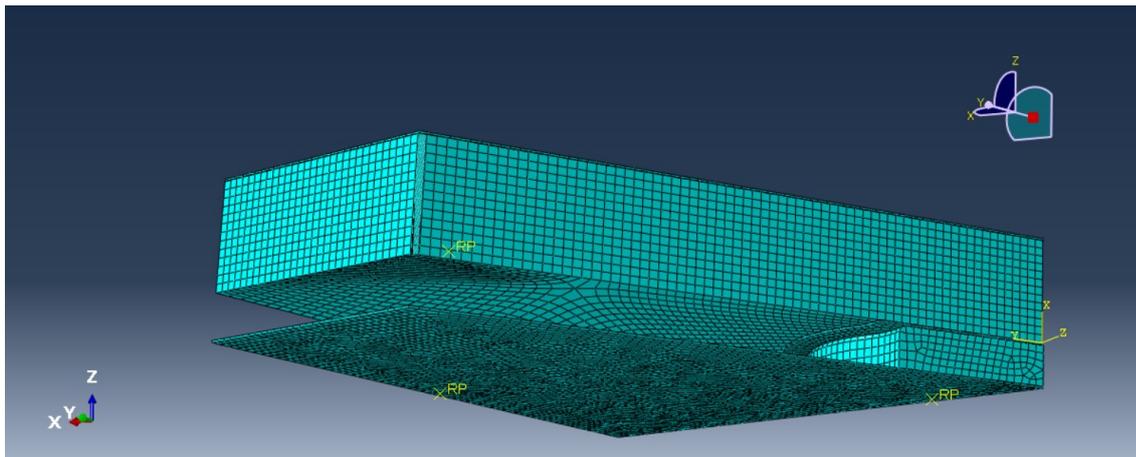


Figura 3.16 Mallado del modelo.

4 Simulaciones preliminares con Abaqus/Standard

En este capítulo se presentan las primeras simulaciones numéricas realizadas. Estas se han modelado con poco detalle y con elementos de malla grandes para reducir los tiempos de cálculo. Progresivamente, esto se ha ido refinando. En cada una de dichas simulaciones se exponen los problemas encontrados y la mejora del modelo.

4.1 Rebordeado con presión uniforme

En primer lugar, se simplificó la geometría del modelo para obtener una primera estimación de la fuerza necesaria para realizar el plegado de la chapa. Para ello, se modeló el problema únicamente con la chapa y la matriz, como puede verse en la Figura 4.1. En un primer caso, se impusieron los siguientes parámetros geométricos: $R_{stretch} = 60$ mm, $R_{shrink} = 40$ mm y $h_0 = 20$ mm. Además, se ha supuesto que sobre la superficie de la chapa se ejerce una presión uniforme de 5 MPa (ver Figura 4.2).

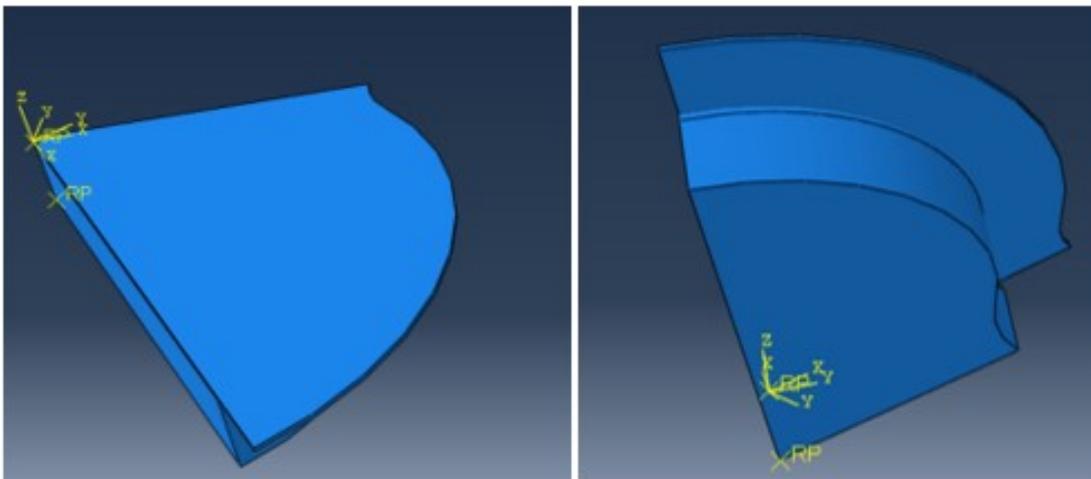


Figura 4.1 Geometría del modelo de rebordeado con presión uniforme.

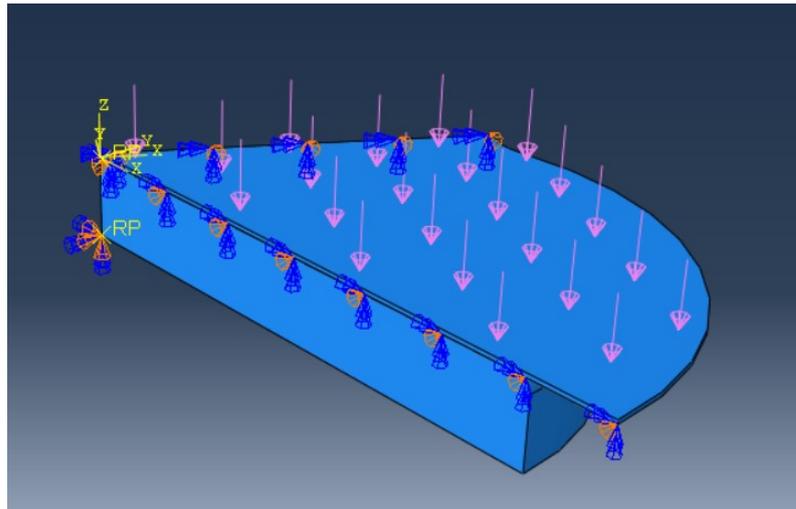


Figura 4.2 Presión uniforme aplicada sobre la chapa. Modelo con presión uniforme.

Los resultados obtenidos pueden apreciarse en la Figura 4.3. Se observan las arrugas tan severas que se producen para la geometría propuesta. De hecho, se ve cómo la simulación dejó de converger para un *time* de 0,3812 debido a que dichas arrugas rigidizan tanto la chapa que imposibilita su plegado total.

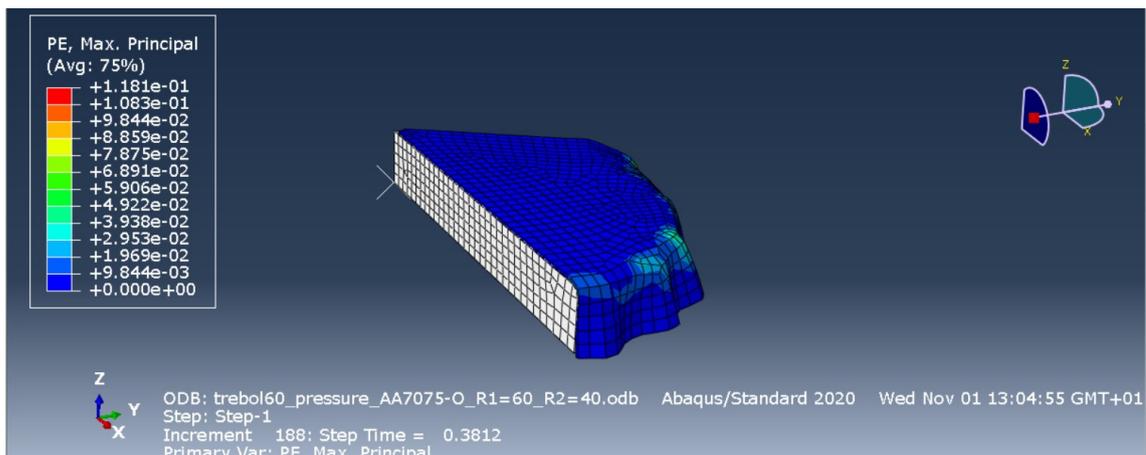


Figura 4.3 Deformación máxima principal en Assembly. Modelo con presión uniforme, primera simulación.

En la Figura 4.4 puede observarse con más detalle la deformación máxima principal de la chapa. Como se esperaba, esta se concentra en la zona de plegado de la misma. Además, en ningún punto se alcanza el fallo por estricción del material, cuyo valor se estima aproximadamente en 0,5 en las condiciones de tracción uniaxial del borde libre de la chapa. Dicho valor límite de estricción localizada se ha estimado a partir de la FLC del material (véase, por ejemplo, la Figura 2.21).

Tras esta primera simulación, se procedió al cambio de los parámetros geométricos para estudiar su influencia en la solución obtenida. Para ello, modeló un segundo caso con $R_{stretch} = 60$ mm, $R_{shrink} = 40$ mm y $h_0 = 10$ mm, es decir, se reduce la longitud de la pestaña con respecto al caso anterior. Para este caso se pudo conseguir un plegado completo de la chapa, como se observa en la Figura 4.5, sin que el material falle por arrugamiento o por estricción localizada.

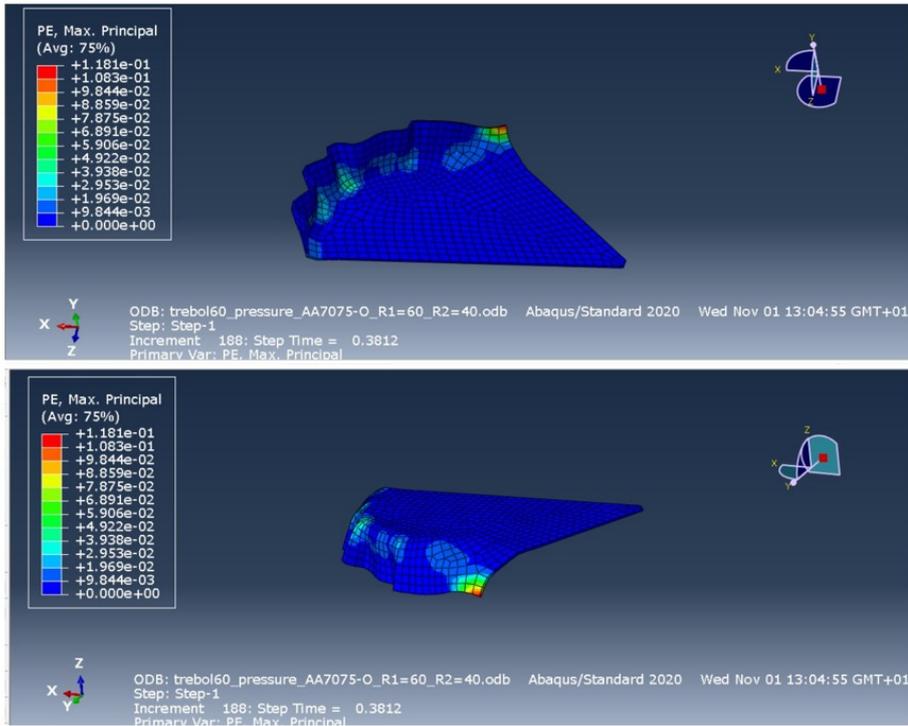


Figura 4.4 Deformación máxima principal en la chapa. Modelo con presión uniforme, primera simulación.

