



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Dpto. de ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación**

**Ingeniería de los procesos de Fabricación**

# **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**DESARROLLO DE UN PROCESO MODIFICADO DE  
CONFORMADO INCREMENTAL DE DOS PUNTOS PARA  
MEJORAR LA CONFORMABILIDAD EN CHAPAS METÁLICAS**

**DEVELOPMENT OF A MODIFIED TWO-POINT INCREMENTAL  
FORMING PROCESS FOR ENHANCED FORMABILITY IN SHEET  
METALS**

Máster en Ingeniería Industrial

Autor: Oihane Alcuaz Rodríguez

Tutor: José Andrés López Fernández

MÁLAGA, junio de 2025



## Agradecimientos

Este trabajo es el resultado no solo del esfuerzo individual, sino también del respaldo constante de todas las personas que me han acompañado y sostenido en cada paso.

En primer lugar, a mi familia, por creer siempre en mi esfuerzo y por ayudarme a confiar en mí misma. A mi madre, porque, aunque esté a 911 km, la siento a mi lado leyéndome. A mi padre y a mis hermanos, por no preguntarme nunca por el TFM.

Por supuesto, agradezco a mi tutor Andrés López, por su apoyo y dedicación, por sus “*cinco minutos*” que siempre tenía para dedicarme —y que nunca fueron solo cinco. Gracias por inculcarme ese sentimiento hacia la investigación, por acompañarme en tantas horas aprendiendo ANSYS, en los tiempos de espera a que el programa respondiera, en los días de frustración que me pasaba en la biblioteca y que resolvías en esos “*cinco minutos*”. Gracias por mostrarme que la constancia también se investiga.

A mis amigos, los que están aquí y los que están allí, por creer en mí cuando dejé de hacerlo. A Antonia, por quedarse a mi lado durante tantas tardes, en silencio, leyendo un libro mientras yo escribía; por acompañarme sin decir nada, regalándome su calma cuando más la necesitaba. A Miren, por sus mensajes esperanzadores, por enseñarme que incluso el más fuerte tiene su talón de Aquiles; la verdadera fuerza es saber dónde está y protegerlo.

Y, finalmente, un agradecimiento muy especial para mí misma. Por mantener la paciencia en la incertidumbre y por abrazar cada desafío con determinación. Por aprender a confiar en mi proceso, y por descubrir en este camino una versión más fuerte y resiliente de mí. Este trabajo no solo es fruto de horas de estudio, sino también de un profundo viaje personal. Que nunca se me olvide.

*"Si escuchas una voz dentro de ti que dice 'no puedes pintar', entonces pinta, y esa voz será silenciada."  
– Vincent van Gogh*



## Resumen

El Conformado Incremental de Chapa (Incremental Sheet Forming, ISF) es un proceso de deformación de láminas metálicas mediante una herramienta controlada por CNC. Este método destaca por su capacidad para reducir los costos de utillaje en la producción de series pequeñas y por mejorar las propiedades de deformación del material. Dentro de sus variantes, se encuentran el Conformado Incremental Monopunto (*Single Point Incremental Forming*, SPIF) y el Conformado Incremental de Dos Puntos (*Two Point Incremental Forming*, TPIF). La principal diferencia entre ambos radica en el uso de una matriz de respaldo opuesta a la herramienta en el TPIF, lo que disminuye la triaxialidad en la chapa y retrasa su fractura. Sin embargo, la fabricación de dicha matriz representa un costo considerable en pequeñas producciones.

Este trabajo propone un método híbrido que reemplaza la matriz inferior del TPIF por una chapa de respaldo, con el fin de reducir los costos sin comprometer el soporte necesario. El objetivo principal es evaluar la viabilidad del proceso y su potencial en términos de conformabilidad. Para ello, se desarrollará un modelo basado en el método de elementos finitos, que permitirá analizar el incremento de conformabilidad. Los resultados obtenidos se compararán con los valores de referencia disponibles para SPIF y TPIF en la literatura, y se validarán experimentalmente mediante la fabricación de piezas representativas para evaluar la conformabilidad en el ISF.



## **Abstract**

Incremental Sheet Forming (ISF) is a process used to deform metal sheets through a CNC-controlled tool. This method stands out for its ability to reduce tooling costs in small production series and improve the material's formability. Among its variants are Single Point Incremental Forming (SPIF) and Two Point Incremental Forming (TPIF). The main difference between these lies in the use of a backing die opposite the tool in TPIF, which reduces triaxiality in the sheet and delays fracture. However, the manufacture of this die represents a significant cost in small batches.

This study proposes a hybrid method that replaces the TPIF lower die with a backing sheet to reduce costs while maintaining the necessary support. The primary objective is to assess the feasibility of the process and its potential in terms of formability. For this purpose, a finite element method (FEM)-based model will be developed to analyze the increase in formability. The results will be compared to reference values available in the literature for SPIF and TPIF and experimentally validated through the fabrication of representative parts typically used to evaluate formability in ISF.



## **Palabras clave**

Conformabilidad, Triaxialidad, Two Point Incremental Forming, Conformado de chapa, conformado incremental de chapa (ISF), conformado incremental mono-punto (SPIF), fractura.

## **Keywords**

Formability, Triaxiality, Two Point Incremental Forming, Sheet Forming, Incremental Sheet Forming (ISF), Single Point Incremental Forming (SPIF), Fracture.

## **Conocimientos adicionales**

Competencia en Ansys APDL

Fundamentos de Mecánica de Materiales y Fractura

# Contenido

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>III</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VII</b>
<b>Palabras clave.....</b>	<b>IX</b>
<b>Keywords .....</b>	<b>IX</b>
<b>Conocimientos adicionales .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de gráficas .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>xviii</b>
<b>Lista de símbolos .....</b>	<b>xx</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Descripción general y motivación .....	1
1.2 Objetivos.....	2
<b>2. Estado del arte.....</b>	<b>3</b>
2.1 Conformado de chapa metálica .....	3
2.1.1 Procesos no incrementales .....	4
2.1.2 Conformado incremental de chapa metálica (ISF) .....	10
2.2 Fundamentos del conformado incremental de un solo punto (SPIF) .....	15
2.2.1 Parámetros del proceso .....	15
2.3 Conformabilidad .....	18
2.3.1 Conformabilidad en procesos convencionales.....	18
2.3.2 Conformabilidad en procesos incrementales ISF .....	22
2.3.3 Predicción de fallo en SPIF .....	28
2.3.4 Simulación numérica en procesos de conformado de chapa .....	31
2.4 Criterios de plasticidad y triaxialidad .....	34
<b>3. Procedimientos experimentales .....</b>	<b>38</b>

3.1 Propiedades mecánicas .....	38
3.1.1 Propiedades de tracción .....	38
3.1.2 Análisis de conformabilidad .....	41
<b>4. Métodos numéricos .....</b>	<b>53</b>
4.1 Parámetros del modelo .....	53
4.2 Geometría.....	55
4.3 Mallado y condiciones de contorno .....	57
<b>5. Resultados.....</b>	<b>61</b>
5.1 Cono de ángulo variable con chapa simple (Modelo 1) .....	63
5.1.1 Análisis en el espacio de las deformaciones principales. ....	63
5.1.2 Análisis en el espacio de la triaxialidad.....	68
5.2 Cono de ángulo variable con chapa de soporte (Modelo 2) .....	71
5.2.1 Análisis en el espacio de las deformaciones principales. ....	72
5.2.2 Análisis en el espacio de la triaxialidad.....	75
5.3 Comparativa de resultados .....	77
5.3.1 Comparativa en el espacio de las deformaciones principales.....	77
5.3.2 Comparativa en el espacio de la triaxialidad .....	79
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>81</b>
6.1 Conclusiones generales .....	81
6.2 Trabajos futuros .....	81
<b>Bibliografía .....</b>	<b>84</b>



## Lista de figuras

Figura 1: Proceso de doblado y curvado de metales.....	4
Figura 2: Tipos comunes de rebordeado en chapa metálica: stretch flange, straight flange, shrink flange, reverse flange, jogged flange y hole flange .....	5
Figura 3: Proceso de hidroconformado.....	7
Figura 4: Conformado de goma.....	8
Figura 5: Esquema de un proceso de conformado de alta velocidad mediante campos electromagnéticos pulsados. ....	9
Figura 6: Ilustración esquemática del proceso de conformado explosivo.....	9
Figura 7: Esquema del proceso de superplastic forming.....	10
Figura 8: Representación del spinning convencional.....	11
Figura 9: Método de abombado inverso: (a) antes del proceso de conformado y (b) durante el proceso. .	12
Figura 10: Métodos de conformado incremental asimétrico: (a) TPIF con matriz específica, (b) TPIF con un matriz parcial y (c) SPIF .....	13
Figura 11: Experimentos de laboratorio realizados por SPIF: (a) fabricación de una pirámide de aluminio (Jong-Jin y Yung-Ho, 2003) y (b) Vista superior de un cono truncado .....	14
Figura 12: Diferentes formas utilizadas para demostrar la viabilidad del proceso .....	14
Figura 13: Herramientas utilizadas en SPIF: (a) herramienta hemisférica, (b) bola rodante y (c) herramienta en el extremo.....	16
Figura 14: Estrategias de trayectorias de herramienta en SPIF: (a) $\Delta z$ constante (Jeswiet, 2004), (b) estrategia de trayectoria espiral (Filice et al., 2002) y (c) conformado en dos etapas de una esfera. ....	17
Figura 15: Geometrías de las probetas empleadas en ensayos Nakazima. (a) compresión uniaxial, (b) arrugamiento, (c y d) corte puro, (e) tensión uniaxial, (f) deformación plana y (g) tensión biaxial .....	19
Figura 16: Representación esquemática del diagrama de límite de conformado indicando la región de conformado seguro .....	20
Figura 17: Fases de nucleación, crecimiento y coalescencia de microvacíos. ....	21
Figura 18: Representación esquemática del ángulo de pared ( $\alpha$ ) y la evolución del espesor de la chapa durante el proceso SPIF. Se observa la reducción de espesor desde el valor inicial ( $t_0$ ) hasta el espesor final ( $t_f$ ) en la zona conformada.....	23
Figura 19: Representación del FLD que contiene la FLC y FFL: (a) material dúctil y (b) material de baja ductilidad .....	24
Figura 20: Representación esquemática de las diferentes pruebas propuestas en función de las trayectorias de deformación obtenidas .....	25
Figura 21: Diagrama de la cortante localizada inducida por la herramienta en SPIF .....	27
Figura 22: Dependencia de la deformación de fractura equivalente con la triaxialidad de tensión promedio. ....	28
Figura 23: Representación de la conformabilidad en términos de la triaxialidad promedio frente a deformación plástica equivalente del punto de fractura en la cara exterior para el ensanchamiento de orificios realizado por SPIF .....	30

Figura 24: Representación en el diagrama $\eta$ - $\epsilon_{eq}$ de: (a) puntos de fractura y curvas FFL obtenidas en procesos de ensanchado por SPIF y en ensayos Nakazima, y (b) locus general de fractura en modo I y puntos críticos correspondientes a bridas sin fractura.....	31
Figura 25: Modelos de elementos finitos de conformado incremental de chapa: (a) Modelo empleado para este trabajo usando Ansys APDL y (b) modelo incluyendo matriz y herramienta .....	32
Figura 26: Representación tridimensional de las superficies de fluencia de von Mises y Tresca en el espacio de tensiones principales. ....	35
Figura 27: Probeta de ensayo de tracción para el Modelo 1 AA2024-T3 .....	39
Figura 28: Diagrama de límite de conformado de AA2024-T3 representado por el FFL obtenido de los ensayos Nakazima, considerando cinco trayectorias de deformación diferentes .....	42
Figura 29: Diagrama de límite de conformado (FLD) en AA75075-O.....	43
Figura 30: Máquina láser de fibra modelo LS-XT-S, fabricada por la empresa Lasing (Shandong, China) ubicada en el taller de fabricación de las instalaciones de la UMA. ....	44
Figura 31: Calibración del patrón de grabado laser para el método experimental. ....	45
Figura 32: Grabado laser del patrón de lectura en la chapa AA2024-T3 en el Modelo 1. ....	46
Figura 33: Vista completa y ampliada de la probeta de grabado laser en el método experimental.....	46
Figura 34: Centro de mecanizado vertical Lagun L650 ubicado en el taller de fabricación de la UMA. ..	47
Figura 35: Matriz de sujeción para el método experimental. ....	48
Figura 36: Vista previa de las trayectorias en SPIF. ....	49
Figura 37: Preparación del montaje experimental. Calibración del eje Z sobre la superficie de la chapa utilizando un palpador 3D.....	49
Figura 38: Preparación del montaje experimental. Palpación del origen-pieza en el eje Z sobre la superficie de la chapa utilizando un palpador 3D. ....	50
Figura 39: Fotografía del proceso de deformación incremental conforme a la trayectoria establecida. ....	50
Figura 40: Fractura localizada en la zona de máxima deformación del cono conformado por SPIF. Ampliación del área dañada.....	51
Figura 41: Fotografía del modelo experimental. (a) vista inferior y (b) planta.....	51
Figura 42: Geometría de tipo Shell163. Teniendo en cuenta que X e Y están en el plano del elemento ...	53
Figura 43: Representación del mallado del modelo numérico empleado en el análisis mediante EF. Se muestran los distintos materiales utilizados: la chapa conformada de aleación AA2024-T3 (Material 1), la herramienta de acero modelada como cuerpo rígido (Material 2), la matriz fija también rígida (Material 3) y la chapa de respaldo de aleación AA7075-O (Material 4). ....	55
Figura 44: Vista de perfil de los modelos de EF (a) Modelo 1 correspondiente al conformado mediante SPIF con una chapa y (b) Modelo 2 correspondiente al conformado usando 2 chapas, una arriba y otra de respaldo.....	56
Figura 45: Modelo de Elementos Finitos en SPIF (a) Vista isométrica y (b) vista lateral del ensamblaje propuesto. ....	56
Figura 46: División por áreas para el mallado por secciones.....	58
Figura 47: Mallado por secciones con alta precisión. (a) vista completa de la chapa y (b) vista ampliada del mallado.....	58
Figura 48: Distribución homogénea de las áreas. ....	59

Figura 49: Mallado uniforme de la chapa metálica. (a) vista completa de la chapa y (b) vista ampliada del mallado. ....	59
Figura 50: Representación visual de la sección de análisis en (a) la probeta numérica del modelo y (b) la probeta experimental en la chapa AA2024-T3. ....	64
Figura 51: Distribución de las deformaciones principales en el instante de rotura para el Modelo 1. (a) deformación principal máxima $\epsilon_1$ y (b) deformación principal mínima $\epsilon_2$ .....	66
Figura 52: Distribución numérica de las capas en un elemento para 5 puntos de integración. ....	69
Figura 53: Visualización numérica del segundo ensayo en ANSYS añadiendo una segunda chapa. ....	71
Figura 54: Distribución de las deformaciones principales para dos chapas en la capa TOP en el instante de rotura $t = 316,8$ s y $Z_{fract} = 17,975$ mm (a) deformación máxima $\epsilon_1$ y (b) deformación principal mínima $\epsilon_2$ . ....	73
Figura 55: Selección de elementos de estudio. (a) Modelo 2 donde muestra el Elemento 1 correspondiente a la Z de fractura del Modelo 1 para un radio de 21mm y Elemento 2 correspondiente con la Z de fractura del Modelo 2 para un radio de 19mm y (b) Modelo 1 donde señala el Elemento 1 correspondiente a la Z de fractura del Modelo 1 para un radio de 21mm. ....	75