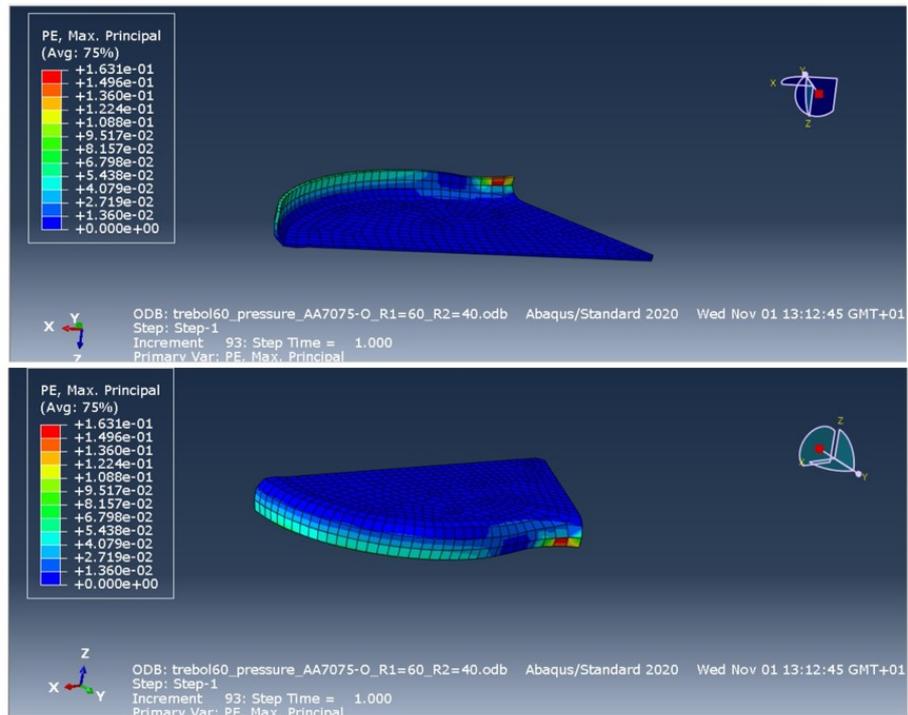


Figura 4.5 Deformación máxima principal en la chapa. Modelo con presión uniforme, segunda simulación.

Por último, se procedió al estudio de un tercer modelo con los siguientes parámetros geométricos: $R_{stretch} = 70$ mm, $R_{shrink} = 30$ mm y $h_0 = 10$ mm. Los resultados obtenidos pueden apreciarse en la Figura 4.6. En este caso, al aumentar el radio de la zona convexa de la matriz, se produce arrugamiento en la zona de transición entre ambas zonas de la chapa.

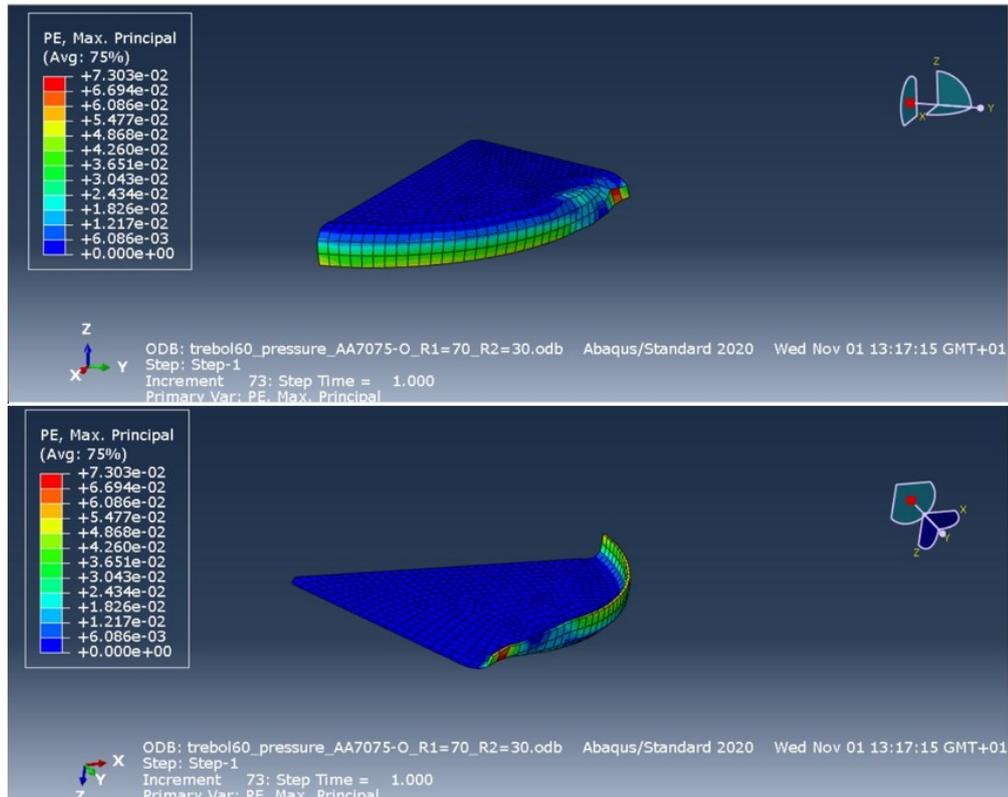


Figura 4.6 Deformación máxima principal en la chapa. Modelo con presión uniforme, tercera simulación.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en estas tres simulaciones, se concluyó que la geometría del problema juega un papel relevante en la predicción del tipo de fallo que se obtendrá. Asimismo, con esta primera estimación se estableció la viabilidad del problema, por lo que se decidió modelar el mismo de una forma más real, sustituyendo la presión uniforme distribuida de forma ideal en la superficie de la chapa por un cojín de goma que se desplaza ejerciendo presión sobre esta.

4.2 Rebordeado con cojín de goma

Como se ha explicado previamente, con el objetivo de modelar el problema de forma más real, se comenzó a estudiar una nueva geometría que sustituyera la presión uniforme distribuida en la superficie de la chapa por un cojín de goma que ejerciera presión sobre la misma. Así, la siguiente simulación realizada ha sido la correspondiente al proceso convencional de rebordeado con placas de poliuretano, descrito en el Capítulo 3. Tras la definición de la geometría ($R_{stretch} = 30$ mm, $R_{shrink} = 70$ mm y $h_0 = 10$ mm), comportamiento del material, tipo de contactos, condiciones de contorno y mallado, se han obtenido los resultados que se presentan a continuación.

En la Figura 4.7 se observa la deformación plástica principal máxima (PE, Max. Principal) obtenida en el modelo. Como puede comprobarse, la chapa de AA7075-O es el único elemento del modelo que presenta deformaciones plásticas. También se observa que el proceso de cálculo no pudo continuar a partir del instante 0,2673 por problemas de convergencia en la solución.

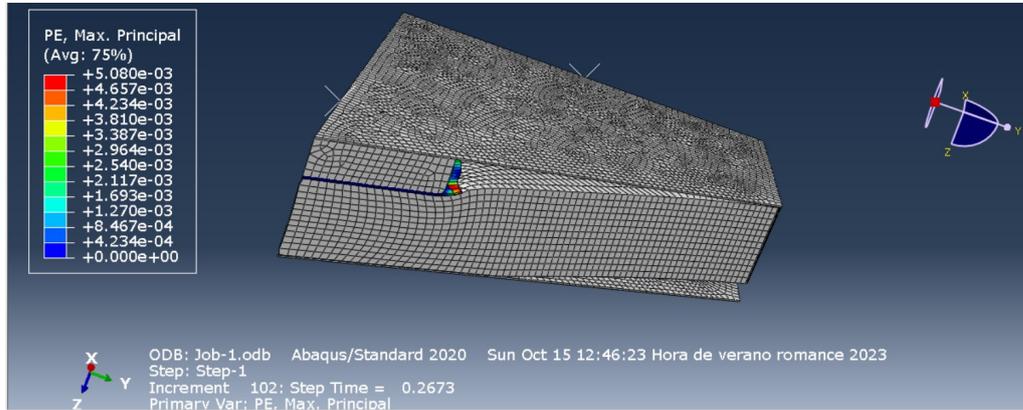


Figura 4.7 Deformación logarítmica máxima principal en Assembly. Diseño preliminar.

La deformación plástica máxima de la chapa puede observarse con más detalle en la Figura 4.8. Los valores más altos se concentran en la parte de la pestaña, donde se realiza el plegado. Además, se observa que el valor máximo se alcanza en la esquina sometida a tracción. No obstante, al final de dicha simulación se obtuvo una deformación máxima de 0,005, muy lejos del fallo por estricción aún.

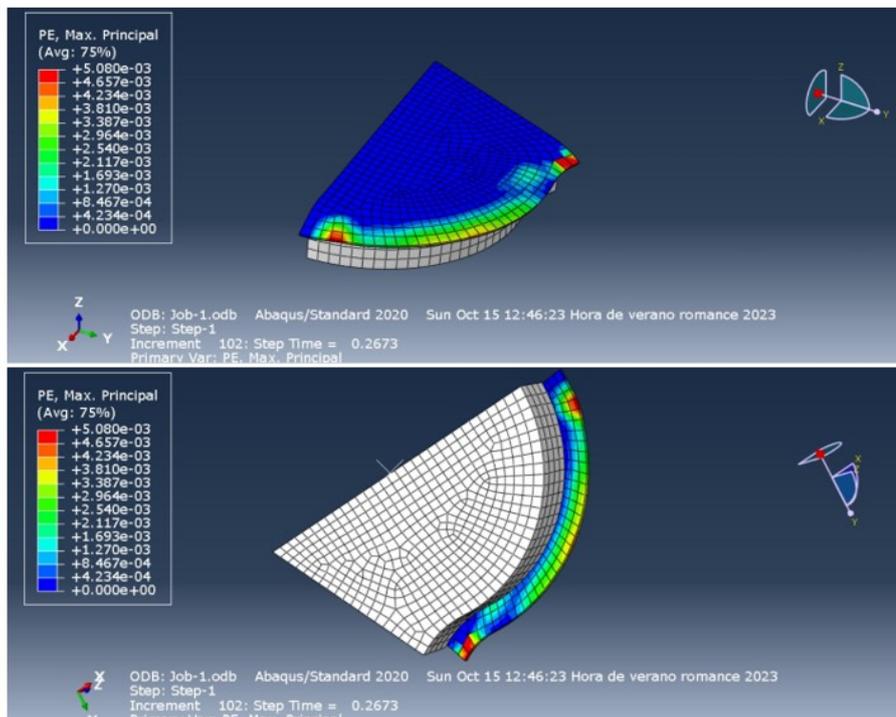


Figura 4.8 Deformación logarítmica máxima principal en la chapa. Diseño preliminar.

La principal conclusión obtenida a partir de este modelo es que la solución deja de converger en el momento en el que la goma toma contacto con la mesa rígida inferior. Aún así, este modelo se tomó como una primera estimación en el proceso de modelado. Por ello, se pasó a un nuevo modelo donde la fuerza aplicada pueda emplearse en su mayor parte en la deformación de la propia chapa y no en el desplazamiento y deformación de la goma, como se verá a continuación.

La fuerza en estos primeros instantes del rebordeado de la chapa alcanzó un valor total de 51 kN (seis veces la calculada por el modelo de 60°) como muestra la Figura 4.9. Este valor está aún lejos de la capacidad de la prensa a utilizar, en torno a 1 o 1,5 MN.

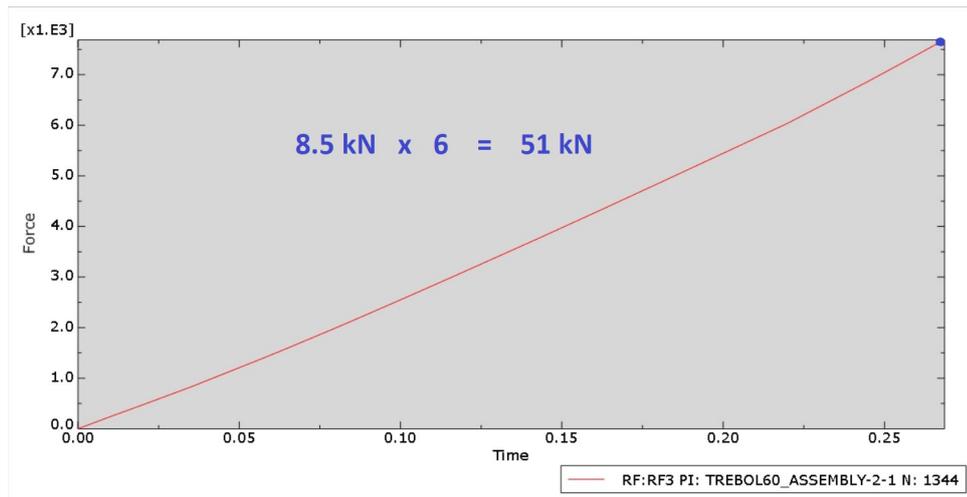


Figura 4.9 Fuerza necesaria en modelo preliminar.

4.3 Rebordeado con útil adicional de goma y prensachapas

La conclusión principal extraída del modelo anterior es que la convergencia de la solución se interrumpe cuando la goma toma contacto con la mesa rígida inferior. Por lo tanto, se procedió a desarrollar un nuevo modelo en el cual la fuerza aplicada pueda ser utilizada principalmente para deformar la chapa en sí misma, en lugar de ser absorbida por el desplazamiento y deformación de la goma.

En este nuevo modelo, los parámetros geométricos empleados son $R_{stretch} = 30$ mm, $R_{shrink} = 70$ mm y $h_0 = 20$ mm. Por otro lado, para optimizar la fuerza aplicada, se ha incluido un útil adicional de goma sobre la pestaña de la misma, de forma que se aumente la presión en dichos puntos (Figura 4.10 (7)). Además, también se ha modificado la geometría de la matriz para que esta también guíe al útil adicional de goma y ejerza presión de forma continua sobre la pestaña (Figura 4.10 (8)). Por último, se ha incluido un prensachapas (Figura 4.10 (6)) para sujetarla, de forma que no rote cuando el útil haga presión.

Los resultados obtenidos en este segundo caso son los mostrados en la Figura 4.11. En dicha Figura puede verse cómo la chapa de AA7075-O sigue siendo el único elemento del modelo que presenta deformaciones plásticas.

En la Figura 4.12 se observa la deformación plástica la chapa. De dicha Figura se saca la principal conclusión para esta simulación: con este tipo de geometría (trébol con pestaña plegada en

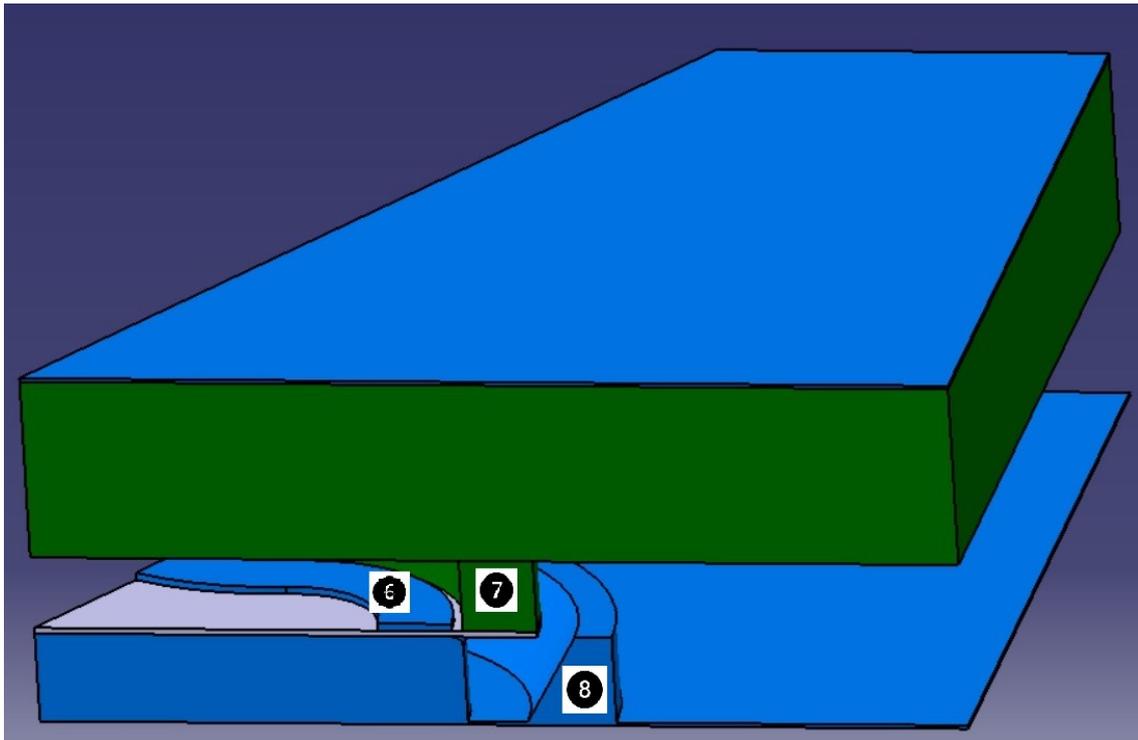


Figura 4.10 Geometría del modelo con útil adicional de goma y prensachapas.

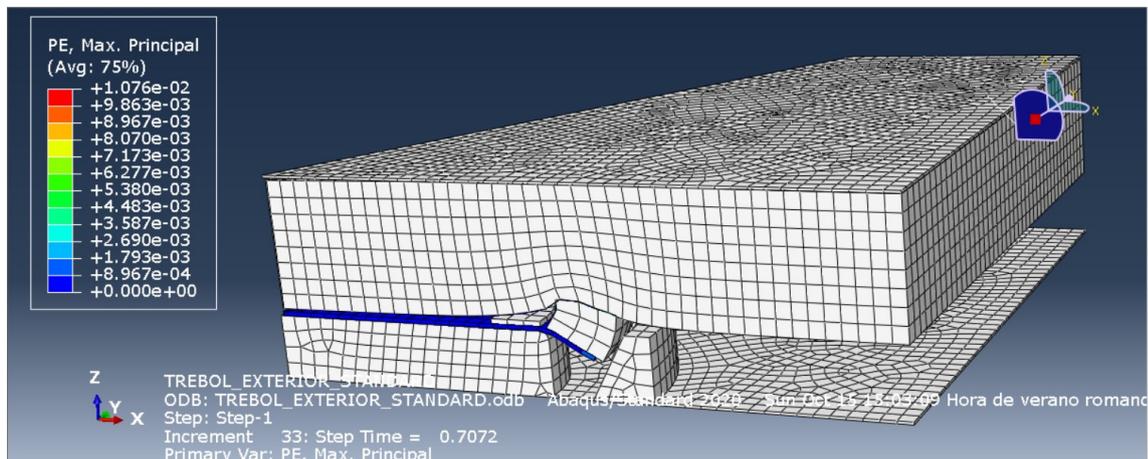


Figura 4.11 Deformación máxima principal en Assembly. Diseño con útil de goma y prensachapas.

su contorno exterior), se produce fallo por arrugamiento de forma importante, quedando además todavía muy lejos del fallo por estricción.

Además, para este caso también se ha representado la fuerza necesaria para deformar la chapa, como puede verse en la Figura 4.13. Como se observa, la fuerza comienza a ascender debido a la aparición de la arruga, la cual se deforma provocando una rigidización de la chapa.

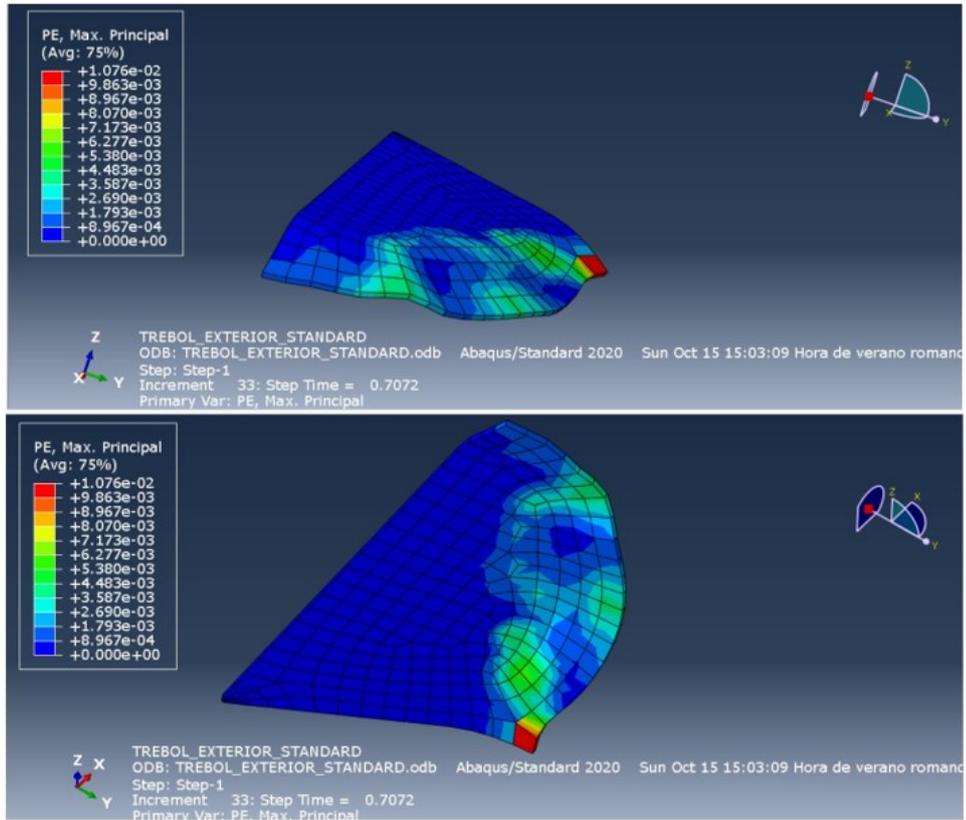


Figura 4.12 Deformación máxima principal en la chapa. Diseño con útil de goma y prensachapas.

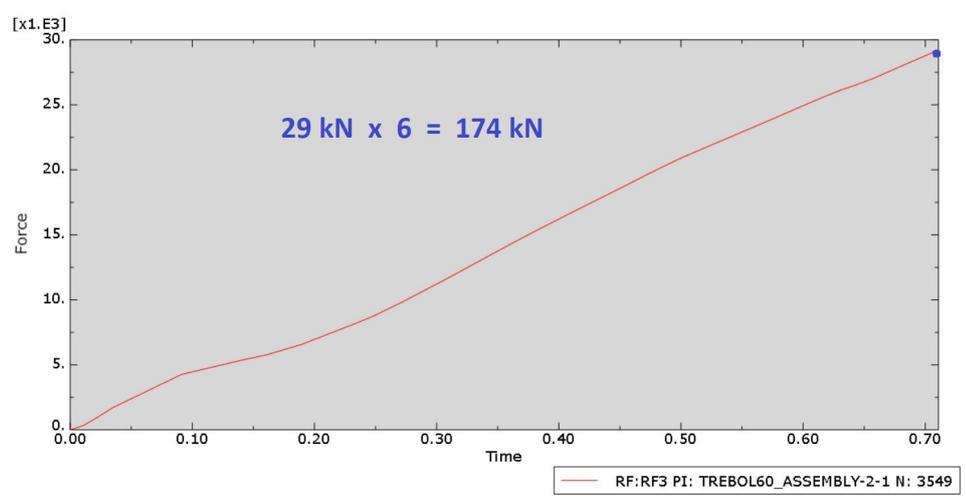


Figura 4.13 Fuerza necesaria en modelo con útil de goma y prensachapas.

4.4 Rebordeado con geometría alternativa

Tras concluir que la geometría expuesta anteriormente presenta altos problemas de fallo por arrugamiento, se modela una nueva geometría (chapa con agujero precortado inicial con forma de trébol), como se mostró en la Figura 2.32 (a). Esta geometría ha sido nuevamente modelada en CATIA aprovechando la doble simetría del problema, como se observa en la Figura 4.14. La chapa y la matriz se observan con detalle en la Figura 4.15. Los nuevos parámetros geométricos empleados

han sido: $R_{stretch} = 50$ mm, $R_{shrink} = 60$ mm y $h_0 = 20$ mm.

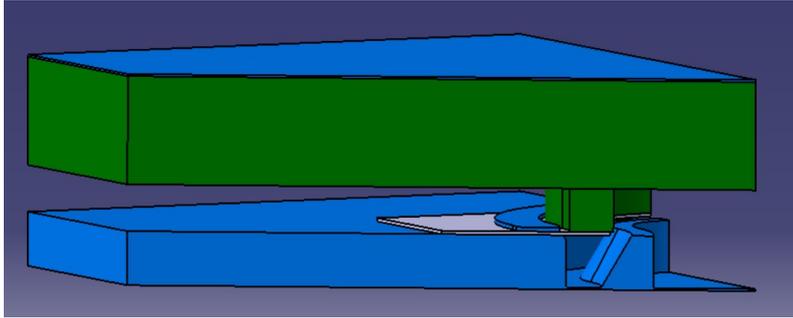


Figura 4.14 Geometría del modelo interior con útil adicional de goma y prensachapas.