## Lista de gráficas

Gráfica 1: Esquema del diagrama de límite de conformado (FLD) y otros límites de fallo .....	19
Gráfica 2: Curva tensión-deformación para distintos ángulos respecto a la dirección de laminación .....	39
Gráfica 3: Tensión equivalente vs. deformación equivalente para tracción. Aplicación de la ley de comportamiento para el estudio presente para la aleación AA7075. ....	41
Gráfica 4: Trayectoria de la coordenada x de la herramienta de conformado para el modelo numérico. ...	62
Gráfica 5: Evolución temporal de la coordenada z de la herramienta de conformado para el modelo numérico hasta la fractura de la probeta. ....	63
Gráfica 6: Validación del modelo de EF en el espacio de las deformaciones principales: Comparación numérico-experimental de una sección en el momento de la fractura. ....	65
Gráfica 7: Evolución temporal de los puntos 1,2,3 y 4. (a) Punto alejado de la zona de interés con $R1 = 25$ mm (b) punto cercano a la zona de interés $R2 = 22$ mm (c) Punto de interés para $R3 = 21$ mm y (d) punto cercano a la zona de interés para $R4 = 20$ mm. ....	67
Gráfica 8: Estudio de la triaxialidad en tensiones para puntos críticos de la simulación numérica en el Modelo 1. ....	70
Gráfica 9: Modelo EF en el espacio de las deformaciones principales para dos chapas en el Modelo 2. Comparación numérico-experimental de una sección en el momento de la fractura. ....	72
Gráfica 10: Evolución temporal para el Modelo 2 de los puntos 1,2,3 y 4 para 2 chapas. (a) Punto cercano de la zona de interés con $R1 = 20$ mm (b) punto próximo a la zona de interés $R2 = 20$ mm (c) Punto de interés para $R3 = 19$ mm y (d) punto cercano a la zona de interés para $R4 = 18$ mm. ....	74
Gráfica 11: Estudio de la triaxialidad en tensiones para elementos críticos de la simulación numérica para 2 chapas en el Modelo 2. ....	76
Gráfica 12: Deformación principal para los elementos de interés en Modelo 1 y Modelo 2. ....	77
Gráfica 13: Evolución comparativa de la deformación equivalente en el Modelo 1 y Modelo 2 para los elementos de interés. ....	78
Gráfica 14: Estudio comparativo de la triaxialidad en tensiones para elementos críticos de la simulación numérica para 1 chapa simple en el Modelo 1 y 2 chapas en el Modelo 2. ....	80

## Lista de tablas

Tabla 1: Comparación de métodos implícito y explícito en la simulación de ISF. ....	33
Tabla 2: Propiedades mecánicas obtenidas para el Modelo 1 AA2024-T3.....	40
Tabla 3: Propiedades mecánicas a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación.....	40
Tabla 4: Propiedades mecánicas obtenidas para el Modelo 2 AA7075-O. ....	41
Tabla 6: parámetros de calibración para el método experimental cajón de trabajo XTL-FC50.....	45



## Lista de símbolos

### Símbolos

$\bar{\eta}$	Triaxialidad media de tensiones
$\Delta r$	Separación adicional en la trayectoria de la herramienta
$Z_{tool}$	Coordenada z de la herramienta
$\Delta z$	Avance en profundidad por pasada
$\beta$	Relación de deformación
$\varepsilon_1$	Deformación principal mayor
$\varepsilon_{1f}$	Deformación principal mayor en la fractura
$d\varepsilon_1$	Incremento de la deformación principal mayor
$\varepsilon_2$	Deformación principal menor
$\varepsilon_{2f}$	Deformación principal menor en la fractura
$d\varepsilon_2$	Incremento de la deformación principal menor
$\varepsilon_3$	Deformación principal a través del espesor
$\varepsilon_{3f}$	Deformación principal a fractura en dirección espesor
$d\varepsilon_3$	Incremento de la deformación en la dirección de espesor
$\bar{\varepsilon}_f$	Deformación equivalente en la fractura
$d\bar{\varepsilon}$	Incremento de deformación equivalente
$d\varepsilon$	Incremento de deformación
$\bar{\varepsilon}$	Deformación equivalente
$\varepsilon_{eq}$	Deformación equivalente
$\varepsilon^p$	Deformación plástica equivalente acumulada
$\varepsilon_p$	Deformación plástica
$d\varepsilon_{ij}$	Incremento del tensor de deformación
$\alpha$	Ángulo del cono

$\alpha_c$	Ángulo crítico de fractura
$t_0$	Espesor inicial
$t_f$	Espesor final
R	Radio de la herramienta
$\sigma_1$	Tensión principal mayor
$\sigma_2$	Tensión principal menor
$\sigma_0$	Tensión de fluencia uniaxial
$\bar{\sigma}^m$	Tensión efectiva dependiente de la velocidad de deformación
$\sigma_f$	Tensión en fractura
$\sigma_y$	Límite elástico
$\sigma_m$	Tensión media
$\bar{\sigma}$	Tensión equivalente
$\eta$	Triaxialidad de tensiones
$D_{crit}$	Daño crítico
$n$	Exponente de endurecimiento
$c$	Velocidad del sonido en el material
$m$	Coefficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación
$r_0$	Coefficiente de Lankford en la dirección de laminación
$r_{45}$	Coefficiente de Lankford en dirección diagonal
$r_{90}$	Coefficiente de Lankford en la dirección transversal
$k_1, k_2$ y $k_3$	Parámetros del criterio de fluencia de Barlat
$\Delta t_{max}$	Paso de tiempo máximo
$L_s$	Longitud característica
$\rho$	Densidad del material
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$E$	Módulo de Young
$mm$	Milímetros

<i>mm/min</i>	Milímetros por minuto
<i>mm/s</i>	Milímetros por segundo
<i>MoS<sub>2</sub></i>	Disulfuro de molibdeno
<i>rpm</i>	Revoluciones por minuto
$\Delta t$	Incremento de tiempo en simulaciones explícitas

## **Acrónimos**

AA2024-T3	Aleación de aluminio 2024-T3
AA7075-O	Aleación de aluminio 7075 en estado recocido (O)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Control numérico por computadora
DIC	Correlación digital de imágenes (Digital Image Correlation)
FFL	Fracture Forming Limit (Límite de fractura por conformado)
FLD	Forming Limit Diagram (Diagrama de límite de conformado)
ISF	Incremental Sheet Forming (Conformado incremental de chapa)
SFFL	Shear Fracture Forming Limit (Límite de fractura por corte)
SPIF	Single Point Incremental Forming (Conformado incremental de punto único)
TPIF	Two Point Incremental Forming (Conformado incremental a dos puntos)
FLC	Forming Limit Curve (Curva límite de conformado)
FEM	Método de los elementos finitos (Finite Element Method)
CID	Correlación de imágenes digitales
HGCONTROL	Control de hourglassing
FSTS	Forming Surface-To-Surface (Conformado con contacto superficie a superficie)
VDC	Coefficiente de amortiguamiento viscoso



# 1. Introducción

El conformado incremental de chapas metálicas ha emergido en el ámbito de la fabricación, ofreciendo una alternativa rentable y versátil para la producción de piezas de chapa a bajo coste. Este enfoque, que evita la necesidad de herramientas y matrices especializados, ha demostrado ser especialmente útil en aplicaciones de rápido prototipado, personalización y producción en pequeños lotes.

En los últimos años, el conformado incremental de dos puntos (TPIF) ha ganado relevancia como una variante del proceso de un solo punto (SPIF). El TPIF se basa en la utilización de un soporte adicional, como una matriz parcial o una herramienta secundaria, para mejorar el control de las tensiones durante el proceso, ampliando así los límites de conformabilidad del material.

La necesidad de mejorar los procesos de conformado en materiales metálicos responde a los requerimientos de sectores como la industria aeroespacial, automotriz y biomédica, donde la fabricación de componentes ligeros, resistentes y de alta precisión es fundamental. En este contexto, el desarrollo de técnicas avanzadas como el TPIF modificado tiene el potencial de abordar los desafíos asociados con la fractura, el crecimiento de vacíos y las limitaciones geométricas observadas en métodos tradicionales.

## 1.1 Descripción general y motivación

El conformado incremental es una tecnología de fabricación que destaca por su flexibilidad y capacidad para trabajar con chapas metálicas de diferentes materiales y espesores sin necesidad de matrices específicas.

El SPIF es un proceso de fabricación caracterizado por la deformación progresiva de una lámina metálica mediante una herramienta que aplica fuerza a través de un único punto de contacto. Durante el proceso, la lámina se sujeta en su periferia mientras la herramienta, controlada normalmente por una máquina CNC, sigue trayectorias programadas. Este método elimina la necesidad de matrices dedicadas, lo que aporta una gran flexibilidad en el diseño de piezas, ya que para obtener diferentes geometrías basta con modificar la trayectoria de la herramienta. No obstante, su carácter incremental conlleva tiempos de proceso elevados, lo que limita su viabilidad en producción a gran escala, siendo más adecuado para prototipos o series cortas.

Con el objetivo de mejorar las limitaciones del SPIF, surge el Two point incremental forming (TPIF), que incorpora una matriz inferior que actúa como soporte adicional durante la deformación. Esta configuración mejora la distribución de esfuerzos en la lámina, permitiendo una mayor conformabilidad y reduciendo defectos como arrugas, fracturas o deformaciones no deseadas. Sin embargo, la principal desventaja del TPIF

radica en el coste asociado a la fabricación de dicha matriz, lo que reduce su flexibilidad y encarece el proceso para producciones variables o de bajo volumen.

En este contexto, el proceso de TPIF modificado propuesto en este trabajo se presenta como una solución intermedia que busca mantener las ventajas en términos de conformabilidad del TPIF, pero eliminando el elevado coste de la matriz inferior. Para ello, se plantea el uso de una chapa de respaldo en lugar de una matriz rígida, lo cual proporciona un soporte efectivo a la lámina durante el proceso sin requerir utillajes complejos. Este enfoque tiene como objetivo optimizar el proceso de conformado incremental, ofreciendo una alternativa más eficiente, sostenible y adaptable a las demandas del diseño contemporáneo.

## 1.2 Objetivos

El presente trabajo de fin de máster tiene como objetivo principal el estudio de un proceso modificado de conformado incremental variante del conformado incremental de dos puntos (TPIF) y, a su vez, compararlo con el proceso de un solo punto (SPIF).

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

Evaluar experimentalmente los límites de conformado de los procesos SPIF y TPIF modificado mediante la fabricación de conos de ángulo variable, identificando las condiciones críticas de fallo.

Diseñar un modelo de elementos finitos explícito que reproduzca el proceso de TPIF modificado, con el fin de analizar las variables que contribuyen a la mejora de la conformabilidad.

Validar el modelo numérico utilizando los datos experimentales obtenidos, comprobando su capacidad para predecir la evolución de la geometría y la aparición de defectos durante el conformado.

Analizar las deformaciones principales obtenidas a través del modelo numérico para estudiar cómo influye el uso de una chapa de respaldo en la distribución de deformaciones a lo largo de la lámina.

Estudiar la evolución de las tensiones durante el proceso en ambas configuraciones (SPIF y TPIF modificado), proponiendo una hipótesis sobre el mecanismo responsable del incremento en la conformabilidad observado en el proceso modificado.

## 2. Estado del arte

Según la definición clásica recogida por Kalpakjian & Schmid en *Manufacturing Engineering and Technology*, 2014, el conformado de chapas metálicas forma parte de los procesos de fabricación que transforman materiales en componentes funcionales a través de la deformación plástica. Estos procesos pueden clasificarse, de manera general, en función de si conservan o no la masa del material original durante el proceso de transformación.

Los procesos con conservación de masa son aquellos en los que el volumen del material se mantiene constante, y la forma se obtiene mediante deformación plástica sin arranque de viruta. Este grupo incluye técnicas como la forja, la estampación, la laminación, el estirado, la embutición, el repujado, el plegado, la conformación por estirado, la extrusión, el doblado con rodillos y la conformación con hule, entre otros. Dentro de este conjunto se sitúan los procesos de conformado de chapa, que son objeto de estudio en este trabajo.

En los procesos sin conservación de masa, parte del material es removido para obtener la forma final deseada. A este grupo pertenecen el mecanizado convencional (torneado, fresado, taladrado), los procesos de electroerosión (EDM), el corte por láser o plasma, el rectificado, el fresado químico o electroquímico, y técnicas más modernas como el mecanizado por chorro de agua. Aunque ofrecen gran precisión y libertad geométrica, implican mayores pérdidas de material y tiempos de proceso en ciertas aplicaciones.

Este trabajo se centra en los procesos de conformado incremental de chapa, pertenecientes al grupo de procesos con conservación de masa, en los que se emplean herramientas guiadas mediante CNC que siguen trayectorias controladas para deformar progresivamente la lámina sin necesidad de una matriz rígida, permitiendo una mayor flexibilidad en el diseño de geometrías complejas.

### 2.1 Conformado de chapa metálica

El conformado de chapa metálica es un conjunto de procesos que permite obtener piezas con geometrías específicas a partir de láminas metálicas, aplicando fuerzas externas para deformar el material plásticamente sin romperlo. Estos procesos pueden clasificarse en dos grandes categorías: incrementales y no incrementales.

Mientras que los procesos incrementales, como el conformado incremental de un solo punto (SPIF) y de dos puntos (TPIF), se caracterizan por la aplicación localizada y progresiva de las fuerzas, los procesos no incrementales emplean herramientas diseñadas para deformar la totalidad o una parte significativa de la chapa en un solo paso.

### 2.1.1 Procesos no incrementales

Los procesos no incrementales han sido la base tradicional en la industria del conformado de chapas metálicas, utilizados ampliamente en aplicaciones que requieren alta precisión y producción en masa.

Entre estos procesos convencionales se encuentran técnicas que modifican la geometría de la lámina de forma global o parcial en una sola operación, como el embutido, el estampado, el corte y, de forma destacada, el doblado, que se describe a continuación.

#### 2.1.1.1 Doblado

El doblado es uno de los procesos más comunes en el conformado de chapa metálica, utilizado para crear ángulos o curvaturas en la lámina mediante la aplicación de un momento de flexión. Este proceso puede llevarse a cabo mediante prensas mecánicas, hidráulicas o máquinas CNC, dependiendo de los requerimientos de precisión y producción.

Como se puede observar en la fig. 1 en el doblado, la distribución de tensiones en la chapa genera una zona de compresión en la parte interior de la curva y una de tracción en el exterior. Las principales limitaciones de este método incluyen la aparición de arrugas, el retorno elástico y el riesgo de fractura en materiales de baja ductilidad.

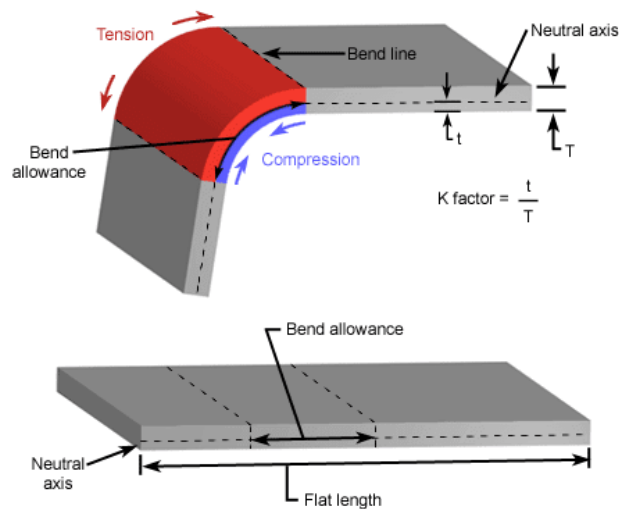


Figura 1: Proceso de doblado y curvado de metales. D.E. Herrera (09 noviembre 2015).

### 2.1.1.2 Flanging

El *flanging*, también conocido como conformado de flancos o rebordeado, es un proceso de conformado plástico ampliamente utilizado en la industria del conformado de chapa para generar rebordes o bordes elevados a lo largo de los extremos o alrededor de orificios de una pieza metálica. Esta operación no solo incrementa la rigidez estructural de las piezas, sino que también facilita el ensamblaje posterior mediante procesos como el remachado, soldadura o atornillado (Kalpakjian & Schmid, 2014).

El rebordeado puede llevarse a cabo mediante prensas mecánicas o hidráulicas, técnicas de hidroconformado o incluso mediante procesos más flexibles como el conformado incremental, que resulta especialmente ventajoso para la fabricación de prototipos o series cortas debido a su bajo requerimiento de utillaje específico (Dieter & Bacon, 2003).

Según la geometría del reborde, la dirección del esfuerzo predominante durante el proceso y los modos de fallo asociados, el *flanging* puede clasificarse en varios tipos, tal como se ilustra en la fig. 2.