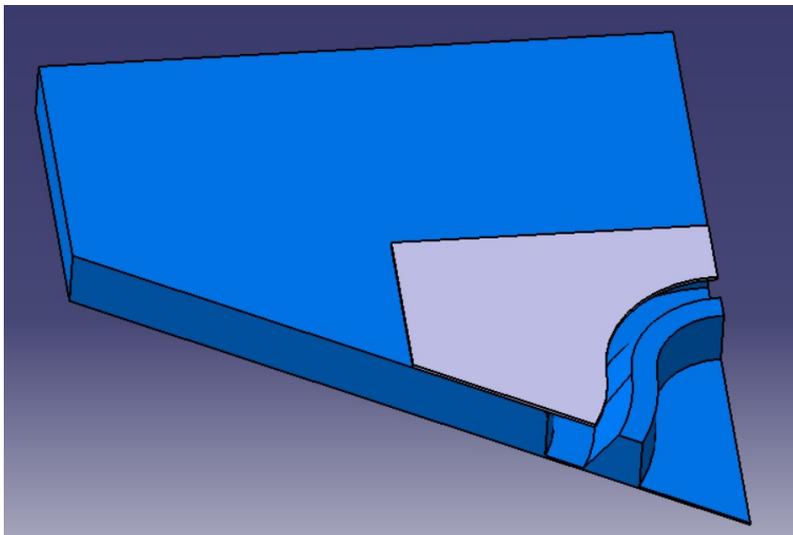


Figura 4.15 Detalle de la chapa del modelo interior.

Los resultados obtenidos para este tercer modelo son presentados a continuación.

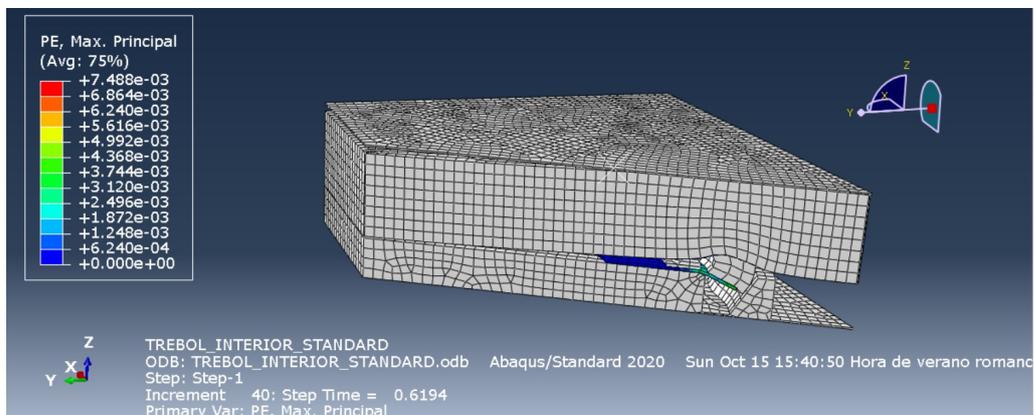


Figura 4.16 Deformación máxima principal en Assembly. Diseño geometría interior con útil de goma y prensachapas.

En la Figura 4.17 puede verse cómo se soluciona el problema de fallo por arrugamiento tan severo que se observaba con el modelo anterior. Por dicho motivo, se decidió dicho modelo preliminar. No obstante, el modelo se sigue quedando muy lejos del fallo por estricción.

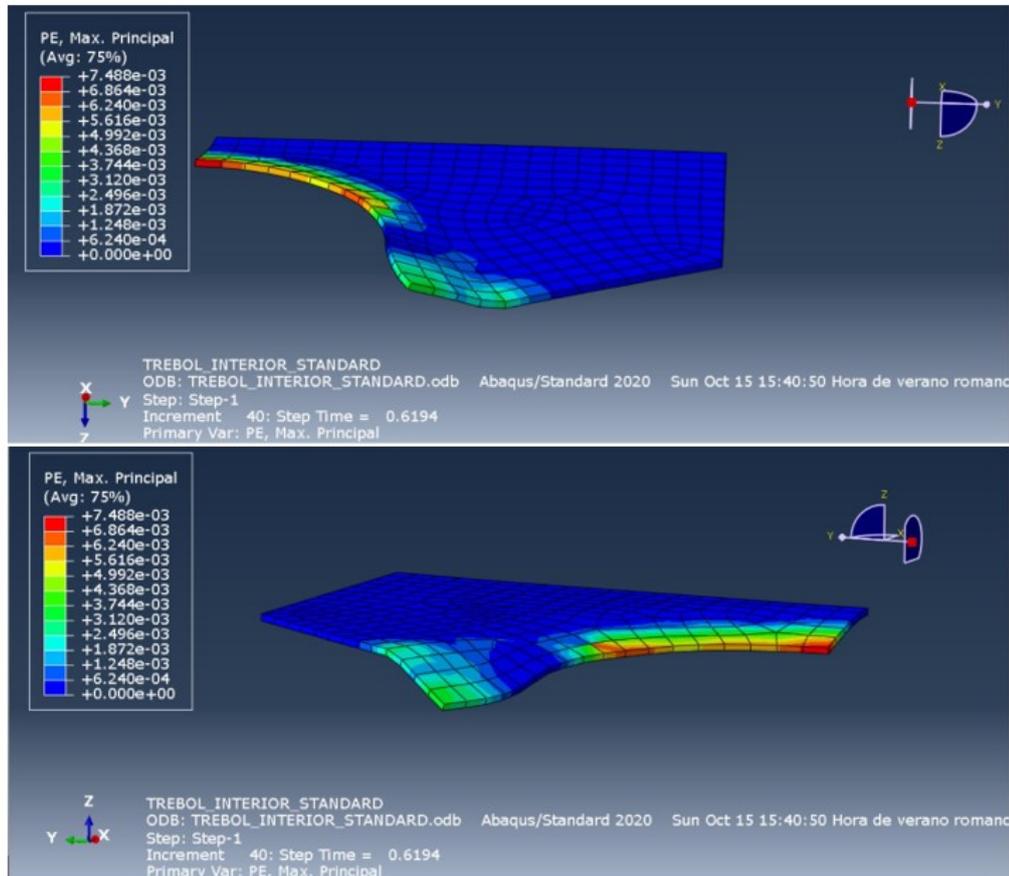


Figura 4.17 Deformación máxima principal en la chapa. Diseño geometría interior con útil de goma y prensachapas.

De nuevo, se representa la fuerza necesaria para realizar el plegado de la chapa (Figura 4.18).

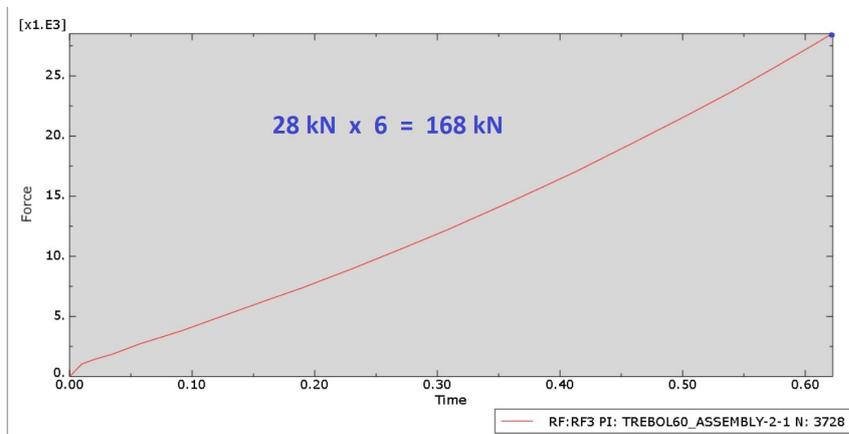


Figura 4.18 Fuerza necesaria en modelo interior con útil de goma y prensachapas.

Sin embargo, a pesar de obtener un buen modelo con unos resultados razonables, la solución no es capaz de converger hasta el final del plegado. Por este motivo, se decidió pasar a un nuevo modelo empleando Abaqus/Explicit.

4.5 Resumen de resultados

Como conclusiones principales tras la realización de los modelos preliminares, destacan:

1. Es necesario modificar la geometría del modelo para que la fuerza aplicada se concentre en la deformación de la chapa. Así también se evitará que la solución deje de converger cuando la goma tome contacto con la placa inferior.
2. La geometría con forma de trébol plegando la pestaña por su perímetro exterior presenta serios problemas de arrugamiento estando aún muy lejos del fallo por estricción, por lo que es necesario plantear una geometría alternativa a esta.
3. Con la geometría alternativa, plegando la pestaña sobre el agujero interior precortado, se reducen los problemas de arrugamiento observados previamente.
4. Con Abaqus/Standard no es posible obtener una solución convergente hasta el final del plegado, por lo que es necesario pasar a un modelo en Abaqus/Explicit.
5. Aunque la fuerza de plegado parece razonable, aún no puede concluirse nada hasta obtener un modelo completo.

5 Simulaciones con Abaqus/Explicit

A pesar de obtener un modelo con resultados aceptables mediante Abaqus/Standard, la solución no logra alcanzar la convergencia completa hasta el final del proceso de plegado. Por este motivo, se decidió pasar a un nuevo modelo empleando Abaqus/Explicit. De nuevo, se presentarán las simulaciones numéricas realizadas, esta vez con una malla más refinada, y se analizarán los resultados obtenidos en ellas.

5.1 Integración implícita y explícita

En el procedimiento implícito del método de los elementos finitos se resuelve un conjunto acoplado de ecuaciones mediante un método de solución directa. Abaqus/Standard utiliza un incremento automático basado en el método de solución iterativa completa de Newton, de tal forma que se satisfaga el equilibrio dinámico al final del incremento en el tiempo $t + \Delta t$ y puedan calcularse desplazamientos al mismo tiempo. Este incremento de tiempo, Δt , es relativamente grande en comparación con el utilizado en el método explícito.

Sin embargo, es posible que no pueda lograrse la convergencia del problema si el modelo contiene procesos altamente discontinuos, como contacto y deslizamiento por fricción. Por ello, son necesarias disminuciones en el tamaño de dicho incremento, pudiendo llegar a ser del mismo orden que un incremento de tiempo estable típico para un análisis explícito, sin dejar de conllevar el alto costo de solución de la iteración implícita [13].

Con el método explícito el estado del modelo avanza a través de un incremento de tiempo, Δt , basado en el estado del modelo al inicio del incremento en el momento t . Este incremento de tiempo de avance debe ser pequeño para que la solución del problema siga siendo precisa y fiable. Si el incremento de tiempo es mayor que una cierta cantidad máxima de tiempo, se dice que el incremento ha excedido el límite de estabilidad, lo que conduciría a una inestabilidad numérica.

Generalmente no es posible determinar exactamente el límite de estabilidad, por lo que en su lugar se utilizan estimaciones conservadoras. Para lograr eficiencia computacional, Abaqus/Explicit elige los incrementos de tiempo para que estén lo más cerca posible del límite de estabilidad sin excederlo [14]. El límite de estabilidad se puede definir utilizando la longitud del elemento, L^e , y la velocidad de onda del material, c_d [15]:

$$\Delta t_{stable} = \frac{L^e}{c_d}$$

La velocidad de onda es una propiedad del material. Para un material elástico lineal con una relación de Poisson de cero se tiene:

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

donde E es el módulo de Young y ρ es la densidad de masa. Cuanto más rígido es el material, mayor es la velocidad de la onda, lo que resulta en un límite de estabilidad menor. Por el contrario, cuanto mayor es la densidad, menor es la velocidad de la onda, lo que da como resultado un límite de estabilidad mayor [15].