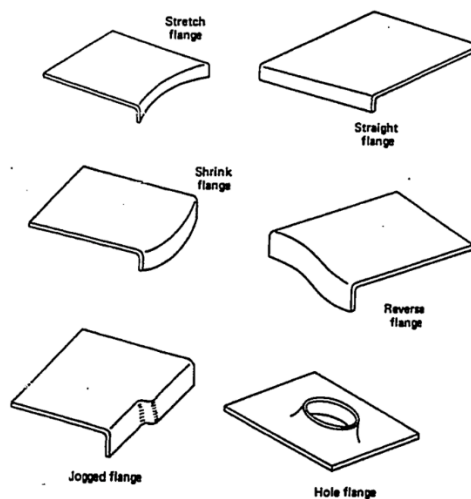


Figura 2: Tipos comunes de rebordeado en chapa metálica: stretch flange, straight flange, shrink flange, reverse flange, jogged flange y hole flange. Chuantao Wang (1993).

El *stretch flanging* se da cuando el borde de la chapa es sometido a esfuerzos de tracción que provocan el estiramiento del material durante la formación del reborde. Este tipo de *flanging* suele utilizarse en bordes exteriores o radios amplios. Sin embargo, presenta como principal riesgo la fractura del material, debido al adelgazamiento excesivo que se puede generar durante la operación.

Por el contrario, *shrink flanging* implica una deformación del borde bajo condiciones de compresión, generando una acumulación de material que tiende a arrugarse si no se controla adecuadamente. Esta técnica se emplea habitualmente en radios pequeños o geometrías cóncavas, y su fallo más común es el arrugamiento (*wrinkling*) debido a la inestabilidad del material sometido a compresión.

En el caso del *hole flanging*, el reborde se forma alrededor de un orificio previamente perforado, y el material se somete completamente a tracción radial. Esta condición puede llevar a la fractura si no se optimizan parámetros como la relación entre el diámetro del orificio y la profundidad del reborde. Este tipo es muy común en la fabricación de componentes que requieren pasos de tornillos o remaches.

*Straight flange* representa la forma más básica de rebordeado, consistente en doblar el borde de la chapa en un ángulo, generalmente recto, sin curvaturas adicionales. Este tipo de reborde implica esfuerzos localizados de flexión y puede presentar problemas de retroceso elástico (*springback*), especialmente en materiales con alta elasticidad, afectando la precisión dimensional final.

El *reverse flange*, por su parte, implica doblar el borde de la chapa en dirección opuesta al plano principal. Este método es útil cuando se quiere evitar que el reborde sobresalga, como ocurre en algunas aplicaciones en carrocería o cubiertas. Los esfuerzos aquí combinan tracción y compresión locales, y el principal riesgo está asociado a deformaciones indeseadas por efectos de retroceso o inestabilidad.

Por último, *jogged flange* introduce un doble pliegue o escalón en el borde, lo que permite el solape o encaje mecánico de varias piezas. Esta forma de reborde requiere una adecuada ductilidad del material, ya que concentra las deformaciones en las zonas de transición. De no ser así, pueden producirse fracturas localizadas si los radios de curvatura no están correctamente definidos.

Estos diferentes tipos de *flanging* son fundamentales en sectores como el automotriz, aeronáutico y electrodoméstico, donde es necesario combinar la resistencia estructural, la capacidad de ensamblaje y la eficiencia productiva en el diseño de componentes metálicos.

#### 2.1.1.3 Hidroconformado

El hidroconformado, también denominado conformado por fluido, es un proceso de conformado en el cual una lámina o un tubo metálico se deforma impulsando un medio fluido a alta presión (usualmente aceite o agua) contra una matriz rígida. En su variante de lámina, la pieza plana se apoya sobre una matriz y se utiliza una membrana deformable que separa el fluido del material; al incrementar la presión hidráulica, la lámina se ajusta perfectamente a la geometría de la matriz, obteniendo formas tridimensionales complejas con espesores muy uniformes (Kalpakjian & Schmid, 2014).

En el caso de tubos, como se observa en la fig. 3, el fluido se introduce en el interior de este mientras está sujeto por matraces a ambos extremos, y la presión interna hace que el tubo florezca contra un dado exterior; esta técnica es especialmente valorada para la fabricación de componentes estructurales huecos, como rieles de bastidor o elementos de suspensión en la industria automotriz, donde se requiere alta relación rigidez-peso (Dieter & Bacon, 2003).

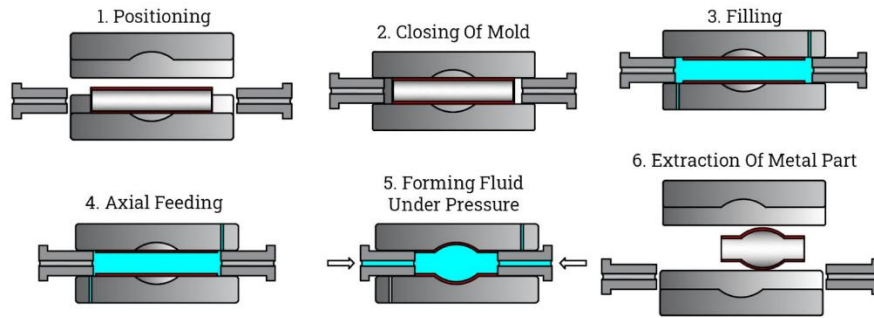


Figura 3: Proceso de hidroconformado. IQSDirectory.

La principal ventaja del hidroconformado radica en la distribución uniforme de la presión sobre toda la superficie de la pieza, lo que minimiza defectos típicos de otros procesos de estampación, tales como arrugas en las zonas de flange y grietas por concentración de tensiones. Además, al eliminar la necesidad de herramientas interiores complejas o punzones múltiples, se reducen los tiempos de preparación y el coste de utillaje para geometrías variables. Sin embargo, dado el elevado nivel de presión requerido (que en la práctica puede oscilar entre 50 y 200 MPa), es necesario contar con sistemas hidráulicos robustos y controles de caudal y presión muy precisos.

En tubo, permite obtener secciones variables y curvaturas sin soldaduras adicionales, aunque el proceso puede presentar modos de fallo como adelgazamiento localizado cuando la expansión supera la ductilidad del material o arrugamiento en las zonas de sujeción si la presión de cierre no es suficiente. En lámina, el límite principal está en la resistencia al estiramiento de la zona periférica que no queda en contacto inmediato con el fluido, lo cual puede generar fracturas prematuras si no se aplica un pre-tensionado adecuado o si el espesor de partida es insuficiente.

Este método es de uso creciente en automoción y aeroespacial, donde piezas como rieles de techo, travesaños de bastidor o conductos de fluidos requieren formas complejas, espesores uniformes y alta repetibilidad. La flexibilidad del hidroconformado lo hace también atractivo para prototipos y lotes medianos, siempre que el diseño de la matriz y los parámetros de presión estén bien calibrados para evitar los modos de fallo antes descritos.

#### 2.1.1.4 Rubber forming

El conformado con almohadilla de elastómero, también conocido como *rubber forming*, es un proceso derivado del hidroconformado en el que se sustituye el fluido por un elemento elástico (goma o poliuretano) que transmite la presión desde una matriz superior rígida hacia la lámina (fig. 4). A diferencia del hidroconformado, este método elimina la necesidad de una matriz inferior rígida, aunque sigue requiriendo un punzón o dado superior que defina la geometría a reproducir (Kalpakjian & Schmid, 2014). Cuando se comprime el elastómero, éste fluye alrededor de la chapa y la fuerza resultante la impulsa

contra el contorno de la matriz, logrando formas tridimensionales complejas con un único utillaje de goma adaptable a múltiples piezas.

Gracias a su versatilidad, el *rubber forming* es especialmente apreciado en la industria aeronáutica, donde piezas de gran dimensión y geometrías suaves como paneles de fuselaje o carcasas de revestimiento demandan un bajo coste de utillaje y una excelente repetibilidad superficial (Dieter & Bacon, 2003). La almohadilla de elastómero absorbe variaciones de espesor e irregularidades menores en la chapa, lo que reduce defectos localizados y minimiza marcas de herramienta.

Sin embargo, la selección de la dureza y composición del elastómero es crítica, pues de ella dependen la presión máxima alcanzable (generalmente limitada a 10-50 MPa), la vida útil del cojín y la precisión dimensional. El desgaste progresivo de la goma, su fatiga térmica y su sensibilidad a disolventes o aceites industriales imponen ciclos de mantenimiento y sustitución periódicos, incrementando los costes operativos en producciones intensivas (Groover, 2010). Además, la temperatura de trabajo debe controlarse cuidadosamente para evitar cambios en el módulo de elasticidad del polímero, que pueden traducirse en variaciones de forma o rugosidad superficial.

En aplicaciones de chapa fina (habitualmente hasta 3 mm de espesor), este proceso ofrece una excelente combinación de flexibilidad de utillaje y acabado superficial, aunque su implementación requiere un sistema de prensas capaz de generar fuerzas uniformes y un diseño de matriz superior optimizado para evitar concentraciones de tensión que puedan provocar arrugas o fracturas por plegado. Por estas razones, sigue consolidándose como una técnica intermedia entre estampación tradicional e hidroconformado, aportando ligereza en utillaje y adaptabilidad a pequeños lotes o prototipos aeronáuticos.

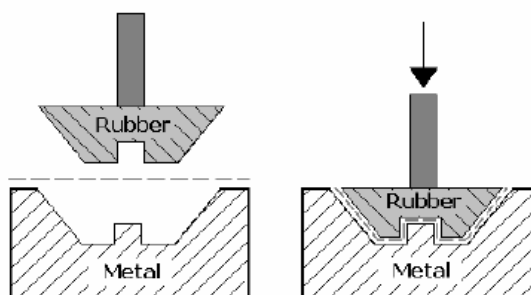


Figura 4: Conformado de goma. V.Antonelli (2008).

#### 2.1.1.5 Otros procesos no convencionales

Además de las técnicas clásicas de estampación y conformado incremental, existen procesos no convencionales que se emplean cuando se requieren geometrías muy complejas, materiales de difícil conformación o utillajes reducidos. Entre ellos destacan el conformado magnético, el conformado explosivo y el conformado super-plástico.

En el conformado magnético (o electromagnético), ilustrado esquemáticamente en la fig. 5, se genera un campo magnético pulsado alrededor de la pieza metálica conductora; las corrientes inducidas interactúan con el campo para crear fuerzas de Lorentz que deforman la lámina sin contacto directo de punzones o matrices inferiores. Esta técnica permite deformaciones muy rápidas (ondas de choque del orden de microsegundos), con espesores casi constantes y sin marcas de herramienta, lo que la hace especialmente atractiva para aceros de alta resistencia y aleaciones de aluminio en aplicaciones automotrices. Sin embargo, el coste del equipo de descarga de condensadores y el control de los pulsos magnéticos limitan su uso a producciones medianas y a componentes de tamaño moderado (Kalpakjian & Schmid, 2014).

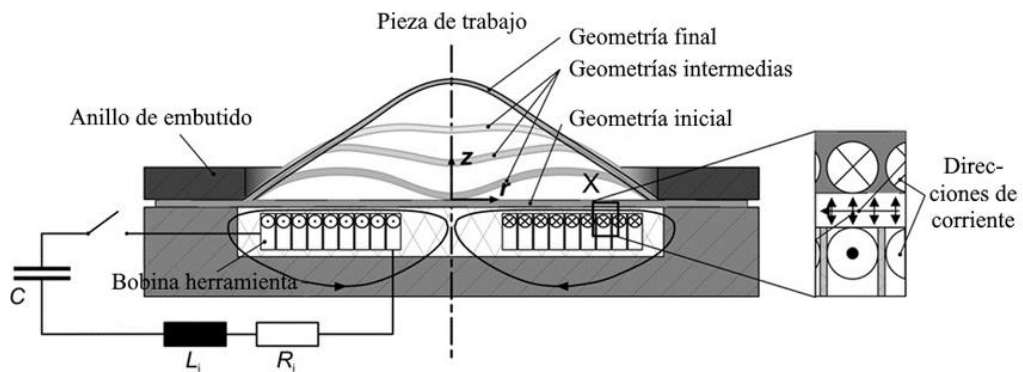


Figura 5: Esquema de un proceso de conformado de alta velocidad mediante campos electromagnéticos pulsados (Flores, 2022).

El conformado explosivo, como se aprecia en la fig. 6, utiliza cargas explosivas sumergidas en un medio fluido (generalmente agua) para generar ondas de presión que empujan la chapa contra un dado rígido. A diferencia del conformado magnético, aquí la energía se libera en un solo evento de alta energía, lo que permite formar piezas de gran superficie como paneles aeroespaciales o carcasas de turbinas. Entre sus ventajas figuran la posibilidad de obtener radios muy pequeños y formas complejas sin punzón interior; sus limitaciones incluyen la dureza de la superficie por choque hidráulico, riesgo de fisuración en bordes y la exigencia de instalaciones de seguridad para manejo de explosivos (Groover, 2010).

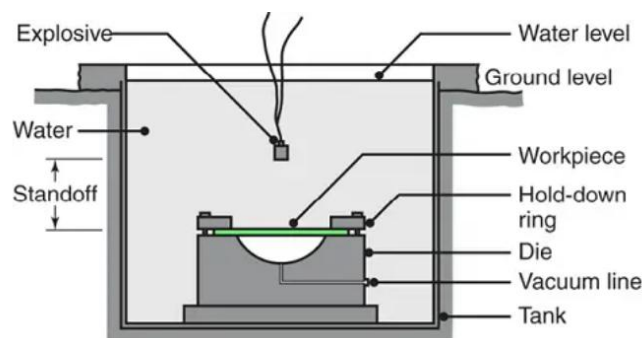


Figura 6: Ilustración esquemática del proceso de conformado explosivo (MachineMFG, s.f.).

Por último, en la fig. 7, se observa el proceso de conformado super-plástico, o superplastic forming según su denominación en inglés, basado en aprovechar la superplasticidad de ciertos materiales (aleaciones de aluminio, titanio o acero a temperatura elevada y velocidad de deformación muy baja) para reproducir la cavidad de un troquel mediante gas presurizado. La lámina se calienta hasta alcanzar un alargamiento mayor al 200 % sin fracturarse y se forma en un solo paso, obteniendo espesores muy uniformes y excelente acabado superficial. Sus principales inconvenientes son los largos tiempos de ciclo (horas por pieza), el alto consumo energético para mantener la temperatura y la necesidad de tratar los granos del material para lograr el comportamiento super-plástico (Dieter & Bacon, 2003).

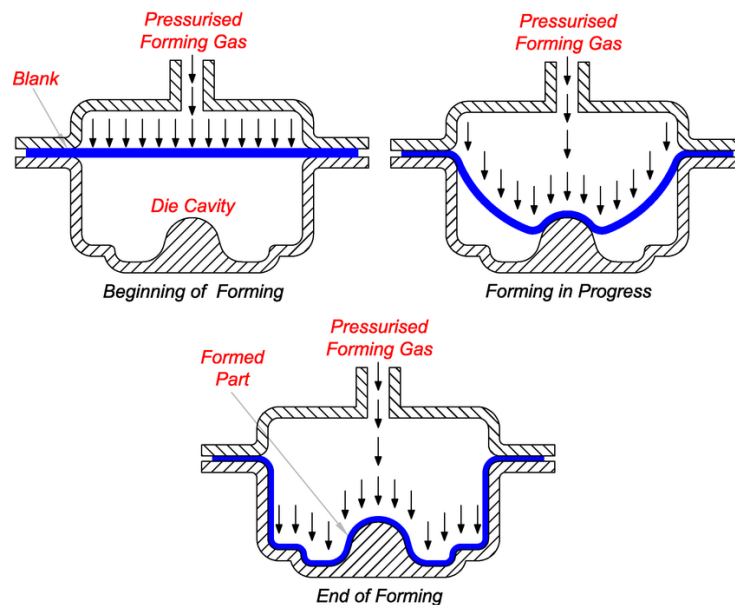


Figura 7: Esquema del proceso de superplastic forming. (Dieter & Bacon, 2003).

### 2.1.2 Conformado incremental de chapa metálica (ISF)

El conformado incremental de chapa metálica (ISF, *Incremental Sheet Forming*) es una técnica de fabricación no convencional que deforma plásticamente una lámina mediante la aplicación progresiva de cargas localizadas en un área de contacto reducida. Al prescindir de matrices rígidas específicas, el ISF ofrece una gran flexibilidad para producir piezas con geometrías complejas y reduce drásticamente los costes y tiempos asociados al utillaje tradicional.