Dado que la densidad de masa influye en el límite de estabilidad, en algunas circunstancias, escalar la densidad de masa puede aumentar potencialmente la eficiencia de un análisis. Por ejemplo, debido a la compleja discretización de muchos modelos, a menudo hay regiones que contienen elementos muy pequeños o mal formados que controlan el límite de estabilidad. Estos elementos de control suelen ser pocos y pueden existir en áreas localizadas.

Las funciones de escalado masivo automático (*mass scaling*) en Abaqus/Explicit pueden evitar que estos elementos controlen el límite de estabilidad. Hay dos enfoques fundamentales utilizados en el *mass scaling*: definir un factor de escala directamente o definir un incremento de tiempo estable elemento por elemento deseado para los elementos cuya masa se va a escalar. Sin embargo, abusar de forma excesiva de ello puede cambiar significativamente la física del problema [16].

Como el problema bajo estudio puede considerarse cuasi-estático (fuerzas de inercia despreciables) puede hacer uso de la simplificación con *mass scaling* para reducir el tiempo de computación, controlando que la solución converja, para lo que la energía cinética tiene que ser pequeña.

5.2 Rebordeado interior con cojín y útil de goma

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el modelo empleando Abaqus/Explicit. Para ello, se ha empleado un *mass scaling* de 10^{-5} y dos combinaciones de parámetros de $R_{stretch}$, R_{shrink} y h_0 , de forma que se obtenga un caso en el que el fallo se produzca por arrugamiento de la pestaña y otro en el que se produzca por estricción en la misma. Además, en este nuevo modelo la chapa es de tipo *shell*, de modo que Abaqus pueda calcular las deformaciones principales en el plano de la misma, que son las variables que se desean analizar en el FLD.

5.2.1 Caso 1: fallo por arrugamiento

En este primer caso, la geometría empleada es: $R_{stretch} = 50$ mm, $R_{shrink} = 75$ mm y $h_0 = 20$ mm. Una mejora añadida en este modelo es la partición tanto de la chapa como del útil de goma para realizar un mallado estructurado (Figuras 5.1 y 5.2). Gracias a este nuevo mallado, en la chapa se ha podido aumentar la distancia entre nodos en aquellas partes lejanas a la pestaña, disminuyendo así el tiempo de cálculo. Además, en estas Figuras pueden observarse los tres caminos creados para analizar sus trayectorias de deformación. En cada uno de ellos se tendrán en cuenta tres puntos: punto A (perteneciente a la zona de plegado), punto B (perteneciente a la zona media de la pestaña) y punto C (perteneciente al borde libre de la pestaña).

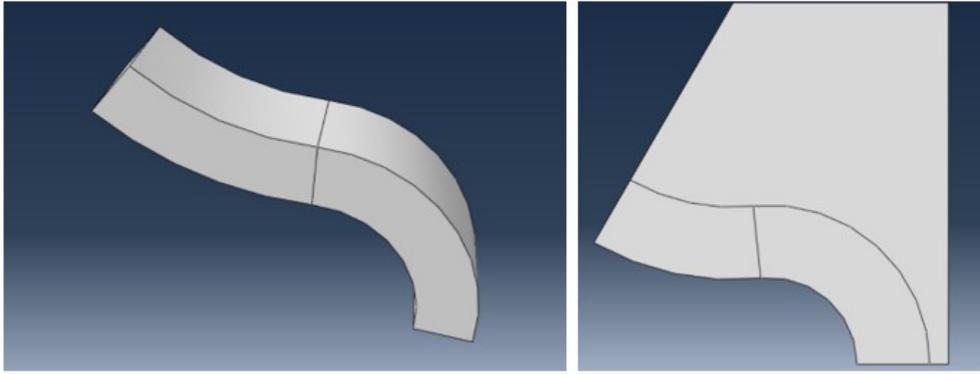


Figura 5.1 Partición realizada en chapa y útil de goma para realizar un mallado estructurado.

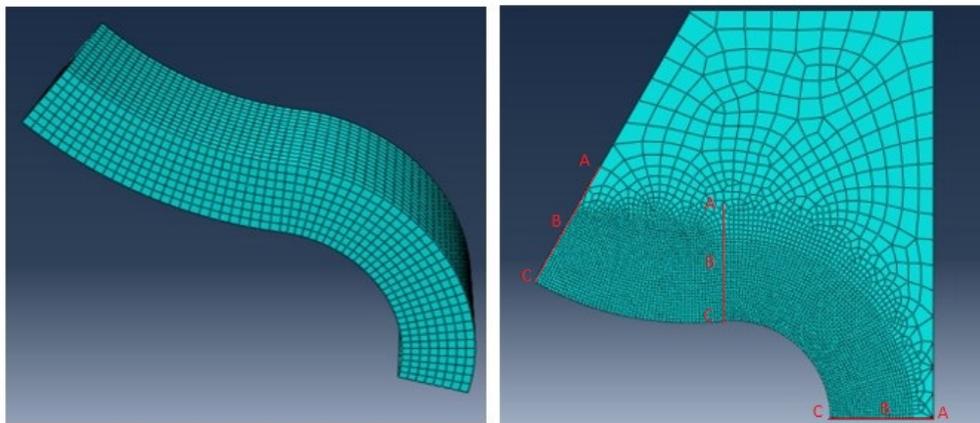


Figura 5.2 Mallado estructurado en chapa y útil de goma.

En las Figuras 5.3 y 5.4 se observa que el proceso de rebordeado no se ha completado, tratándose así de un proceso fallido. Esto es debido a la aparición de arrugas, que rigidizan la chapa y evita que se pliegue en su totalidad.

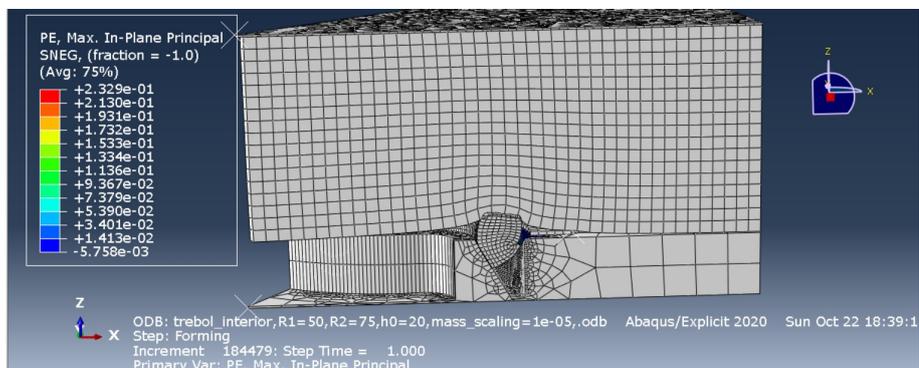


Figura 5.3 Deformación máxima principal en Assembly. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por arrugamiento.

En la Figura 5.4 puede observarse la deformación máxima obtenida en la chapa. Como se observa, la deformación en la parte traccionada no supera el valor 0,5, por lo que se concluye que, con esta geometría, la chapa no falla por estricción. Sin embargo, se observan arrugas en la parte de la chapa sometida a compresión. Por tanto, para esta geometría, la chapa falla por arrugamiento.

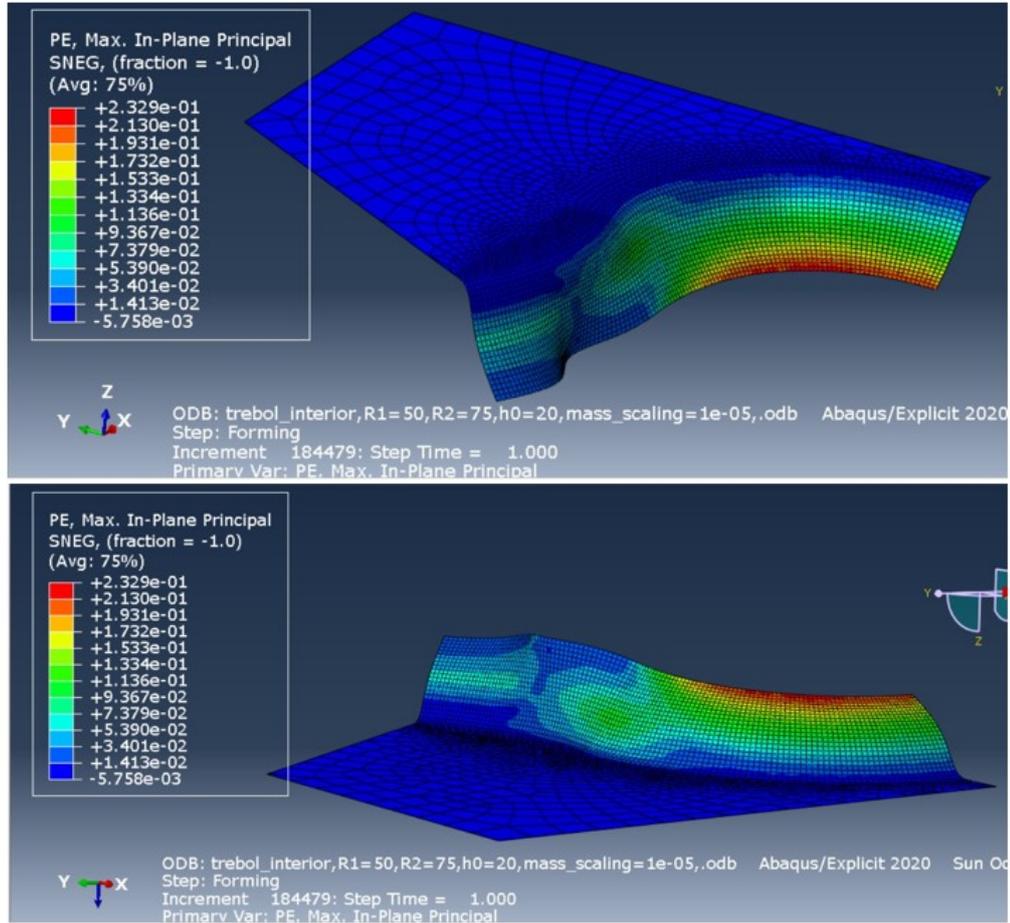


Figura 5.4 Deformación máxima principal en la chapa. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por arrugamiento.

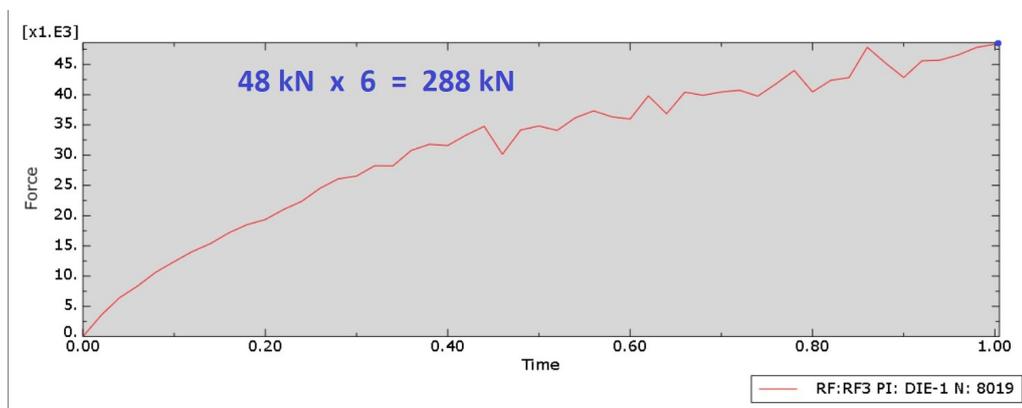


Figura 5.5 Fuerza necesaria en modelo Explicit para caso con fallo por arrugamiento.

Además, la fuerza total necesaria para realizar esta operación es de 288 kN (Figura 5.5), por lo que también puede concluirse que la fabricación de la misma es viable.

Por último, se ha representado el Diagrama Límite de Conformado (Figura 5.6) con la distribución de deformación a lo largo de tres caminos sobre la pestaña rebordeada (véase la Figura 5.2), tanto en la cara superior de la chapa como en la inferior. Como se puede apreciar, la deformación principal máxima en la cara superior de la chapa es siempre mayor que en la cara inferior. En la zona del pliegue se aprecia un gran gradiente de deformación en el espesor (los puntos A en ambas caras están muy separados en el FLD). En el resto de la pestaña el gradiente tiende a decaer rápidamente al llegar al borde (los puntos C están próximos entre sí). Además, las distribuciones de deformación están por debajo de la FLC, de forma que no se predice un fallo por estricción localizada en ninguna de las regiones de la chapa.