Históricamente relegado frente a procesos masivos como la estampación o la embutición profunda, el ISF ha experimentado un notable resurgir gracias al desarrollo paralelo de las tecnologías de diseño y fabricación asistida por ordenador. Por una parte, los sistemas CAD han simplificado enormemente el flujo de trabajo: los ingenieros pueden generar y modificar modelos 3D de la pieza deseada en un entorno virtual, validar su viabilidad y exportar directamente la información geométrica a la fase de programación. Por otra, las

soluciones CAM, en combinación con control numérico CNC, permiten transformar esos diseños en trayectorias de herramienta óptimas y parametrizables, lo que evita la fabricación de matrices y acelera la puesta en marcha del proceso. De este modo, la integración CAD/CAM/CNC en ISF no solo facilita una rápida adaptación a cambios de diseño, sino que también ofrece una alternativa rentable para prototipado y series cortas, manteniendo al mismo tiempo un elevado grado de precisión y reproducibilidad.

Existen diversas variantes del ISF, cada una adaptada a diferentes requerimientos de diseño, precisión y productividad. Cada variante aprovecha la versatilidad del CAD/CAM/CNC y los avances en simulación por elementos finitos para anticipar fallos, optimizar parámetros de proceso (paso de herramienta, velocidad, temperatura) y garantizar la calidad final de la pieza. A continuación, se describen las principales modalidades:

### 2.1.2.1 Spinning

El *Spinning* o repujado, es un proceso de conformado incremental en el cual una herramienta rotativa presiona una chapa metálica contra un mandril que define la forma deseada, como se puede observar en la fig. 8. Este método se emplea comúnmente para producir piezas axisimétricas, como conos, cilindros y hemiesferas.

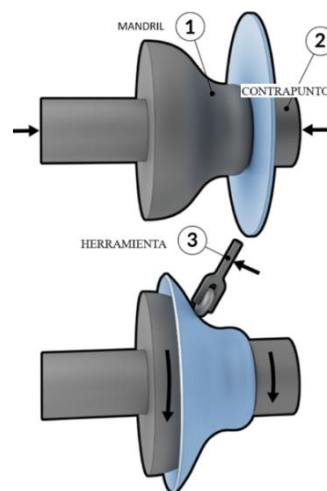


Figura 8: Representación del spinning convencional. Adaptado de Manufacturing Guide (s.f.) *Spin forming of discs*.

Se pueden distinguir dos variantes principales: (1) el hilado convencional, donde la chapa se conforma siguiendo el perfil del mandril sin cambiar el espesor y (2) el hilado de reducción, que implica una disminución intencional del espesor de la chapa durante el proceso.

El hilado es muy utilizado en la industria aeroespacial, automotriz y de utensilios domésticos debido a su capacidad para generar piezas ligeras y resistentes con un acabado superficial uniforme.

### 2.1.2.2 Conformado incremental de doble punto (TPIF)

Las piezas típicas fabricadas mediante *spinning* suelen ser axisimétricas y requieren un mandril para envolver la chapa metálica. Trabajos realizados por Kitazawa et al. (1996, 1997 y 1997) demostraron que era posible controlar la deformación en el spinning simétrico sin necesidad de un mandril, lo que marcó el primer paso hacia el conformado asimétrico. Estos avances, junto con las máquinas asistidas por computadora y el desarrollo de software CAD, hicieron posible el conformado incremental asimétrico de chapas metálicas (AISF, *Asymmetric Incremental Sheet Forming*).

La técnica AISF fue patentada por primera vez por Leszak en 1967 y se caracteriza por la ausencia de matrices específicas y por el hecho de que las herramientas están siempre en contacto con la pieza.

El primer método de AISF fue desarrollado por Powell y Andrew en 1992, y posteriormente Matsubara (1994) lo denominó método de abombado inverso (*backward bulge method*). En la fig. 9, se muestra el esquema del método de abombado inverso presentado inicialmente por Matsubara, en el que la chapa es presionada únicamente por la herramienta de conformado en un lado a la vez, mientras que la parte interna de la chapa permanece libre, excepto en la región en contacto con un soporte fijo.

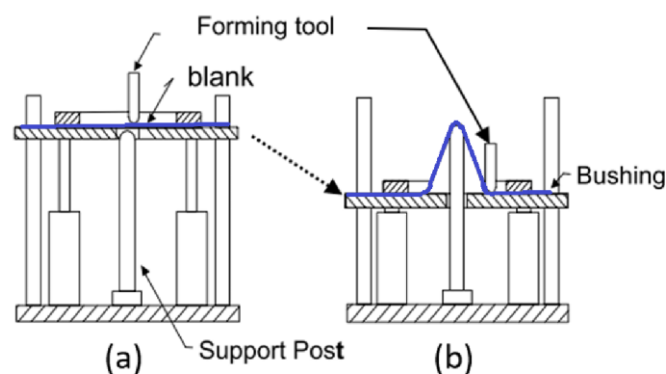


Figura 9: Método de abombado inverso: (a) antes del proceso de conformado y (b) durante el proceso (Matsubara, 1994).

El conformado incremental de doble punto (TPIF, *Two Point Incremental Forming*) es una evolución del proceso de conformado incremental convencional diseñado para mejorar la precisión y control durante la fabricación.

Este proceso tiene los mismos elementos que el método de abombado inverso, pero añade una herramienta controlada por CNC.

A diferencia del SPIF, el TPIF emplea dos herramientas simultáneamente como se aprecia en la fig. 10, una superior que realiza el proceso de conformado y otra inferior que actúa como soporte. Este enfoque permite mantener un control más estricto sobre el espesor de

la chapa y minimizar defectos como el adelgazamiento excesivo o las ondulaciones no deseadas.

En TPIF, la chapa metálica se mantiene entre el soporte de la pieza y un soporte fijo, mientras que la herramienta de conformado da forma a la lámina metálica. La matriz vertical puede ser un soporte específico, y, por lo tanto, la herramienta debe seguir presionando la pieza contra la matriz. Cuando la matriz es solo parcial, la chapa no siempre tiene que estar en contacto con la herramienta en ambos lados.

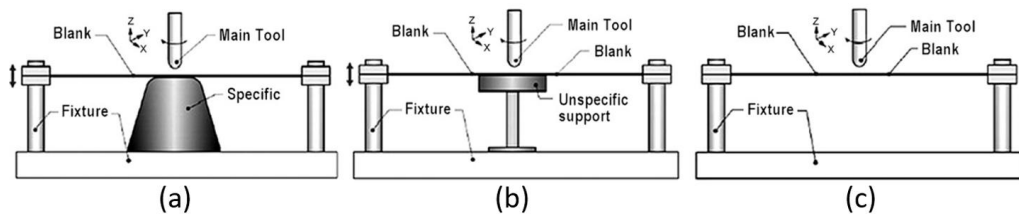


Figura 10: Métodos de conformado incremental asimétrico: (a) TPIF con matriz específica, (b) TPIF con un matriz parcial y (c) SPIF (Shankar et al., 2005).

### 2.1.2.3 Conformado incremental de un solo punto (SPIF)

El conformado incremental de un solo punto (SPIF, *Single Point Incremental Forming*) se desarrolló como una variante del TPIF en la que se eliminó el soporte opuesto a la cara en contacto con la herramienta. La idea de conformar sin una matriz ya estaba incluida en la patente de Leszak (1967), pero la falta de la tecnología necesaria para llevar a cabo este proceso retrasó los primeros estudios sobre este método hasta el trabajo de Jeswiet y Hagan (2002), quienes aplicaron por primera vez esta técnica.

Emplea una pieza para sujetar una chapa en su perímetro, mientras que una herramienta única describe trayectorias programadas y deforma el material, obteniendo una pieza tridimensional final. Los ejemplos de laboratorio de este proceso se pueden ver en la fig. 11, que contiene diferentes imágenes de una configuración experimental común para las configuraciones SPIF.

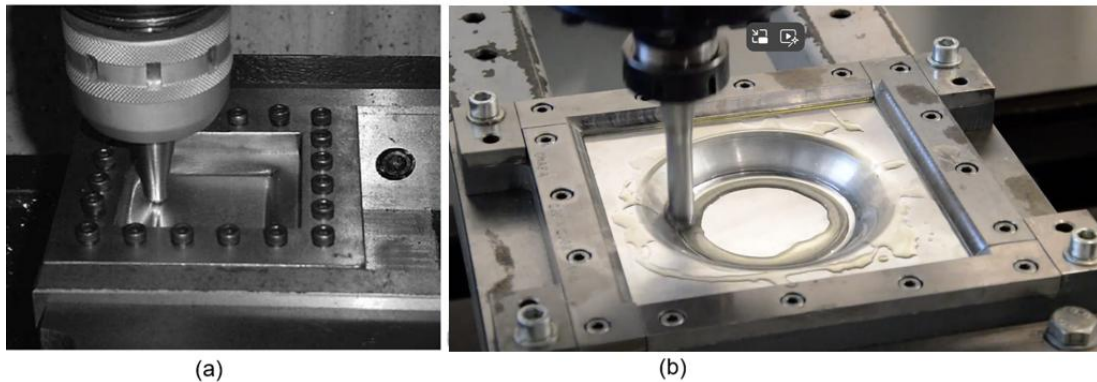


Figura 11: Experimentos de laboratorio realizados por SPIF: (a) fabricación de una pirámide de aluminio (Jong-Jin y Yung-Ho, 2003) y (b) Vista superior de un cono truncado (FICEP Automation, 2020, 02:15). Fuente: YouTube.

Entre las características de este método, destaca la flexibilidad en el diseño. Cambiar la trayectoria de la herramienta permite producir diferentes formas sin necesidad de modificar el utillaje. Al no requerir moldes, este método resulta económico para proyectos de pequeña escala o personalizados, aunque debido a la naturaleza incremental del proceso, los tiempos de fabricación son más largos en comparación con métodos tradicionales. Un ejemplo de las geometrías alcanzables se muestra en la fig. 12, que demuestra la viabilidad del proceso en la producción de diferentes formas.

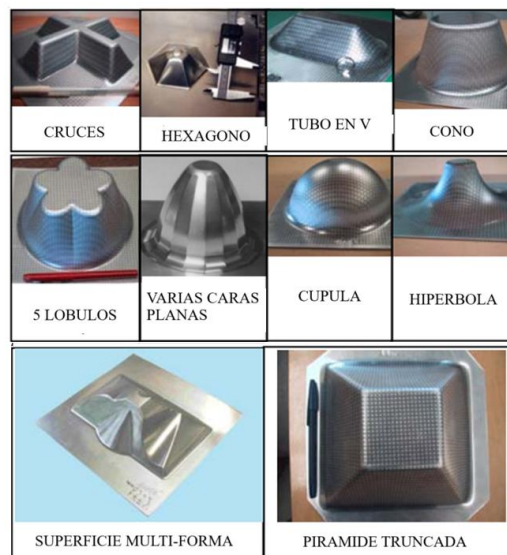


Figura 12: Diferentes formas utilizadas para demostrar la viabilidad del proceso, adaptado de Jeswiet et al. (2005).

Uno de los retos principales del SPIF es el control del espesor de la chapa, ya que el adelgazamiento excesivo puede comprometer la resistencia de la pieza. Por ello, se han desarrollado estudios enfocados en optimizar parámetros como la trayectoria de la herramienta, la velocidad de avance y las propiedades del material.

El SPIF se aplica en el sector automotriz para la fabricación de piezas personalizadas y prototipos, en el aeroespacial para la producción de componentes ligeros y de alta complejidad, y en el ámbito médico para la creación de implantes y prótesis anatómicamente adaptadas.

## 2.2 Fundamentos del conformado incremental de un solo punto (SPIF)

El SPIF, en su forma más sencilla, se realiza utilizando una chapa metálica fijada en su perímetro, la cual es moldeada gradualmente mediante una herramienta que sigue trayectorias previamente programadas para alcanzar la forma deseada. Este proceso está influenciado por múltiples factores que deben tenerse en cuenta, ya que afectan directamente en el resultado final. Entre ellos se encuentran los parámetros operativos, las propiedades derivadas de la mecánica de deformación, la capacidad de conformado del material en SPIF y la precisión dimensional de las piezas producidas. Esta sección se centra en analizar estos aspectos para establecer una base teórica que apoye los próximos capítulos.

### 2.2.1 Parámetros del proceso

Los parámetros del proceso en SPIF son elementos clave que influyen directamente en la viabilidad, calidad y eficiencia del conformado, así como en las propiedades finales de la pieza. Estos parámetros pueden clasificarse en cualitativos, como el material seleccionado de la chapa, su espesor, la forma de la herramienta o la estrategia de la trayectoria de la herramienta, y cuantitativos, como la velocidad de avance, el incremento del paso de la herramienta y el ángulo de conformado. En esta sección se analizan las diversas opciones y valores de los parámetros más relevantes descritos en la literatura, destacando su impacto en el desempeño y resultado del proceso incremental.

#### 2.2.1.1 Material y espesor

El material de la chapa es un factor determinante, ya que sus propiedades mecánicas afectan directamente la capacidad del material para deformarse plásticamente sin fracturarse. Entre los materiales más comunes se encuentran el cobre, magnesio, acero y titanio, aunque las aleaciones de aluminio son, con diferencia, el material más estudiado en el SPIF (McAnulty et al., 2016). Sin embargo, también se han investigado polímeros como PVC, PC y PE (Le et al., 2008; Martins et al., 2009) y otros materiales compuestos, como los paneles sándwich (Jackson et al., 2008).

El espesor de la chapa juega un papel crucial. Chapas más delgadas tienden a ser más fáciles de conformar, pero son más propensas a defectos como arrugas o roturas. Por otro lado, chapas más gruesas pueden requerir mayores fuerzas y, por lo tanto, una herramienta y un sistema más robustos.

Para metales, es común utilizar espesores en el rango de 0,3 a 2 mm, mientras que para polímeros se han estudiado valores más altos, de hasta 3 mm (Silva et al., 2010). Además, el conformado microincremental se ha llevado a cabo con espesores de chapa inferiores a 0,1 mm.

### 2.2.1.2 Parámetros de la herramienta

La herramienta suele tener una punta esférica o redondeada para minimizar los daños a la superficie de la chapa y reducir la fricción durante el conformado. Suelen estar fabricadas en acero duro. La herramienta más simple es una herramienta hemisférica (fig 13.a) fabricada en una sola pieza (Hagan y Jeswiet, 2003) generalmente se aplica una velocidad del husillo en el rango de 0 a 25000 rpm. Otra variante típica (fig 13.b) consiste en una bola rodante incrustada en un soporte, que se mueve libremente durante el proceso de conformado con el objetivo de reducir la fricción entre la herramienta y la chapa (Shim y Park, 2001; Lu et al., 2014). Además, a medida que el proceso SPIF ha evolucionado, se han empleado otras formas de herramientas que ofrecen diversas ventajas, como la herramienta de extremo plano (fig 13c) o las herramientas propuestas por (Allwood JM, 2007) en el proceso conocido como paddle forming.

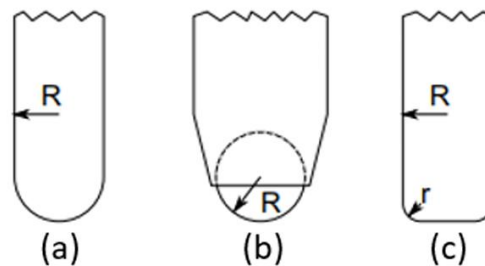


Figura 13: Herramientas utilizadas en SPIF: (a) herramienta hemisférica, (b) bola rodante y (c) herramienta en el extremo (McAnulty et al., 2016).

Normalmente, los radios de las herramientas están en el rango de 4 a 20 mm. Los radios más pequeños reducen el área de contacto con la chapa, concentrando la zona de deformación, mientras que los radios de herramienta más grandes tienen el efecto inverso.

### 2.2.1.3 Lubricación

La lubricación juega un papel crucial en la reducción de fricción, así como la temperatura de las superficies en contacto, lo que ayuda a disminuir el desgaste de la herramienta y mejora la calidad del producto final. Además, una buena lubricación puede contribuir a la reducción de las fuerzas de conformado. Entre los tipos de lubricantes, como aceites o grasas, comúnmente usado en metales, o una emulsión de jabón y agua en el conformado incremental de polímeros. Además, se han empleado polvos sólidos como el grafito y el polvo de  $\text{MoS}_2$  en estudios realizados por Fan et al. (2009), Husmann y Magnus (2016) y Zhang et al. (2010).