El fallo por arrugamiento no puede predecirse tan fácilmente en el Diagrama Límite de Conformado. Para predecir las arrugas habría que hacer un estudio de la esbeltez de la chapa (relación entre la longitud de tramo curvo y el espesor) y la fuerza de compresión sobre dicho tramo, empleando un criterio de pandeo. No obstante, el fallo por arrugamiento sí queda reflejado por las deformaciones por debajo de la recta $\beta = -2$. Este es el caso del camino "shrink" (Figura 5.6 a), donde toda la zona de la chapa cercana al borde (puntos C en ambas caras) está por debajo de esa recta. En el camino "transition" (Figura 5.6 b) no está tan claro el fenómeno de arrugamiento dado que solo la cara inferior de la chapa sobrepasa la recta límite.

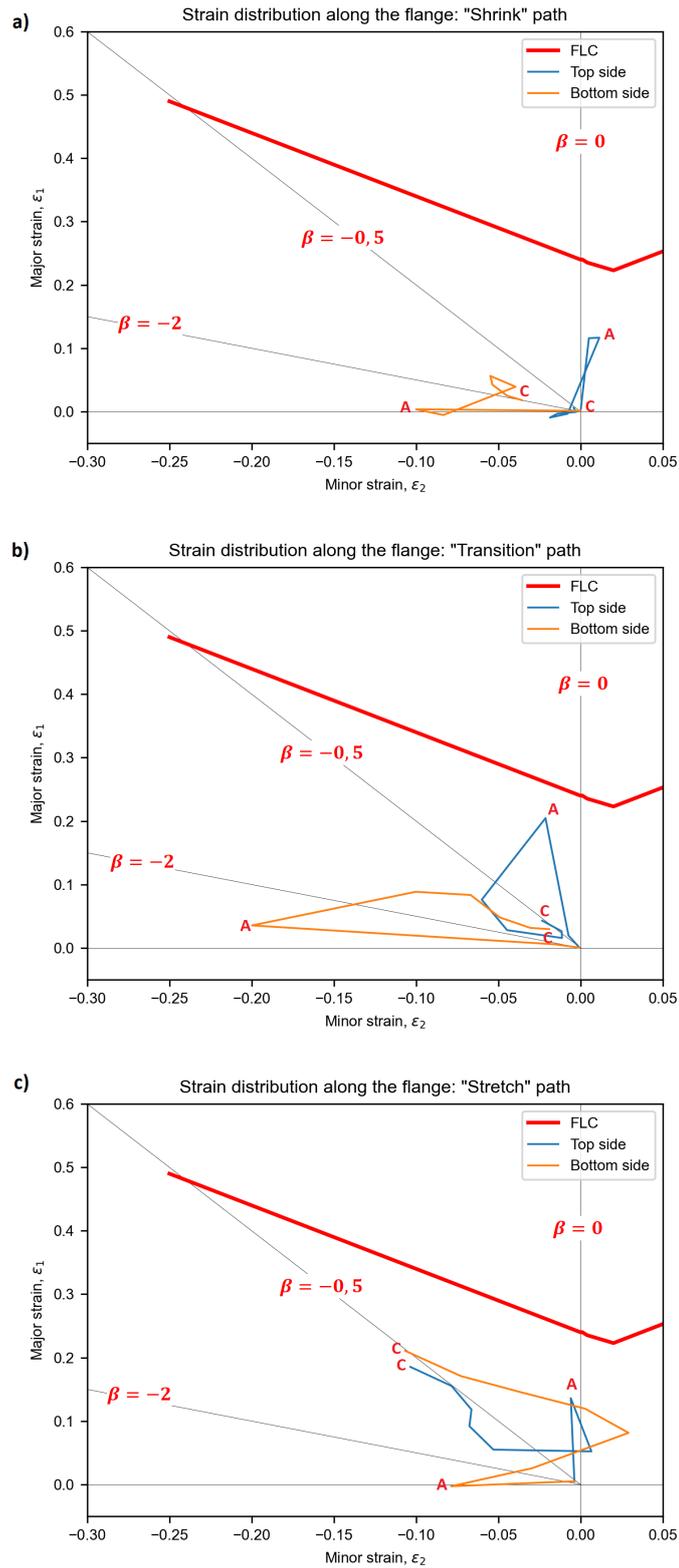


Figura 5.6 FLD con la evolución de las trayectorias de deformación a lo largo de la pestaña final. Caso con fallo por arrugamiento.

5.2.2 Caso 2: fallo por estricción

En este segundo caso, la geometría empleada es: $R_{stretch} = 75$ mm, $R_{shrink} = 50$ mm y $h_0 = 31$ mm. Esta nueva geometría puede verse en la Figura 5.7. En dicha imagen se observan también los tres caminos creados para analizar sus trayectorias de deformación.

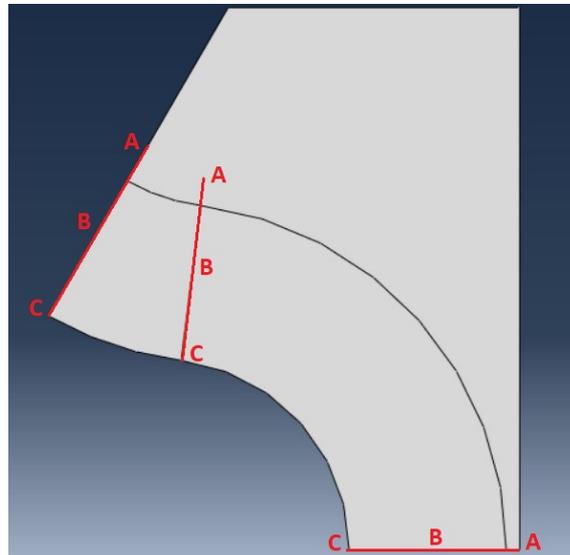


Figura 5.7 Geometría de la chapa. Modelo en Abaqus/Explicit. Caso con fallo por estricción.

En este caso sí se obtiene un rebordeado completo de la chapa, como se ve en la Figura 5.8. Como puede apreciarse, la goma ha entrado casi por completo en la cavidad entre la matriz y el dique, obligando así a la chapa a plegarse completamente contra la matriz.

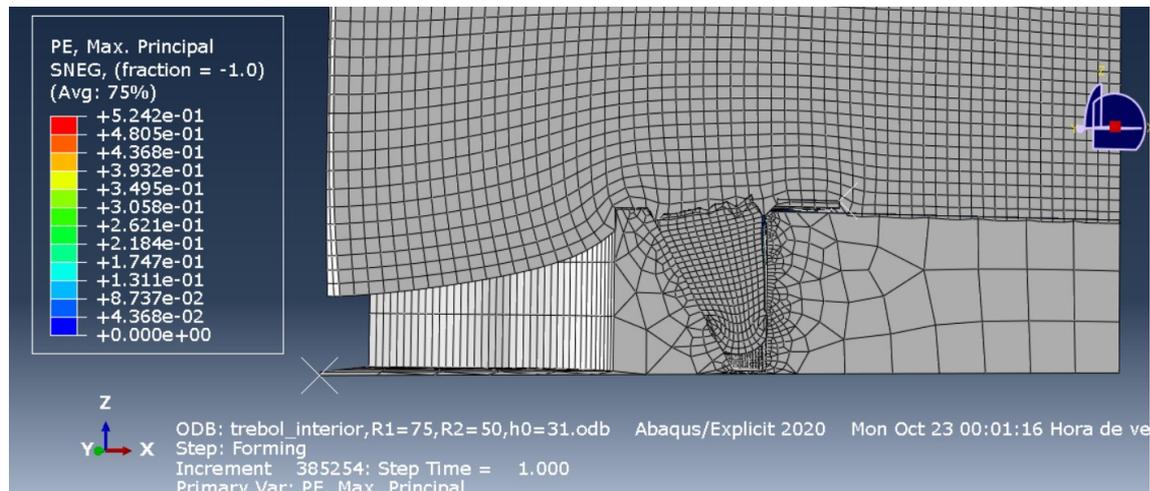


Figura 5.8 Deformación máxima principal en Assembly. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por estricción.

En la Figura 5.9 puede observarse la deformación máxima obtenida en la chapa. En este caso, la deformación en la parte traccionada sí supera el valor 0,5, quedando además muy cerca de este, por lo que se concluye que, con esta geometría, el fallo es por estricción, quedándose cerca del mismo.

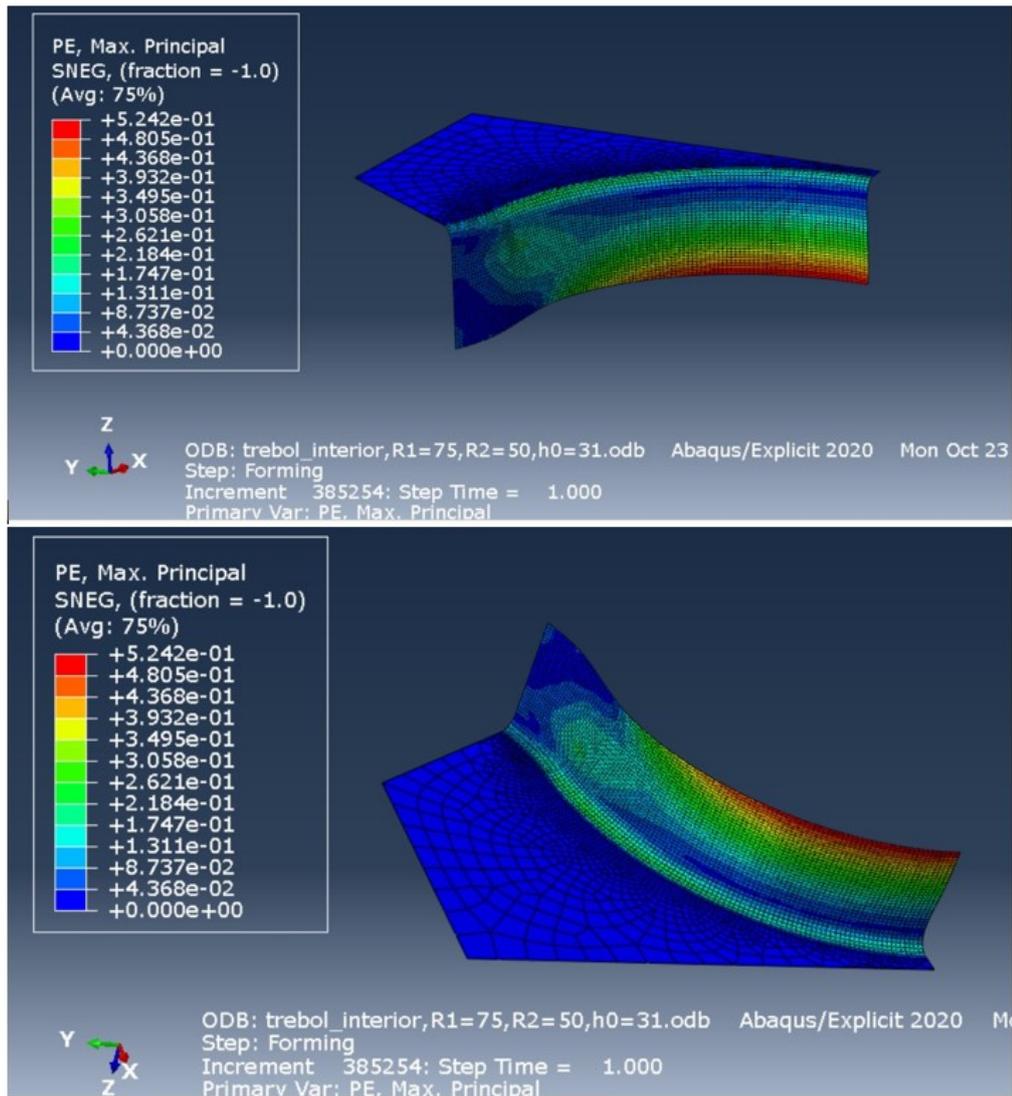


Figura 5.9 Deformación máxima principal en la chapa. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por estricción.

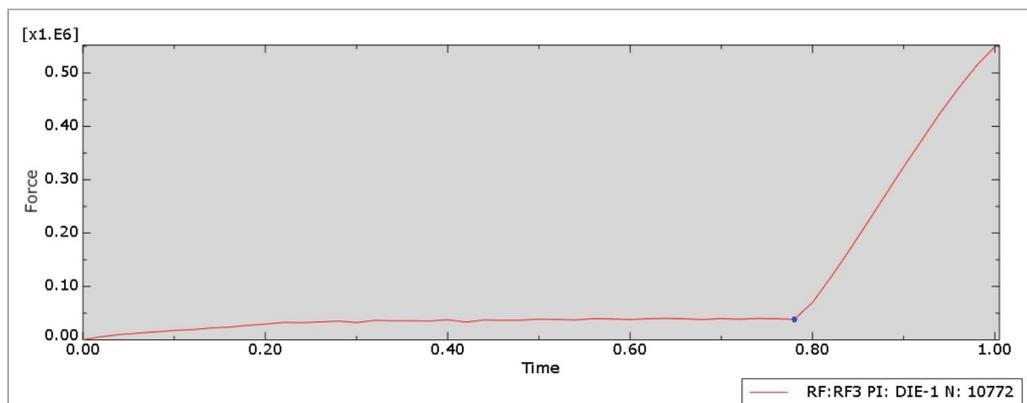


Figura 5.10 Fuerza necesaria en modelo Explicit para caso con fallo por estricción.

Si se representa la fuerza total necesaria para realizar dicha operación (Figura 5.10), se observa que el valor de la misma se dispara para un *time* aproximado de 0,77. No obstante, se ha comprobado

que el rebordeado completo de la pestaña se produce en un tiempo anterior al mismo, por lo que a partir de dicho instante lo que se produce es un trabajo redundante de compresión de la goma que hace que la fuerza se dispare. Así, se considera que la fuerza necesaria es la última obtenida antes del aumento brusco de pendiente, siendo, por tanto, de 231 kN, como muestra el detalle de la Figura 5.11. Estamos, de nuevo, ante un proceso de fabricación viable.

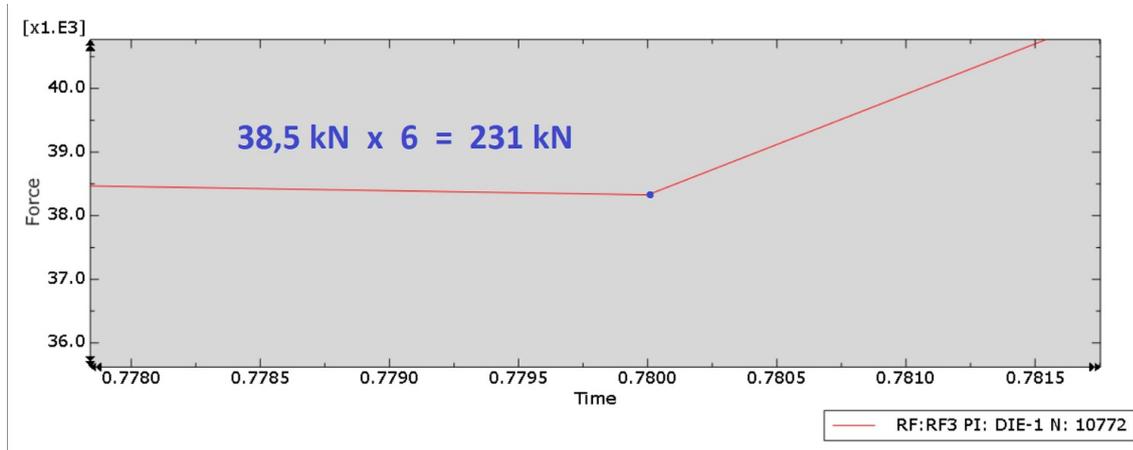


Figura 5.11 Detalle de la fuerza necesaria en para caso con fallo por estricción.

Por último, se ha representado de nuevo el Diagrama Límite de Conformado con la distribución de deformación a lo largo de los tres caminos indicados en la Figura 5.7. Al igual que en el caso anterior, se aprecia un gradiente importante en el pliegue (puntos A muy alejados entre sí). En cuanto a la Figura 5.12 (a), que representa el camino sometido a compresión, se observa que ambos puntos C están sobre la recta $\beta = -2$, esto es, técnicamente está al límite del arrugamiento. Sin embargo, conforme se aleja del borde (Figuras (b) y (c)), dicho riesgo desaparece, como era de esperar. En cuanto al camino ubicado en la parte de la chapa sometida a tracción (Figura (c)), se aprecia cómo los dos puntos C están casi sobre la FLC, uno por encima y otro por debajo. Esto indica que el fallo por estricción localizada sería inminente si no se produce en un ensayo real. Para asegurar que se produzca el fallo en la práctica se recomienda usar una pestaña un poco más larga, por ejemplo de 32 mm.

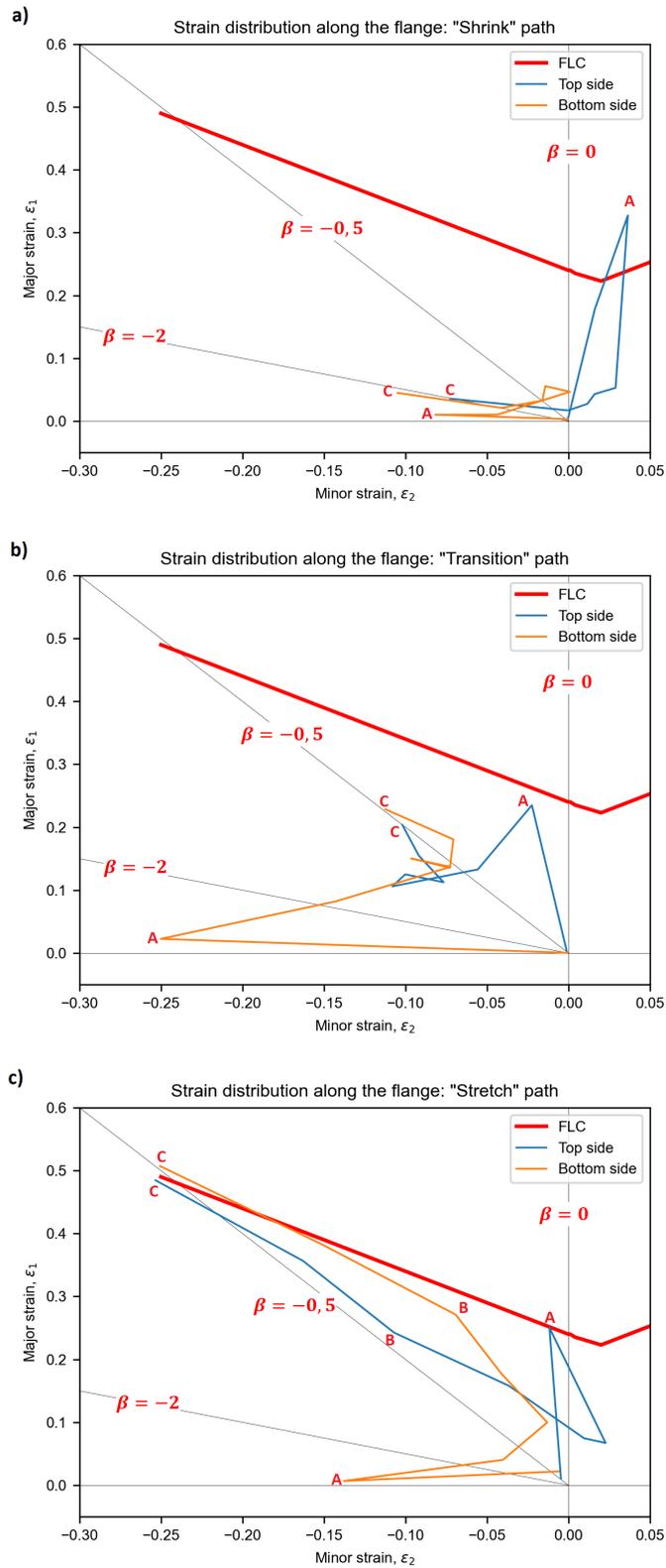


Figura 5.12 FLD con la evolución de las trayectorias de deformación a lo largo de la pestaña final. Caso con fallo por estricción.

5.3 Resumen de resultados

Las conclusiones principales obtenidas para los modelos realizados con Abaqus/Explicit son las siguientes:

1. El uso de Abaqus/Explicit permite obtener una simulación completa del problema.
2. La geometría del problema (parámetros R_{shrink} , $R_{stretch}$ y h_0) es determinante a la hora de predecir el tipo de fallo que se obtendrá.
3. Añadir un mallado estructurado reduce notablemente el tiempo de cálculo y mejora de forma significativa la solución alrededor de la pestaña de la chapa.
4. Es posible la obtención de chapas tanto con fallo por arrugamiento como con fallo por estricción. La fuerza de conformado en ambos casos es viable.
5. La fuerza de conformado necesaria para el caso con fallo por arrugamiento es superior debido a que la propia arruga rigidiza la chapa.
6. Aunque existan puntos en alguna de las caras de la chapa con una alta deformación, puede no ocurrir el fallo de la misma si existe un gran gradiente a lo largo de su espesor.

En la Tabla 5.1 se recopilan los resultados obtenidos para los dos casos simulados.

Tabla 5.1 Resumen de resultados obtenidos con Abaqus/Explicit.

	Tipo de fallo	Fuerza de conformado (kN)
$R_{stretch} = 50mm, R_{shirk} = 75mm, h_0 = 20mm$	Arrugamiento	288
$R_{stretch} = 75mm, R_{shirk} = 50mm, h_0 = 31mm$	Estricción localizada	231

6 Conclusiones y líneas futuras de trabajo

En este proyecto se ha realizado un estudio numérico con Abaqus del proceso de rebordeado con placas de poliuretano de chapas de AA7075-O para evaluar el diseño de un prototipo de probeta para ensayos con dos configuraciones de perfil cerrado: pestaña exterior e interior. Las principales conclusiones del proyecto son las siguientes:

1. Simulaciones válidas solo con Abaqus/Explicit.

Las primeras simulaciones con Abaqus/Standard enfrentaron dificultades de convergencia debido a la complejidad del problema, principalmente relacionada con los contactos y las deformaciones significativas de los componentes no rígidos. Sin embargo, al emplear Abaqus/Explicit, se logró reducir los tiempos de computación de las simulaciones hasta las 8 horas usando un *mass scaling* de 10^{-5} .

2. Configuración de probeta con pestaña exterior inadecuada.

Las simulaciones realizadas sobre el modelo de probeta con pestaña exterior indican un riesgo significativo de fallo debido a la formación de arrugas, independientemente de los valores de los radios $R_{stretch}$ y R_{shrink} . La reducción de la longitud de la pestaña resulta en la prevención de la formación de arrugas. Respecto al modo de fallo por estricción localizada, las simulaciones indican que esto no puede ocurrir sin la aparición previa de arrugas en las áreas comprimidas de la pestaña.

3. Configuración de probeta con pestaña interior adecuada.

Por otro lado, al seleccionar los parámetros apropiados para la probeta con la pestaña interior, las simulaciones indican que es factible lograr el objetivo de inducir ambos modos de fallo, ya sea por arrugamiento (por ejemplo, $R_{stretch} = 50$ mm, $R_{shrink} = 75$ mm, $h_0 = 20$ mm) o por estricción localizada (por ejemplo, $R_{stretch} = 75$ mm, $R_{shrink} = 50$ mm, $h_0 = 31$ mm). Sin embargo, es importante destacar que la fuerza requerida en el proceso convencional utilizando placas de poliuretano excede significativamente la capacidad de una prensa de 1,5 MN.