#### 2.2.1.4 Trayectorias

La estrategia de trayectorias, la bajada de paso y la velocidad de avance son parámetros del proceso especificados en el programa CNC que definen la traducción de la herramienta. Entre dichas estrategias, una de ellas consiste en aplicar una trayectoria de herramienta definida por incrementos fijos de  $z$  ( $\Delta z$ ) entre contornos discretos consecutivos aplicando diferentes valores  $z$  en función de la pendiente de la geometría de conformado. Cuanto mayor sea el valor del paso en  $z$ , menor será la calidad superficial de la pieza.

Otra estrategia consiste en utilizar trayectorias helicoidales (fig 14.b), donde el incremento de  $z$  se aplica progresivamente. Esta estrategia evita el pico de fuerza derivado de los decrecimientos puntuales de  $z$  y las marcas de paso (Hirt et al., 2003) y (Filice et al., 2002).

Estrategias más sofisticadas se basan en formas intermedias que aplican el proceso en dos etapas diferentes (fig 14.c), con la primera etapa similar a un paso de desbaste con decrecimientos mayores de  $z$  y un posterior pase de acabado realizado utilizando la estrategia de contorno con un paso de  $z$  bajo o una trayectoria helicoidal, reduciendo también las deformaciones excesivas en áreas con alta pendiente (Young y Jeswiet, 2004).

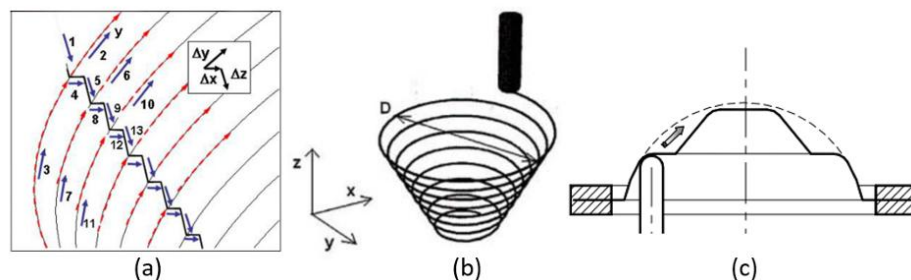


Figura 14: Estrategias de trayectorias de herramienta en SPIF: (a)  $\Delta z$  constante (Jeswiet, 2004), (b) estrategia de trayectoria espiral (Filice et al., 2002) y (c) conformado en dos etapas de una esfera (Kitazawa y Nakane, 1997).

El último parámetro relacionado con las trayectorias CNC es la velocidad de avance, que es el nombre dado a la velocidad lineal de la herramienta, generalmente medida en mm/min. El efecto de este parámetro resulta ser bastante pequeño según la cantidad de publicaciones sobre este tema. Por ejemplo, los pequeños efectos de la velocidad de avance en la conformabilidad fueron demostrados por Pereira Bastos et al. (2016) a diferentes velocidades, desde 1500 hasta 12000 mm/min, para cuatro materiales distintos. En consecuencia, la velocidad de avance se establece tan alta como sea posible dentro de los límites de los distintos elementos involucrados en el proceso SPIF para reducir el tiempo de producción. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, para velocidades muy altas, la lubricación y la rigidez de los diferentes elementos pueden requerir un rediseño.

## 2.3 Conformabilidad

La conformabilidad representa la capacidad de una lámina metálica para someterse a deformaciones plásticas significativas antes de experimentar fallos, como estricción localizada, fractura o arrugamiento. En los procesos de conformado convencional, la conformabilidad está limitada por el inicio de fenómenos de inestabilidad mecánica, como la formación de cuellos (necking) o el fallo por fractura cuando se alcanzan límites críticos de deformación. Factores como el espesor de la lámina, las propiedades mecánicas del material (límite elástico, resistencia a la tracción, coeficiente de endurecimiento) y las condiciones de proceso (geometría de herramienta, lubricación, velocidades) son determinantes en el comportamiento del material.

En esta sección, se muestran los métodos más comunes para evaluar la conformabilidad en los procesos convencionales y se discutirá cómo los procesos incrementales, como el SPIF y el TPIF, modifican estas restricciones, permitiendo alcanzar mayores niveles de deformación al aprovechar características como la aplicación localizada y progresiva de fuerzas.

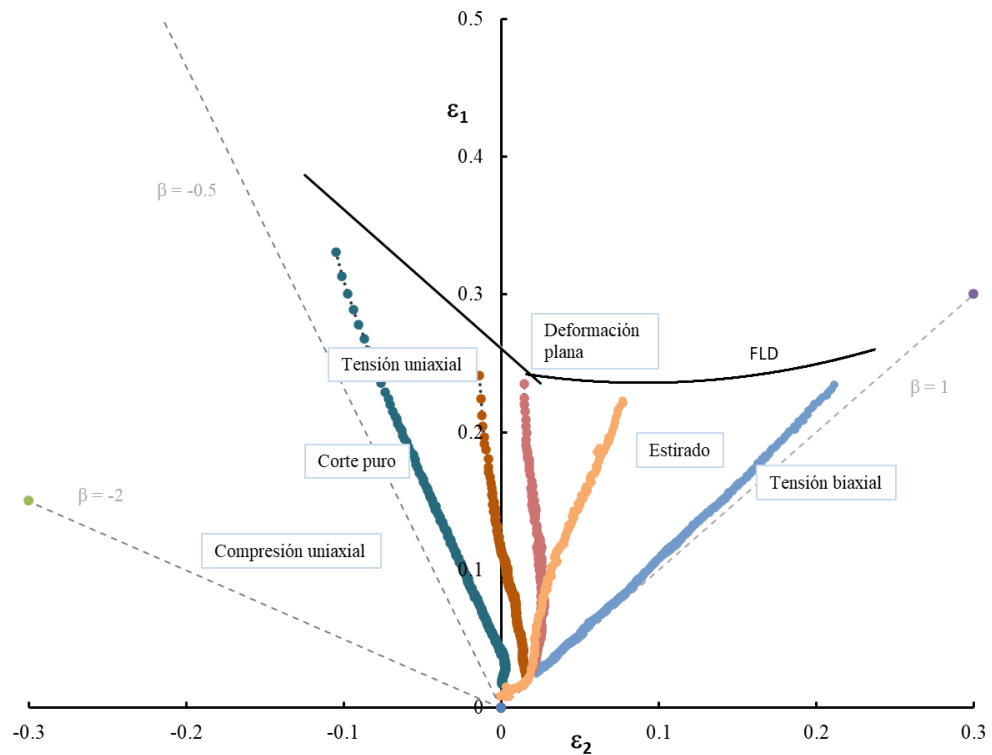
### 2.3.1 Conformabilidad en procesos convencionales

En los procesos convencionales, la conformabilidad está determinada por la aparición de fenómenos como la estricción localizada, la fractura y la inestabilidad en zonas críticas de la lámina.

Uno de los principales métodos para evaluar la conformabilidad en procesos convencionales es el Diagrama de Límite de Conformado FLD. Este diagrama representa la combinación de deformaciones principales que una lámina metálica puede soportar antes de alcanzar el fallo, ya sea por estricción localizada o fractura. Generalmente, las curvas límite de conformado se determinan con ensayos de embutición en probetas de chapa según Nakajima (punzón hemisférico) o según Marciniak (punzón cilíndrico de fondo plano).

El FLD se compone de dos ramas: la "rama izquierda" y la "rama derecha". Keeler y Backhofen fueron los primeros en introducir la "rama derecha", válida para casos en los que tanto la deformación principal como la secundaria son positivas (tracción biaxial). Posteriormente, Goodwin completó la FLC añadiendo la "rama izquierda", aplicable cuando la deformación secundaria es negativa (tracción uniaxial o deformación combinada con compresión).

En la gráfica 1, la "rama izquierda" representa caminos de deformación con relaciones de deformación ( $\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ ) que varían desde tracción uniaxial ( $\beta = -0,5$ ) hasta deformación en estado plano ( $\beta = 0$ ). La "rama derecha" cubre relaciones de deformación que van desde el estado de deformación plana hasta el estiramiento biaxial completo ( $\beta = 1$ ).



Gráfica 1: Esquema del diagrama de límite de conformado (FLD) y otros límites de fallo. Elaboración propia.

La fig. 15, presenta un ejemplo de las geometrías de probetas empleadas en los ensayos Nakazima (Paul, S. K. 2014), las cuales sirven para ilustrar los distintos regímenes de deformación en el Diagrama de Límites de Conformado (FLD).

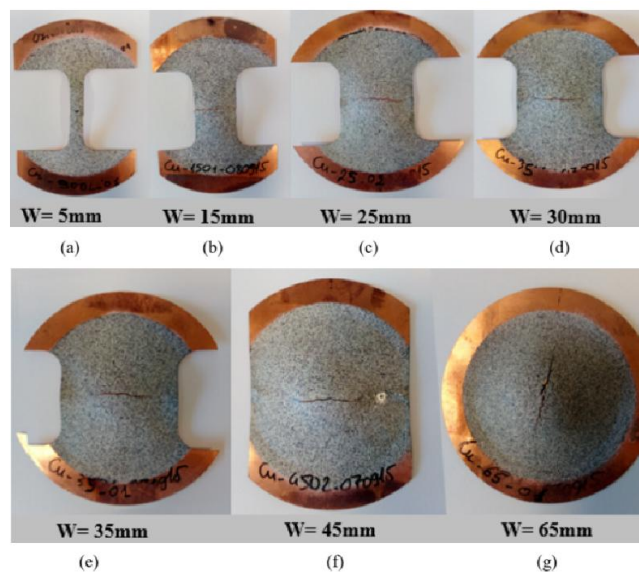


Figura 15: Geometrías de las probetas empleadas en ensayos Nakazima. (a) compresión uniaxial, (b) arrugamiento, (c y d) corte puro, (e) tensión uniaxial, (f) deformación plana y (g) tensión biaxial. Adaptado de Ayachi N, Guermazi N, (2020).

En el FLD, como se refleja en la fig. 16, se identifican zonas seguras (donde el material puede deformarse sin problemas), zonas críticas (donde comienza la estricción) y zonas de fallo (donde ocurre la fractura). Esto permite predecir el comportamiento del material bajo diferentes estados de tensión.

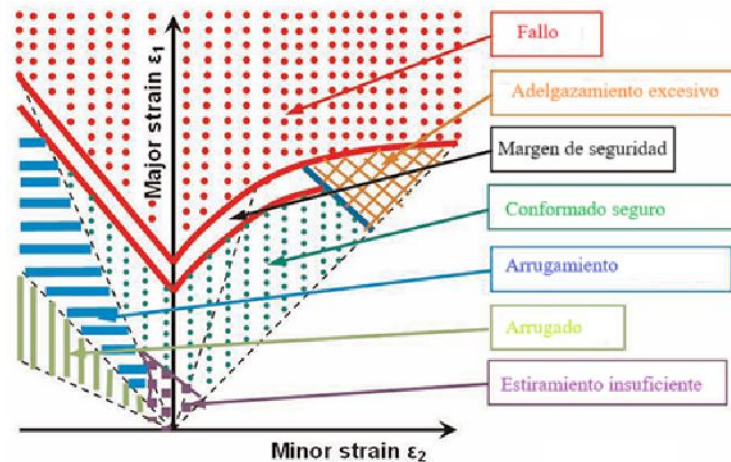


Figura 16: Representación esquemática del diagrama de límite de conformado indicando la región de conformado seguro. Adaptado de Paul, S. K. (2014).

La curva de estrangulamiento o estricción (necking) o Forming Limit Curve (FLC), es una herramienta que se utiliza para representar los límites de deformación en función de la deformación mayor ( $\epsilon_1$ ) y menor ( $\epsilon_2$ ) en el espacio de deformación principal. Este fenómeno marca un límite importante en la capacidad del material para soportar deformaciones adicionales, ya que la concentración de tensiones en el área estrangulada puede conducir rápidamente a la fractura. Este tipo de fallo es particularmente problemático en operaciones donde se requiere un alto grado de deformación, como el embutido profundo. Si los valores de deformación sobrepasan esta curva, el material falla y si están bajo la curva el material se encuentra en una zona segura. Este fenómeno se desarrolla en un estado de deformación casi plano, en el que la mayor parte de la deformación ocurre en un solo plano, lo que hace que el material sea vulnerable a la fractura dúctil si continúa deformándose de manera incontrolada.

La fractura es el fallo final que se produce generalmente como resultado de una deformación excesiva y localizada, después de que el material alcanza los límites de conformabilidad, definidos por la curva FLC. En este punto, el material ya no puede soportar más deformación plástica en esa zona, lo que provoca una fractura dúctil en modo 1 debido a la acumulación de tensiones en la región estrangulada.

Este fenómeno se encuentra directamente relacionado con los parámetros de proceso, como la velocidad de deformación, el espesor de la lámina y ductilidad del material.

La fractura dúctil se caracteriza por un gran alargamiento y deformación plástica antes de la ruptura final. En este tipo de fractura, las partículas de material se separan gradualmente

debido a la acumulación de tensiones locales en una zona del material que ha alcanzado su límite de deformación.

La fractura en los procesos de conformado de chapas metálicas es un fenómeno complejo que puede describirse en tres fases fundamentales reflejados en la fig. 17.: nucleación, crecimiento y coalescencia.

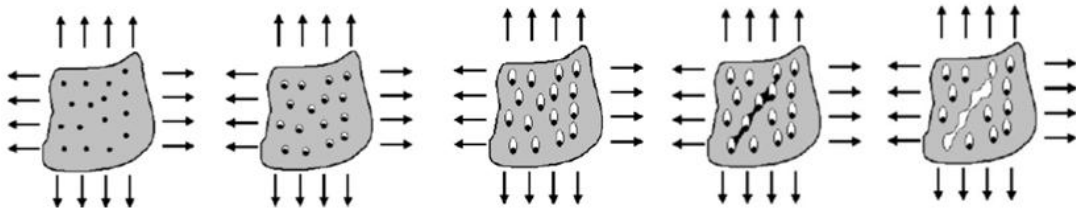


Figura 17: Fases de nucleación, crecimiento y coalescencia de microvacíos. Suárez FF, Utterback JM (1995).

La nucleación es el primer paso en la formación de una fractura y se refiere a la creación de pequeños vacíos o microporos en el material debido a la acumulación de tensiones locales especialmente en los puntos de inclusiones o defectos presentes en el material. Durante este proceso, las partículas de material se deforman plásticamente, y en presencia de tensiones locales, los átomos de la red cristalina se desplazan, creando pequeños huecos. Este fenómeno es más probable en áreas de alta concentración de tensiones, lo que generalmente ocurre en los límites de los granos o alrededor de inclusiones.

El crecimiento de los huecos nucleados es la segunda etapa, donde los huecos se agrandan debido a la deformación continua del material bajo tensiones adicionales.

A medida que la chapa se deforma, los huecos nucleados interactúan y tienden a fusionarse o crecer en dirección perpendicular a la carga aplicada, lo que provoca un incremento en el volumen del hueco. Dicha propagación, depende de la magnitud de las tensiones y la ductilidad del material. La resistencia del material disminuye, ya que el área efectiva de carga se reduce. Además, el crecimiento de los huecos está influenciado por la presencia de esfuerzos multiaxiales, que facilitan la expansión de estos en diferentes direcciones, contribuyendo a la localización de la deformación.

Este proceso de crecimiento es más acentuado en materiales que exhiben alta ductilidad porque su capacidad de deformarse plásticamente permite que los vacíos se expandan antes de que el material falle. Sin embargo, si las tensiones aplicadas continúan aumentando, el material puede pasar de una deformación plástica localizada a un modo de fractura más rápido y severo.

La coalescencia es la fase que describe el proceso mediante el cual los huecos se fusionan para formar una grieta continua. En materiales dúctiles, tiende a ser gradual, comenzando en áreas donde los huecos han alcanzado un tamaño crítico. La propagación de la grieta

en esta fase sigue el camino de menor resistencia, lo que suele ser a través de las zonas de mayor concentración de tensiones.

La coalescencia de huecos está fuertemente influenciada por las condiciones de carga, como el tipo de esfuerzo (tensión, compresión o corte) y la orientación de la carga en relación con la estructura del material. Además, la microestructura del material juega un papel crucial: materiales con gran cantidad de granos pequeños y una estructura homogénea tienden a ser más resistentes a la coalescencia debido a su mayor capacidad de distribuir la carga de manera uniforme.