4. Disminución de fuerza con goma personalizada adicional.

Para reducir la fuerza requerida de la prensa, se ha propuesto la incorporación de un componente personalizado de poliuretano entre la placa de poliuretano y la chapa, el cual tiene la forma correspondiente a la pestaña a conformar. Además, se ha diseñado una herramienta rígida en forma de dique para controlar la presión ejercida por este elemento elástico sobre la pestaña. Las simulaciones demuestran que este proceso de rebordeado resulta más eficiente que cuando se utiliza únicamente la placa flexible, ya que permite el doblado de la pestaña al completo y con una fuerza que no excede los 300 kN. No obstante, esto aumenta la complejidad del problema, duplicando el tiempo de cálculo del mismo.

Finalmente, se sugieren las siguientes líneas futuras de trabajo para dar continuidad al proyecto y ampliar el trabajo realizado hasta el momento:

1. Estudio experimental del proceso de rebordeado.

Se propone emplear los resultados obtenidos en las simulaciones como base para el diseño y ejecución del estudio experimental planteado en el proyecto de investigación. Con ello se comprobará que con la configuración de probeta con pestaña exterior no puede conseguirse el modo de fallo por estricción localizada sin la aparición previa de arrugas. Además, se verificará el alto riesgo de fallo debido a la formación de arrugas, sin importar los valores de los radios $R_{stretch}$ y R_{shrink} . En caso de no contar con una prensa de capacidad adecuada, se recomienda considerar el uso del elemento de goma personalizada igualmente.

2. Reutilización de los modelos Abaqus.

Los modelos realizados en Abaqus durante este Trabajo pueden ser utilizados nuevamente con diferentes tipos de materiales para estudiar la influencia de estos sobre el proceso de conformado. Una propuesta interesante sería repetir dichas simulaciones para un material con envejecimiento.

3. Comparativa del rebordeado de la probeta analizada mediante otros procesos de conformado.

Las simulaciones realizadas durante este Trabajo, empleando rebordeado con bloques de poliuretano, pueden ser contrastadas con el proceso convencional con punzón y con el rebordeado mediante SPIF. En consecuencia, se sugiere simular todos estos procedimientos de conformado y llevar a cabo una evaluación comparativa entre ellos.

Índice de Figuras

2.1	Ejemplos de productos fabricados en conformado de chapa	6
2.2	Procesos de doblado de chapa: (a) chapa plegada a lo largo de línea recta; (b) plegado en V; (c) plegado en voladizo; (d) plegado de perfiles con rodillos [3]	6
2.3	Proceso de conformado de chapa por estirado [3]	7
2.4	Proceso de conformado de chapa por estampación [3]	8
2.5	Proceso de conformado por embutición [2]	8
2.6	Tipos de pestañas en el conformado de chapa por rebordeado [1]	9
2.7	Procesos de doblado de chapa con directriz curva: (a) pestaña a compresión; (b) pestaña a tracción	9
2.8	Piezas aeronáuticas típicas fabricadas por rebordeado [2]	9
2.9	Ejemplo de proceso de conformado incremental de un solo punto (SPIF) [1]	10
2.10	Ejemplo de piezas de geometría compleja conseguidas con SPIF [1]	11
2.11	Esquema del ensayo de Marciniak [3]	11
2.12	Esquema del ensayo de Nakazima [3]	11
2.13	Geometrías de probetas en ensayos Nakazima [3]	12
2.14	Estricciones localizadas encontradas durante la producción de piezas de automóviles [5]	12
2.15	Ejemplo de grieta encontrada en una chapa conformada [5]	13
2.16	Modos de fractura dúctil: (a) por cortante; (b) por nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos en la microestructura [3]	13
2.17	Ejemplo de fallo por arrugamiento en operaciones de embutición [5]	13
2.18	Diagrama límite de conformado esquemático con las curvas límite de conformado por estricción (FLC) para varios materiales [3]	15
2.19	Ejemplo práctico de obtención experimental de la curva límite de conformado (FLC) [3]	15
2.20	Pestañas de orificios precortados con diámetros de 59 (fracturado), 60 (estricción) y 61 mm (exitoso) con un radio de borde del punzón de 6 mm [6]	16
2.21	Trayectorias de deformación en el plano de la chapa durante el proceso de rebordeado de agujeros obtenidas de las pruebas interrumpidas utilizando el agujero precortado de 61 mm de diámetro y un radio de borde del punzón de 6 mm [6]	17
2.22	(a) Configuración experimental para SPIF. (b) Esquema del proceso de rebordeado de agujeros de una sola etapa por SPIF. (c) Esquema de la trayectoria en z para el tronco cónico y la trayectoria helicoidal cilíndrica. [7]	18
2.23	FLD con la evolución de las trayectorias de deformación a lo largo de la pestaña final para: (a) diferentes diámetros de orificios precortados para un radio de herramienta determinado; (b) pruebas exitosas con los diámetros mínimos de orificios precortados; y (c) pruebas fallidas más cercanas al éxito [7]	18
2.24	Configuración experimental utilizada en los experimentos de rebordeado SPIF [1]	20

2.25	Esquema de las trayectorias de la herramienta [1]	20
2.26	(a) Elementos que intervienen en el proceso de medición. (b) Ejemplo de distribución de puntos codificados [1]	21
2.27	Análisis de deformaciones de una pestaña cóncava producida por SPIF. (a) Puntos de deformación y sección del FLD. (b) Contornos de deformación [1]	21
2.28	Análisis de deformaciones de una pestaña convexa producida por SPIF. (a) Puntos de deformación y sección del FLD. (b) Contornos de deformación [1]	22
2.29	Modos de fallo en rebordeado cóncavo mediante SPIF. (a) Fractura en el borde. (b) Fractura en la esquina [1]	22
2.30	Modos de fallo en rebordeado convexo mediante SPIF. (a) Fallo por arrugamiento. (b) Fallo por inicio de arrugamiento. [1]	23
2.31	Ensayos de conformado con caucho [4]	23
2.32	Geometría propuesta de especímenes para los ensayos de rebordeado: (a) diseño principal; (b) diseño alternativo [4]	24
3.1	Doble simetría de la chapa con forma de trébol	25
3.2	Modelado de la geometría del problema en CATIA	26
3.3	Detalle de la geometría de la matriz y la chapa	26
3.4	Plano del modelo preliminar empleado	27
3.5	Plano del modelo alternativo empleado	27
3.6	Plano del rediseño para reducir la fuerza. Pestaña exterior	28
3.7	Plano del rediseño para reducir la fuerza. Pestaña interior	29
3.8	Definición de las propiedades de contacto en Abaqus	31
3.9	Definición de los contactos entre superficies en Abaqus	32
3.10	La superficie maestra puede penetrar la superficie esclava [10]	32
3.11	Condición de contorno que impide el desplazamiento de la goma en el eje perpendicular a su bajada	33
3.13	Condición de contorno de encastre de la matriz y de la placa inferior	33
3.12	Condición de simetría en las caras a 60°	34
3.14	Condición de contorno desplazamiento vertical de la goma	34
3.15	Mallado estructurado de la chapa	35
3.16	Mallado del modelo	35
4.1	Geometría del modelo de rebordeado con presión uniforme	37
4.2	Presión uniforme aplicada sobre la chapa. Modelo con presión uniforme	38
4.3	Deformación máxima principal en Assembly. Modelo con presión uniforme, primera simulación	38
4.4	Deformación máxima principal en la chapa. Modelo con presión uniforme, primera simulación	39
4.5	Deformación máxima principal en la chapa. Modelo con presión uniforme, segunda simulación	39
4.6	Deformación máxima principal en la chapa. Modelo con presión uniforme, tercera simulación	40
4.7	Deformación logarítmica máxima principal en Assembly. Diseño preliminar	41
4.8	Deformación logarítmica máxima principal en la chapa. Diseño preliminar	41
4.9	Fuerza necesaria en modelo preliminar	42
4.10	Geometría del modelo con útil adicional de goma y prensachapas	43
4.11	Deformación máxima principal en Assembly. Diseño con útil de goma y prensachapas	43
4.12	Deformación máxima principal en la chapa. Diseño con útil de goma y prensachapas	44
4.13	Fuerza necesaria en modelo con útil de goma y prensachapas	44
4.14	Geometría del modelo interior con útil adicional de goma y prensachapas	45
4.15	Detalle de la chapa del modelo interior	45
4.16	Deformación máxima principal en Assembly. Diseño geometría interior con útil de goma y prensachapas	45

4.17	Deformación máxima principal en la chapa. Diseño geometría interior con útil de goma y prensachapas	46
4.18	Fuerza necesaria en modelo interior con útil de goma y prensachapas	46
5.1	Partición realizada en chapa y útil de goma para realizar un mallado estructurado	51
5.2	Mallado estructurado en chapa y útil de goma	51
5.3	Deformación máxima principal en Assembly. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por arrugamiento	51
5.4	Deformación máxima principal en la chapa. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por arrugamiento	52
5.5	Fuerza necesaria en modelo Explicit para caso con fallo por arrugamiento	52
5.6	FLD con la evolución de las trayectorias de deformación a lo largo de la pestaña final. Caso con fallo por arrugamiento	54
5.7	Geometría de la chapa. Modelo en Abaqus/Explicit. Caso con fallo por estricción	55
5.8	Deformación máxima principal en Assembly. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por estricción	55
5.9	Deformación máxima principal en la chapa. Diseño con Abaqus/Explicit. Fallo por estricción	56
5.10	Fuerza necesaria en modelo Explicit para caso con fallo por estricción	56
5.11	Detalle de la fuerza necesaria en para caso con fallo por estricción	57
5.12	FLD con la evolución de las trayectorias de deformación a lo largo de la pestaña final. Caso con fallo por estricción	58

Índice de Tablas

5.1	Resumen de resultados obtenidos con Abaqus/Explicit	59
-----	---	----

Bibliografía

- [1] J. A. López-Fernández, “Stretch and shrink flanging of aa2024-t3 sheet by single point incremental forming,” Ph.D. dissertation, Universidad de Sevilla, 2021.
- [2] D. Morales Palma and G. Centeno, *Bases para el análisis de procesos de conformado, Introducción al comportamiento plástico de chapas*. Procesos de Fabricación Aeronáutica. Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2021.
- [3] D. Morales Palma, “Análisis del efecto de la flexión en la conformabilidad de chapas metálicas,” Ph.D. dissertation, Universidad de Sevilla, 2011.
- [4] D. Morales Palma and A. J. Martínez Donaire, “Caracterización experimental y numérica de la conformabilidad de rebordado convencional e incremental de aleaciones de aluminio aeronáuticas durante el envejecimiento natural,” 2023, proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Plan Estatal 2021-2023, ref. PID2021-125934OB-I00). [Online]. Available: https://investigacion.us.es/sisius/sis_proyecto.php?idproy=35443
- [5] D. Morales Palma and G. Centeno, *Bases para el análisis de procesos de conformado, Inestabilidad y fallo en el conformado de chapa*. Procesos de Fabricación Aeronáutica. Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2021.
- [6] M. Borrego, D. Morales-Palma, A. J. Martínez-Donaire, G. Centeno, and C. Vallellano, “Analysis of formability in conventional hole flanging of aa7075-o sheets: punch edge radius effect and limitations of the flc,” *International Journal of Material Forming*, 2019.
- [7] M. Borrego, D. Morales-Palma, A. J. Martínez-Donaire, C. Centeno, and C. Vallellano, “Experimental study of hole-flanging by single-stage incremental sheet forming,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 237, pp. 320 – 330, 2016.
- [8] “Hyperelastic behavior of rubberlike materials - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>
- [9] M. W. F. D. L. Belhassen, S. Koubaa, “Numerical prediction of springback and ductile damage in rubber-pad forming process of aluminum sheet metal, int. j. mech. sci. 117 (2016) 218-226.”
- [10] “Slave and master surfaces - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>
- [11] “Surface-based constraints - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>

- [12] “Modeling issues for rigid surfaces in abaqus/standard - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>
- [13] “Comparison of implicit and explicit time integration procedures - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>
- [14] “Conditional stability of the explicit method - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>
- [15] “Definition of the stability limit - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>
- [16] “Mass scaling to control time incrementation - asistencia de usuario de simulia 2020.” [Online]. Available: <https://help.3ds.com/2020/>