Por último, en los procesos convencionales, la inestabilidad en el punto medio de la lámina constituye un desafío significativo. El punto medio de la lámina, al no estar completamente soportado, es propenso a la localización de tensiones. Esto puede resultar en una reducción de la capacidad de deformación, lo que limita la precisión y calidad de la pieza final. En términos técnicos, la curva de límite de conformado (FLC) muestra cómo las tensiones afectan la deformación, y el índice de estricción se incrementa significativamente en estas zonas, lo que reduce el rendimiento del proceso.

Aunque el uso del FLC es ampliamente aceptado en el conformado convencional de chapas, solo es eficaz si se cumplen cuatro hipótesis: (1) carga proporcional, (2) ausencia de flexión, (3) corte a través del grosor despreciable y (4) esfuerzo plano (Emmens y Van den Boogaard, 2009). Sin embargo, en los procesos ISF ninguna de estas hipótesis del FLC convencional se cumple estrictamente. En primer lugar, la carga aplicada por la herramienta no es proporcional, ya que la deformación se introduce de manera incremental en cada paso de la trayectoria (Emmens & Van den Boogaard, 2009). En segundo lugar, el contacto puntual y el radio finito de la herramienta inducen flexión local en la chapa, contraviniendo el supuesto de esfuerzo plano. Además, la hipótesis de corte a través del espesor despreciable deja de ser válida cuando el material se pliega alrededor del punzón, y la ausencia de flexión tampoco se garantiza en geometrías complejas. Estas particularidades estructurales y cinemáticas han impulsado un gran número de estudios orientados a desarrollar criterios alternativos de evaluación de la conformabilidad en SPIF, dada la insuficiencia del FLC para describir con precisión la respuesta de chapas ultrafinas bajo deformación incremental. Este desafío, aún no resuelto por la comunidad, motiva el análisis que se presenta en el siguiente subapartado, donde se exploran las metodologías más prometedoras para valorar la ductilidad y el límite de conformado en ISF.

### 2.3.2 Conformabilidad en procesos incrementales ISF

La conformabilidad es una propiedad fundamental en los procesos de conformado incremental de chapa, ya que determina la capacidad del material para deformarse plásticamente sin fracturarse. En el caso del *Single Point Incremental Forming* (SPIF), se han propuesto diversos indicadores para cuantificar esta capacidad. Uno de los más utilizados es el ángulo de pared ( $\alpha$ ), definido como el ángulo que forma la pared de la geometría final con el plano de la chapa como muestra la fig. 18.

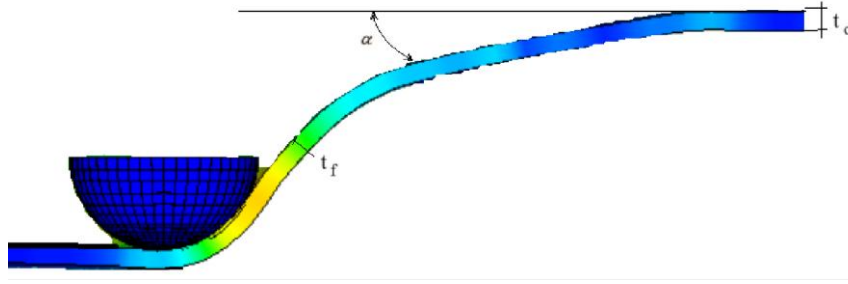


Figura 18: Representación esquemática del ángulo de pared ( $\alpha$ ) y la evolución del espesor de la chapa durante el proceso SPIF. Se observa la reducción de espesor desde el valor inicial ( $t_0$ ) hasta el espesor final ( $t_f$ ) en la zona conformada. Elaboración propia.

El ángulo de pared guarda una relación directa con las deformaciones principales inducidas en la pieza y, por tanto, con el límite de conformabilidad del proceso. Bajo la hipótesis de deformaciones planas y volumen constante, se cumple que la suma de las deformaciones principales es nula:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

donde  $\varepsilon_1$  es la deformación principal a tracción,  $\varepsilon_2$  la deformación en la dirección perpendicular al plano de tracción, y  $\varepsilon_3$  la deformación en el espesor. Diversos estudios han demostrado que, durante el proceso SPIF,  $\varepsilon_2$  es próxima a cero, por lo que se cumple que  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$ . A partir de esta condición, se obtiene la relación entre el espesor final ( $t_f$ ) y el ángulo de pared ( $\alpha$ ):

$$t_f = t_0 \cdot \cos\alpha$$

donde  $t_0$  representa el espesor inicial. Esta expresión, ampliamente validada experimentalmente (Ambrogio, Ciro, Filice, & Fratini, 2005), permite calcular las deformaciones principales a partir del ángulo de pared:

$$\varepsilon_1 = \ln \left( \frac{t_0}{t_f} \right) \cdot \left( \frac{1}{\cos\alpha} \right),$$

$$\varepsilon_3 = \ln \left( \frac{t_f}{t_0} \right)$$

Uno de los resultados más relevantes en este campo fue aportado por Jeswiet et al. (2005), quienes observaron que, a diferencia de los procesos convencionales, en SPIF es posible alcanzar deformaciones superiores al límite de conformabilidad sin que se produzca estricción localizada. No obstante, existe un ángulo límite de fractura  $\alpha_c$ , a partir del cual la chapa se fractura de forma abrupta. Según Silva, Martins y Alves (2019), este ángulo puede aproximarse mediante la expresión:

$$\alpha_c = \tan^{-1} \left( \frac{\sigma_f}{\sigma_y} \right)$$

Donde  $\sigma_f$  es la tensión de fractura del material y  $\sigma_y$  es su límite de fluencia.

Por debajo de este ángulo, el proceso puede considerarse estable; por encima, la fractura resulta inevitable.

Aunque el ángulo de pared constituye un indicador práctico y ampliamente utilizado, no es el único criterio empleado para evaluar la conformabilidad en SPIF. La creciente complejidad geométrica de las piezas, así como la necesidad de predecir la fractura de forma más precisa, ha motivado el desarrollo de otros métodos complementarios. Entre ellos destacan el *Forming Limit Diagram* (FLD) adaptado, la *Fracture Forming Line* (FFL), los modelos de daño basados en triaxialidad y deformación equivalente, y diversas métricas derivadas de simulaciones mediante elementos finitos.

Numerosos estudios sobre ISF y específicamente sobre SPIF demuestran que existe un aumento en la conformabilidad y una estabilización del necking en comparación con los procesos convencionales. De manera general, los límites de conformado en SPIF se definen a través del límite de fractura (Fracture Forming Limit, FFL). Este FFL normalmente se localiza sensiblemente por encima de la curva límite de conformado (Forming Limit Curve, FLC), que controla el fallo por estricción en operaciones convencionales de deformación plástica de chapa. La deformación incremental retrasa el inicio del fenómeno de estricción, ya que las fuerzas se concentran en un área limitada de la lámina, reduciendo el riesgo de formación de defectos globales. La región entre la FLC y el FFL es inestable, y cualquier punto de deformación dentro de este intervalo es alcanzable sin que se desencadene la fractura. Los estudios realizados por Vallellano et al. (2008) y López-Fernández et al. (2024) también mostraron que, en chapas de AA2024-T3, el FFL puede estar muy próximo a la FLC, adoptando incluso una forma en "V", como se observa en la fig. 19b.

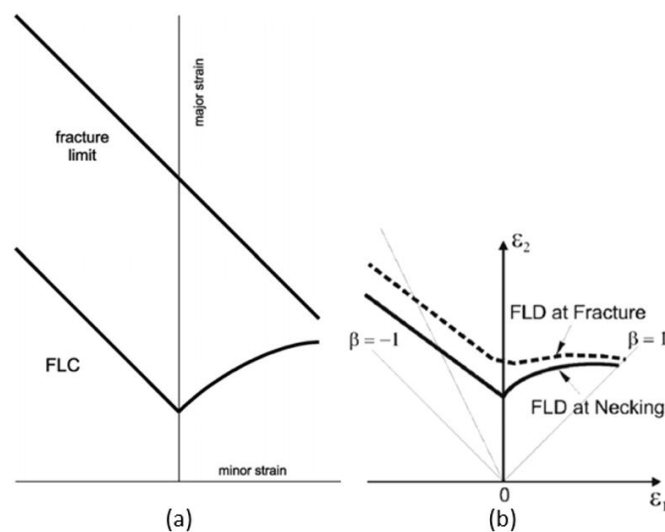


Figura 19: Representación del FLD que contiene la FLC y FFL: (a) material dúctil (Emmens y Van den Boogaard, 2009) y (b) material de baja ductilidad (Vallellano et al., 2008).

Para evaluar la conformabilidad en ISF, se emplean diversas metodologías experimentales y numéricas. Entre ellas, destacan los ensayos de embutición incremental con geometrías de referencia, en los que se analiza la profundidad máxima alcanzada antes de la fractura. Además, se utilizan mediciones de deformación mediante técnicas de correlación digital de imágenes (DIC), que permiten obtener mapas de deformación en tiempo real y determinar los valores críticos antes de la rotura. Otra estrategia común es la evaluación del FFL a partir de ensayos específicos, que permiten caracterizar la conformabilidad del material bajo condiciones de carga incremental. Las geometrías empleadas para realizar este análisis incluyen conos truncados para la región de deformación plana y pirámides truncadas para la zona biaxial. Ambas geometrías presentan ángulos de embutición variables, como se muestra en la fig. 20, ya que garantizan trayectorias de deformación proporcionales y controladas hasta el punto de fractura.

Además, Isik et al. (2014) propusieron una metodología para definir los límites de conformabilidad en el dominio del cortante en el plano, es decir, el límite de conformabilidad a la fractura por cortante (SFFL). El procedimiento se basa en la realización de dos ensayos: el ensayo de cortante en puente gemelo, propuesto por Brosius et al. (2011), y el ensayo de cortante en plano (fig. 20). Esto permite obtener trayectorias de deformación casi rectas y evaluar las deformaciones en fractura mediante mediciones de espesor.

Posteriormente, Soeiro et al. (2015) propusieron un método más simple para obtener el SFFL basado en una nueva geometría generada por SPIF. El ensayo consiste en la fabricación de una forma cónica lobular truncada con un ángulo de embutición variable, cuyas parejas de deformación en fractura determinan el límite de fractura por cortante. La principal ventaja de esta geometría es que la fractura ocurre en ausencia de estricción; por lo tanto, no es necesario realizar mediciones adicionales de espesor.

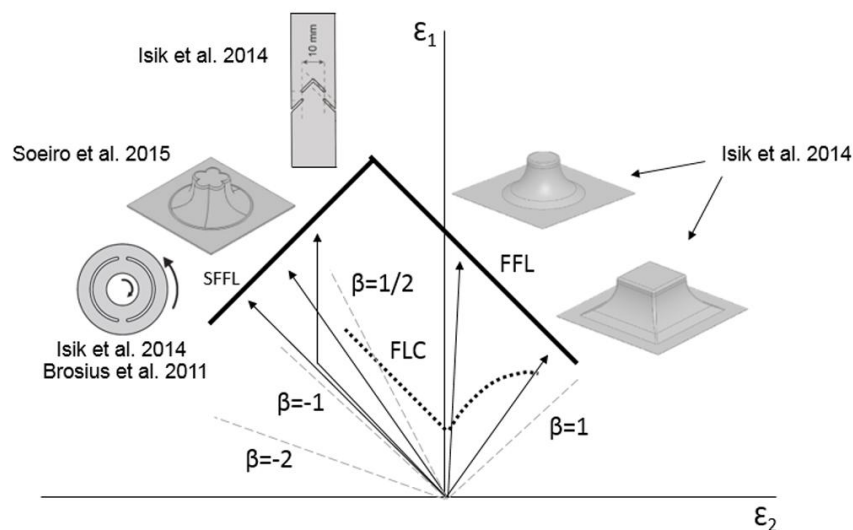


Figura 20: Representación esquemática de las diferentes pruebas propuestas en función de las trayectorias de deformación obtenidas. (López-Fernández et al., 2024).

Eyckens (2007) explicó por qué los diagramas convencionales de límite de conformado (FLC) no son aplicables a SPIF. Las razones señaladas fueron que los FLC convencionales solo son válidos bajo las siguientes condiciones: trayectoria de deformación lineal, esfuerzo cortante despreciable a través del espesor, estado de esfuerzo plano y deformación causada principalmente por fuerzas de membrana sin doblado. Estas condiciones no se cumplen en el conformado incremental.

Centeno et al. (2017) realizaron estudios sobre los límites de fallo en el acero inoxidable AISI 304 y encontraron que el mecanismo responsable era un retraso en la estricción seguido de fractura dúctil, especialmente cuando se usaban herramientas de mayor diámetro, lo que generaba una baja relación ( $t_0/R$ ) entre el espesor inicial de la lámina ( $t_0$ ) y el radio de la herramienta ( $R$ ). Los límites de fallo dependían del diámetro de la herramienta, y una reducción en este diámetro mejoraba la conformabilidad. Al comparar con el doblado por estiramiento, encontraron que, mientras que las deformaciones de fractura se localizaban cerca de la línea de fractura en los diagramas de límite de conformado, en SPIF se ubicaban mucho más arriba.

Emmens y Van den Boogaard (2008) investigaron si la mecánica de conformado en SPIF podía explicarse mediante el conformado por cizalladura (shear). Más adelante, Emmens y Van den Boogaard (2009) detallaron los mecanismos que explican la mejora de la conformabilidad en SPIF, resumiéndolos en seis fenómenos diferentes: esfuerzo de contacto, doblado bajo tensión (bending-under-tension), cizalladura (shear), deformación cíclica (cyclic straining), incapacidad geométrica para el crecimiento de defectos y esfuerzo hidrostático.

La cizalladura (shear) se produce en las zonas cercanas a la punta de la herramienta, donde las fuerzas tangenciales inducen un deslizamiento relativo de las capas del material, favoreciendo la deformación sin la aparición inmediata de fisuras. La chapa se somete a un estado de flexión y tracción simultáneo debido al contacto con la herramienta. Esta flexión local, reduce el gradiente de deformación en la dirección de la tensión principal, retrasando la formación del necking.

Según Malhotra et al. (2012), como se muestra en la fig. 21, este mecanismo genera una mayor acumulación de deformación plástica en la superficie externa de la chapa en comparación con la interna, lo que altera la evolución del daño y permite mayores niveles de conformado antes de la fractura.

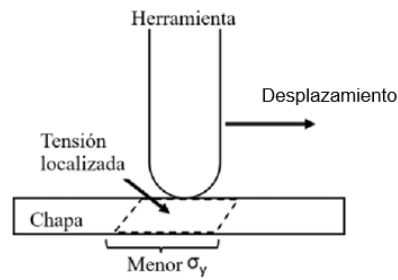


Figura 21: Diagrama de la cortante localizada inducida por la herramienta en SPIF. Elaboración propia.

Por otro lado, el doblado o flexión del material, especialmente en geometrías de mayor curvatura, contribuye a que el material se deforme de manera más controlada, reduciendo el riesgo de fallos por estricción. La capa externa sufre un estado de tracción, mientras que la capa interna experimenta compresión. Esto genera un endurecimiento localizado en la superficie externa, lo que permite alcanzar mayores niveles de deformación antes de que se inicie la estricción. Malhotra et al. observaron que este fenómeno contribuye a que la fractura en ISF ocurra en una zona de transición en lugar de en la zona de contacto con la herramienta.

En este sentido, diversos estudios han demostrado que el aumento de la conformabilidad en SPIF no se debe únicamente a la flexión localizada inducida por el radio de la herramienta, sino también a la menor triaxialidad acumulada. En ISF, la triaxialidad aumenta localmente debido a la naturaleza incremental del proceso y a la interacción entre las tensiones de compresión, cizalladura y flexión. La deformación progresiva permite una redistribución más homogénea de las tensiones y reduce el riesgo de nucleación de huecos en áreas críticas. Esto se debe a que la triaxialidad está directamente relacionada con el crecimiento de huecos, lo que condiciona la fractura dúctil.

La influencia del crecimiento de huecos en la fractura fue analizada por McClintock (1968), quien estudió la evolución de huecos cilíndricos y esféricos sometidos a diferentes estados de carga. Su modelo predice que el crecimiento de vacíos depende de la triaxialidad de tensiones ( $\eta$ ), es decir, de la relación entre la tensión hidrostática y la tensión de von Mises.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$$

Una mayor triaxialidad de tensiones acelera el crecimiento de huecos, favoreciendo la fractura del material. En los procesos convencionales de conformado, la triaxialidad suele ser baja, lo que limita la capacidad de deformación antes del fallo. Sin embargo, en procesos donde la triaxialidad es elevada, los huecos crecen rápidamente y pueden coalescer, causando la fractura dúctil del material.

El modelo matemático de McClintock describe esta relación mediante ecuaciones que vinculan el crecimiento de los huecos con el estado tensional del material. En particular, estableció que los huecos cilíndricos y esféricos responden de manera distinta a las cargas

aplicadas, lo que influye en la forma en que el material falla bajo distintas condiciones de triaxialidad.

Rice y Tracey (1969) también analizaron este fenómeno y sugirieron que un aumento en la triaxialidad de tensiones resulta en una disminución exponencial de la ductilidad a la fractura, es decir, de la conformabilidad. Desde esta perspectiva, Bao y Wierzbicki (2004) vincularon el nivel de triaxialidad con el mecanismo que conduce a la fractura en materiales dúctiles. A partir de resultados experimentales y numéricos, afirmaron que en procesos con triaxialidad de tensión negativa, la fractura dúctil está gobernada por el modo de cortante, mientras que para niveles altos de triaxialidad positiva, el crecimiento de huecos es el mecanismo dominante de fallo. Entre estos dos extremos de triaxialidad, tanto el cortante como el crecimiento de huecos están presentes, como se muestra en la fig. 22. (Bao y Wierzbicki (2004), Wierzbicki et al. (2005)).

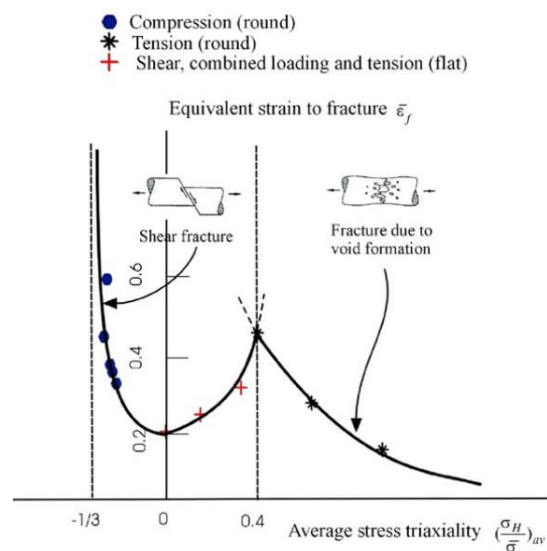


Figura 22: Dependencia de la deformación de fractura equivalente con la triaxialidad de tensión promedio, según Bao y Wierzbicki (2004).

En consecuencia, en procesos como SPIF, el modo de fractura dominante es el modo I (Martins et al., 2014). Conociendo la relación entre la triaxialidad y el crecimiento de huecos, algunos autores han intentado explicar el aumento de la conformabilidad desde la perspectiva de la triaxialidad. Concluyeron que los niveles de triaxialidad en SPIF son, en promedio, menores que en los procesos convencionales. Esto contribuye a reducir el nivel de daño en el material y, en consecuencia, a aumentar su conformabilidad.

### 2.3.3 Predicción de fallo en SPIF

El estudio de la conformabilidad en SPIF ha evolucionado significativamente en los últimos años, con un énfasis creciente en la predicción del fallo del material. Tradicionalmente, la fractura en SPIF se ha abordado mediante la extrapolación de los diagramas de límite de conformado (FLD) hacia el límite de fractura (FFL), obteniendo

los valores de deformación límite a partir de ensayos experimentales. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones, ya que la deformación en SPIF no sigue trayectorias convencionales y está influenciada por efectos como la flexión localizada y la variación de la triaxialidad de tensiones.

Un segundo enfoque más reciente para la predicción de fallo en SPIF se basa en el análisis de la triaxialidad de tensiones ( $\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$ ), parámetro clave en la evolución del daño y la fractura de materiales dúctiles. Martins et al. (2014) investigaron esta relación desde una perspectiva mecánica del daño, utilizando el criterio de crecimiento de huecos de McClintock (1968) y el criterio de Ayada (Ayada et al., 1987). Este análisis establece que la razón de triaxialidad de esfuerzos puede introducirse en una versión modificada del criterio de fractura por deformación efectiva, obteniendo la ecuación del daño crítico, la cual puede desarrollarse y expresarse en función del coeficiente de Lankford  $r$  y los pares de deformaciones en la fractura, como se muestra a continuación.

$$D_{crit} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}$$

$$D_{crit} = \frac{(1+r)}{3} (\varepsilon_{1f} + \varepsilon_{2f})$$

En SPIF, el proceso incremental genera una variabilidad en la triaxialidad de tensiones a lo largo de la trayectoria de deformación, lo que diferencia este proceso de los métodos de conformado convencionales. Para cuantificar este efecto, Martins et al. (2014) propusieron el uso de la triaxialidad promedio acumulada, definida como:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\varepsilon_f} \int_0^{\varepsilon_f} \eta(\varepsilon) d\varepsilon$$

Esto permite representar el FFL en el FLD como una línea con pendiente  $-1$ , consistente con el enfoque tradicional del conformado de metales, que supone que la fractura ocurre tras una reducción específica del espesor. Isik et al. (2014) propusieron esta relación para generar curvas FFL fiables con un solo punto de fractura obtenido en SPIF.

Martínez-Donaire et al. (2019) investigaron el ensanchamiento de orificios por SPIF en acero inoxidable AISI 304 y compararon la triaxialidad media frente a la deformación equivalente con valores obtenidos en ensayos de Nakazima (fig. 23). Observaron que la triaxialidad en SPIF era significativamente menor para niveles de deformación comparables, lo que indicaba que los límites de fractura tradicionales (FFL) no podían aplicarse directamente al régimen incremental, y propusieron que las predicciones de fallo debían desarrollarse en un espacio adaptado a SPIF.

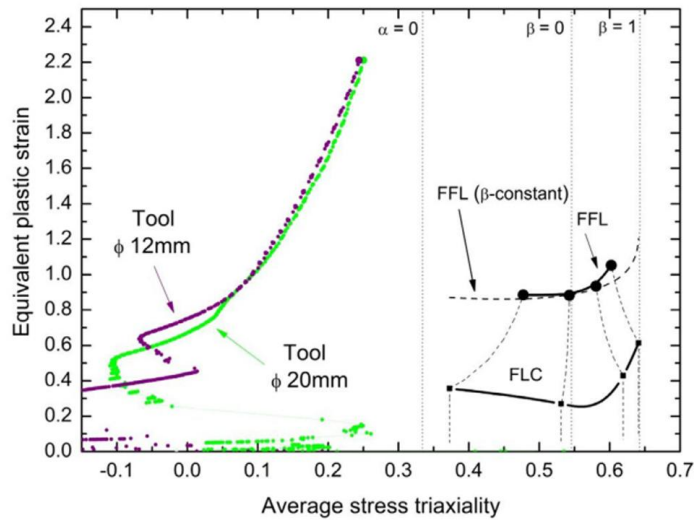


Figura 23: Representación de la conformabilidad en términos de la triaxialidad promedio frente a deformación plástica equivalente del punto de fractura en la cara exterior para el ensanchamiento de orificios realizado por SPIF (Martínez-Donaire et al., 2019).

López-Fernández, Borrego, Centeno y Vallellano (2021) extendieron el análisis del diagrama de triaxialidad media frente a deformación equivalente al comparar superficies cóncavas y convexas formadas por SPIF. Construyeron curvas en las que la triaxialidad media crece de manera casi lineal con la deformación equivalente durante las primeras etapas del proceso, alcanzando un valor crítico alrededor de 0,15–0,20 cuando empiezan a aparecer microvoids en la superficie externa. A partir de ese umbral, las curvas muestran una pendiente más pronunciada, reflejando la aceleración del daño plástico. Además, al superponer las trayectorias de deformación de distintas geometrías de flanco, demostraron que los radios menores de herramienta desplazan estas curvas hacia la derecha (mayores deformaciones antes del pico de triaxialidad) y hacia arriba (mayores niveles de triaxialidad máxima), confirmando la influencia dominante del contacto local en la mecánica de fallo en SPIF.

López-Fernández, Borrego, Centeno y Vallellano (2024) ampliaron el estudio de la predicción de fractura en SPIF utilizando el espacio de triaxialidad media de tensiones ( $\eta$ ) frente a deformación equivalente ( $\varepsilon_{eq}$ ). En sus experimentos de rebordeado por estiramiento, identificaron un locus de fractura específico para SPIF, al que denominaron Incremental FFL, el cual se encuentra en la zona de baja triaxialidad del espacio  $\eta - \varepsilon_{eq}$ . Este se diferencia claramente del FFL observado en ensayos de Nakazima, que abarca regiones de triaxialidad más elevadas y trayectorias de carga cuasi proporcionales.

El análisis de estos resultados reflejados en la fig. 24, evidenció que los procesos incrementales como SPIF presentan trayectorias de carga no proporcionales y niveles más bajos de triaxialidad, lo que contribuye a una mayor conformabilidad antes de la fractura.

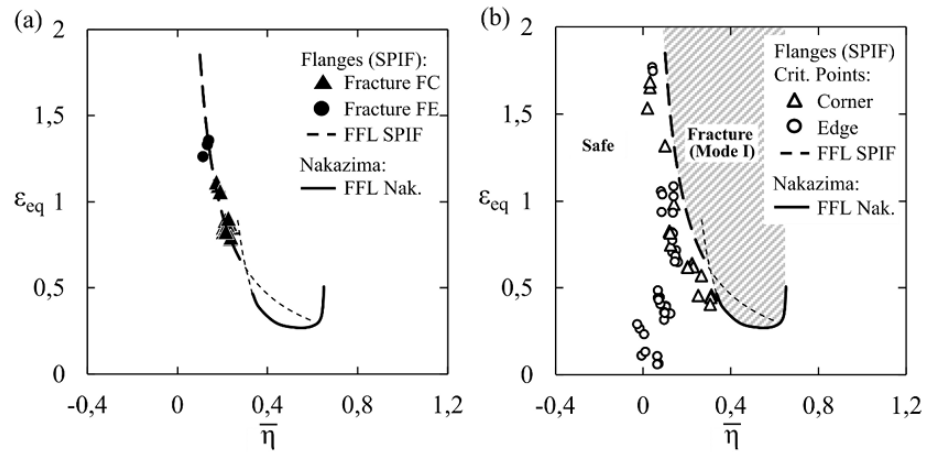


Figura 24: Representación en el diagrama  $\eta - \epsilon_{eq}$  de: (a) puntos de fractura y curvas FFL obtenidas en procesos de ensanchado por SPIF y en ensayos Nakazima, y (b) locus general de fractura en modo I y puntos críticos correspondientes a bridas sin fractura (López-Fernández et al., 2024).

Estos hallazgos resaltan la necesidad de desarrollar criterios de fallo adaptados a los mecanismos específicos del SPIF, y refuerzan la importancia de utilizar modelos de plasticidad anisotrópica calibrados experimentalmente para predecir la localización de la fractura. Si bien se identificó una región de fallo en el espacio  $\eta - \epsilon_{eq}$  común a SPIF y Nakazima, se sugiere realizar nuevos estudios experimentales para evaluar la aplicabilidad de este enfoque a otras variantes del conformado incremental.

#### 2.3.4 Simulación numérica en procesos de conformado de chapa

El método de elementos finitos (FEM) consiste en la discretización del material en pequeños elementos conectados mediante nodos (fig. 25), lo que facilita el análisis de tensiones, deformaciones y otros fenómenos físicos asociados al conformado de chapa (Ambrogio et al., 2005). A través de este método, es posible evaluar la influencia de parámetros como la trayectoria de la herramienta, la fricción, la temperatura y la anisotropía del material en la conformabilidad del proceso (Jeswiet et al., 2005).

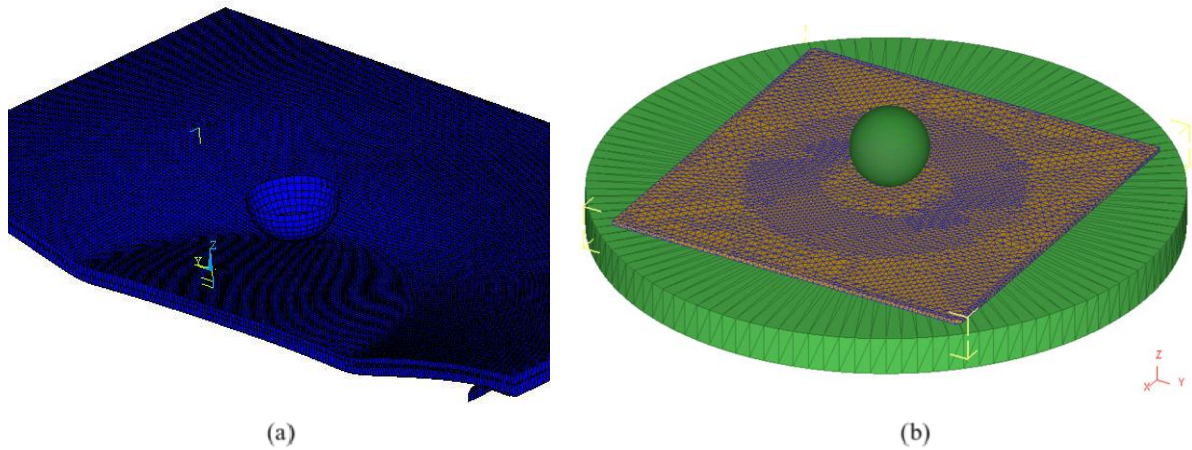


Figura 25: Modelos de elementos finitos de conformado incremental de chapa: (a) Modelo empleado para este trabajo usando Ansys APDL (Elaboración propia) y (b) modelo incluyendo matriz y herramienta en. López-Fernández, G. Centeno, A.J. Martínez-Donaire, D. Morales-Palma, C. Vallellano (2019)

En procesos de conformado volumétrico como la forja, la simulación numérica permite modelar con precisión la interacción entre los volúmenes de material deformado y no deformado. Esta representación detallada es esencial para predecir defectos internos como fisuras, arrugas o discontinuidades en la estructura del material (Shin et al., 2002). Tanto la forja como el conformado incremental comparten similitudes en cuanto a la complejidad de sus modelos numéricos, ya que ambos implican grandes deformaciones plásticas, contactos herramienta-material y trayectorias de carga no proporcionales. Estos factores exigen formulaciones avanzadas en el método de los elementos finitos (FEM) para obtener resultados fiables (Hussain et al., 2007).

En la simulación numérica de procesos de conformado, la resolución de las ecuaciones de movimiento puede abordarse mediante dos enfoques principales: el método implícito y el método explícito, la Tabla 1, muestra las características de ambos métodos con sus diferenciaciones.

El método implícito es más adecuado para problemas estáticos o cuasi-estáticos, donde las cargas evolucionan de forma gradual. Este enfoque ofrece gran estabilidad numérica, incluso ante grandes deformaciones, ya que en cada paso de tiempo se resuelve un sistema de ecuaciones no lineales (Belytschko et al., 2000; Flores et al., 2015). No obstante, su coste computacional es elevado y resulta menos eficiente en procesos con cinemáticas rápidas y contacto cambiante, como ocurre en el conformado incremental.

En contraste, el método explícito resuelve directamente las ecuaciones de movimiento sin necesidad de iteraciones, lo que lo hace especialmente eficiente en simulaciones transitorias y altamente dinámicas, como el Single Point Incremental Forming (SPIF). Entre sus principales ventajas destaca la capacidad de simular grandes desplazamientos y deformaciones con tiempos de cálculo significativamente menores en comparación con el método implícito. Asimismo, permite una predicción más precisa de la aparición de fallos como fracturas, arrugas o pérdida de estabilidad, gracias a la posibilidad de

implementar modelos avanzados de comportamiento del material, incluyendo leyes de endurecimiento no lineales y criterios de daño.

Sin embargo, el método explícito también presenta limitaciones. Para garantizar la estabilidad numérica, requiere utilizar pasos de tiempo extremadamente pequeños, lo que puede traducirse en tiempos de simulación prolongados en problemas de gran escala. Además, su estabilidad global es menor que la del método implícito, por lo que exige una cuidadosa selección y calibración de parámetros como las curvas esfuerzo-deformación y los modelos de daño.

Característica	Método Implícito	Método Explícito
Aplicaciones	Procesos estáticos o cuasi-estáticos	Procesos dinámicos y transitorios
Estabilidad numérica	Alta	Baja (requiere pasos de tiempo pequeños)
Coste computacional	Alto para grandes deformaciones	Bajo para simulaciones de corta duración
Ejemplo de aplicación	Estampación, embutición profunda	SPIF, TPIF, forja en caliente

Tabla 1: Comparación de métodos implícito y explícito en la simulación de ISF.

Dado que en procesos como SPIF no es posible acceder experimentalmente a la distribución interna de tensiones o a los parámetros asociados al daño acumulado, el empleo de simulaciones mediante EF explícito se convierte en una herramienta indispensable para caracterizar el comportamiento del material hasta su límite de conformabilidad. El método explícito permite resolver las ecuaciones de movimiento sin iteraciones, reduciendo significativamente el tiempo de cálculo y mejorando la predicción de fallos como arrugas o fracturas.

Este enfoque facilita además la incorporación de modelos avanzados de material, necesarios para simular con precisión trayectorias de deformación no proporcionales, típicas en SPIF. Aunque el número de investigaciones centradas en el estudio del *flanging* incremental y de los rebordes abiertos generados por estirado y/o estrechamiento mediante SPIF está creciendo en la literatura, sigue siendo escaso en comparación con otras aplicaciones del conformado incremental. Dada la relevancia de los procesos de *flanging* en la industria y la versatilidad del SPIF, un análisis detallado sobre su capacidad para generar este tipo de geometrías en términos de conformabilidad, modos de deformación, modos de fallo y precisión geométrica resulta especialmente pertinente. Esta línea de investigación constituye, por tanto, el eje central del presente trabajo.

## 2.4 Criterios de plasticidad y triaxialidad

Los criterios de plasticidad permiten describir el inicio y la evolución del comportamiento plástico de un material cuando se somete a un estado de tensiones. Estos criterios definen una superficie de fluencia en el espacio de tensiones, determinando cuándo el material comienza a deformarse plásticamente irreversiblemente. La elección del criterio adecuado es crucial en los modelos de elementos finitos, especialmente cuando se estudian procesos con deformaciones severas y materiales anisótropos, como es el caso del conformado incremental de chapas (SPIF).

Entre los criterios más empleados en el análisis de chapas metálicas se encuentran el criterio de von Mises, el de Hill (1948) y el de Barlat (1989). El criterio de von Mises es uno de los más utilizados debido a su formulación sencilla y a que proporciona resultados adecuados en materiales isótropos. No obstante, este criterio no tiene en cuenta la anisotropía inherente a materiales laminados como las aleaciones de aluminio, por lo que puede subestimar o sobreestimar la resistencia efectiva del material en diferentes direcciones.

Para mejorar la representación del comportamiento anisótropo, se han desarrollado formulaciones más avanzadas. El criterio de Hill (1948) incorpora anisotropía mediante una función cuadrática de las tensiones, mientras que el criterio de Barlat (1989) ofrece una representación más precisa del estado plástico mediante una función no lineal de las tensiones principales, ajustable a partir de ensayos experimentales. Este último resulta especialmente adecuado para aleaciones ligeras, como la AA2024-T3 utilizada en este estudio.

Por esta razón, se ha optado por emplear el criterio de Barlat (1989), ya que permite capturar de forma más realista la evolución de la deformación plástica en materiales anisótropos, lo cual es fundamental para la correcta simulación del proceso SPIF. A modo de ejemplo, se presenta la deducción de la expresión de la triaxialidad para el criterio de von Mises, dada su sencillez analítica.

A modo de demostración, se mostrará el procedimiento para obtener la ecuación de triaxialidad media asociada al criterio de von Mises.

### 2.4.1 Criterio de von Mises

El criterio de von Mises constituye uno de los modelos clásicos más utilizados para describir el inicio de la deformación plástica en materiales dúctiles. Su formulación ha sido ampliamente aplicada en ingeniería estructural y en simulaciones numéricas debido a su sencillez, solidez teórica y capacidad para predecir correctamente el comportamiento plástico en una gran variedad de situaciones.

Cuando se considera un estado plano de tensiones, el criterio puede representarse mediante una expresión matemática que describe una elipse en el plano de las tensiones principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ .

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 = 2\sigma_0^2$$

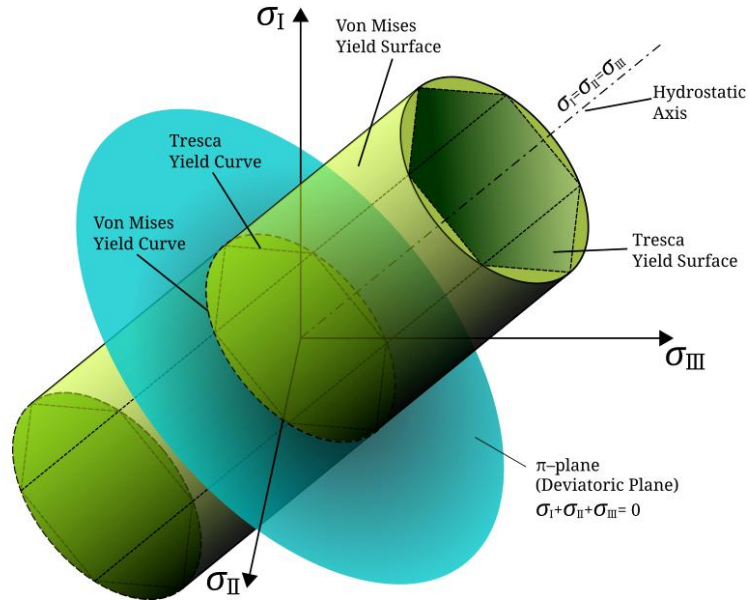


Figura 26: Representación tridimensional de las superficies de fluencia de von Mises y Tresca en el espacio de tensiones principales. Adaptado de Yield surfaces, por Wikimedia Commons.

Esta representación en la fig. 26, refleja el carácter isotrópico del criterio, en el que la superficie de fluencia es simétrica respecto a sus ejes. Como consecuencia, dos estados de tensión con igual magnitud, pero diferente orientación presenta la misma respuesta plástica.

La ley de flujo asociada se define como:

$$d\varepsilon_{ij} = \lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}$$

siendo  $\lambda > 0$  un factor de proporcionalidad. A partir de esta ley y bajo carga proporcional, se obtienen las deformaciones principales incrementales:

$$d\varepsilon_1 = \lambda(2\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$d\varepsilon_2 = \lambda(2\sigma_2 - \sigma_1)$$

De aquí se define el cociente de deformación como:

$$\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1}{2\sigma_1 - \sigma_2}$$

Y el incremento de la deformación equivalente como:

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{(1 + \alpha\beta)d\varepsilon_1}{\sqrt{\alpha^2 - \alpha + 1}}$$

Por otro lado, la tensión media bajo tensión plana se expresa como (asumiendo  $\sigma_3 = 0$ ):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{3}$$

Y la triaxialidad como el cociente entre la tensión media y la tensión equivalente de von Mises:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{3\sigma} = \frac{(1 + \alpha)}{3\sqrt{\alpha^2 - \alpha + 1}}$$

Estas expresiones permiten transformar trayectorias de carga proporcionales y límites de conformabilidad del espacio de deformaciones principales al espacio triaxialidad–deformación equivalente, lo que facilita el análisis del daño en procesos como el SPIF.

Si bien el criterio de von Mises ha demostrado ser eficaz en múltiples aplicaciones, su principal limitación reside en que está formulado exclusivamente para materiales isotrópicos. Por tanto, no es adecuado para describir el comportamiento anisotrópico que presentan muchas chapas metálicas, especialmente aquellas que han sido laminadas en frío, como es el caso de la aleación AA2024-T3 utilizada en este trabajo. En estos casos, es común el uso de modelos que sí consideran la anisotropía del material como es el caso de Barlat (1989).

#### 2.4.2 Criterio de Barlat 1989

El criterio de fluencia propuesto por Barlat et al. (1989) es ampliamente utilizado para describir el comportamiento anisotrópico de chapas metálicas, especialmente en aleaciones de aluminio.

La forma general del criterio de Barlat 1989, para materiales con simetría ortótropa en condiciones de tensión plana ( $\sigma_3 = 0$ ), se expresa como:

$$f(\sigma_{ij}) = \alpha|k_1 + k_2|^m + \alpha|k_1 - k_2|^m + c|2k_2|^m = 2\bar{\sigma}^m$$

donde  $m$  es un exponente dependiente del material (comúnmente entre 6 y 8 para aluminio), y los coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  dependen de los valores de anisotropía  $r_0$ ,  $r_{45}$  y  $r_{90}$ .

La triaxialidad de tensiones bajo estado de tensión plana se obtiene como:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$$

$$= \frac{(1 + \alpha)}{3} \frac{1}{\left( \frac{\alpha}{2} \left| \frac{1 + h\alpha}{2} + \sqrt{\left( \frac{1 + h\alpha}{2} \right)^2} \right|^m + \frac{\alpha}{2} \left| \frac{1 + h\alpha}{2} - \sqrt{\left( \frac{1 + h\alpha}{2} \right)^2} \right|^m + \frac{c}{2} \left| \sqrt{(1 - h\alpha)^2} \right|^m \right)^{\frac{1}{m}}}$$

A partir de la expresión de la triaxialidad de tensiones definida, se obtiene la expresión de la triaxialidad media de tensiones.

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\varepsilon_{eq}} \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} d\varepsilon_{eq}$$

El criterio de plasticidad de Barlat (1989) se emplea en este estudio debido a su capacidad para representar con mayor precisión la anisotropía plana característica de chapas metálicas laminadas. Este modelo, basado en una formulación no cuadrática del potencial de fluencia, permite capturar de manera más realista el comportamiento direccional del material bajo condiciones de carga complejas, superando las limitaciones de modelos isotrópicos como von Mises y de modelos con anisotropía simplificada como Hill 1948. Su aplicación se ha consolidado en estudios recientes de conformado incremental, dada su capacidad para mejorar la predicción del inicio de la localización de la deformación y la fractura en condiciones de carga multiaxial. Las ecuaciones que definen este modelo pueden consultarse en el artículo de J.A. López-Fernández (2021), donde se detallan específicamente en el contexto del conformado incremental de chapas de aluminio

### 3. Procedimientos experimentales

Este capítulo expone los procedimientos experimentales y la metodología empleada en este trabajo. En la primera sección, se describen las propiedades del material de chapa AA2024-T3 para el modelo 1 y AA7075-O en el Modelo 2, incluyendo las propiedades de tracción, los coeficientes de anisotropía de Lankford y la conformabilidad en el FLD. La segunda sección está dedicada a los experimentos de conformado, donde se detallan la configuración experimental, la preparación de las muestras y el proceso utilizado. Finalmente, la tercera sección aborda la metodología aplicada para evaluar la chapa obtenida durante el experimento.

#### 3.1 Propiedades mecánicas

El material seleccionado para este trabajo es una aleación de aluminio AA2024-T3 con un espesor de 1,2 mm, ampliamente utilizada en la industria aeronáutica debido a su alta resistencia mecánica y su favorable relación resistencia-peso. Esta aleación es conocida por su excelente resistencia, aunque presenta una ductilidad relativamente baja. Su composición, rica en cobre, le confiere una alta resistencia, pero también reduce su capacidad de deformación antes de la fractura. Para mejorar sus propiedades mecánicas y optimizar su comportamiento durante los procesos de conformado, el AA2024-T3 se somete a tratamientos térmicos, como el envejecimiento artificial. En este trabajo, las muestras se han extraído de un único lote con el objetivo de garantizar la homogeneidad en las pruebas.

Para la segunda chapa, correspondiente al Modelo 2, se ha seleccionado el material AA7075-O, con un espesor de 1,6 mm. Esta aleación pertenece a la serie 7000 y se caracteriza por su elevada resistencia mecánica y su buena relación resistencia-densidad. Sin embargo, en estado recocido (O), presenta una mayor ductilidad en comparación con otros estados tratados térmicamente, lo que facilita el conformado sin comprometer su integridad estructural.

Tanto la chapa de material principal de aluminio AA2024-T3 como la de aluminio de soporte AA7075-O han sido proporcionadas por la empresa especialista en materiales aeronáuticos AMI Metals Inc. Dado que el material es de calidad aeronáutica y posee los certificados a tal efecto, su precio es relativamente elevado en comparación con las mismas aleaciones de uso general. A modo meramente informativo, el coste de adquisición de 13 m<sup>2</sup> de material ha supuesto un desembolso de aproximadamente 850 \$ sin incluir gastos de envío ni embalaje.

##### 3.1.1 Propiedades de tracción

Debido a que el material para los ensayos experimentales se ha recibido cuando el trabajo ya estaba bastante avanzado, no ha sido posible caracterizar el material usado de forma

explícita. Sin embargo, dado que la industria aeronáutica realiza un control muy exhaustivo de calidad, es posible considerar que este lote de material tiene un comportamiento muy similar a otras partidas de ese mismo material. De este modo, para la realización del modelo numérico utilizado en este trabajo, se han empleado las propiedades mecánicas obtenidas en Lopez-Fernandez et. Al (2021) para la misma aleación, tratamiento térmico y espesor. En dicho trabajo, se llevaron a cabo ensayos de tracción con el objetivo de determinar parámetros fundamentales como el módulo elástico, el límite elástico y las propiedades de anisotropía del material AA2024-T3 en las diferentes direcciones con respecto a la dirección de laminación la fig. 27 muestra un ejemplo de la probeta usada para dichos ensayos, junto con la aproximación de la ley de comportamiento a través de la ley de Swift.

$$\sigma = 742,36(0,025 + \varepsilon^p)^{0,235}$$

La gráfica 2 muestra la curva tensión-deformación real de la aleación AA2024-T3.

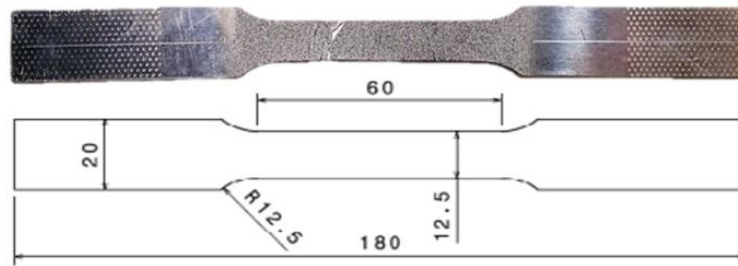
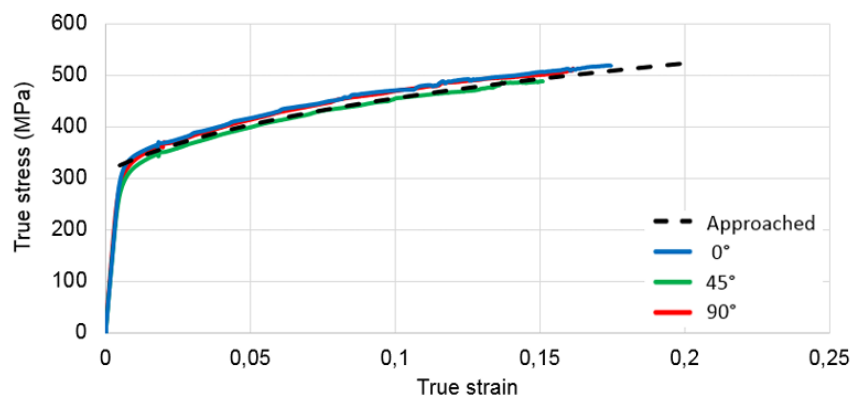


Figura 27: Probeta de ensayo de tracción para el Modelo 1 AA2024-T3. (López-Fernández et al., 2021).



Gráfica 2: Curva tensión-deformación para distintos ángulos respecto a la dirección de laminación. (Extraído de la tesis doctoral de José Andrés López Fernández, 2021).

Las características de la chapa AA2024-T3 usadas para el Modelo 1 fueron las siguientes:

AA2024-T3	
Densidad	2780 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	69,4 GPa
Coefficiente de Piosson	0,33
Criterio de Plasticidad	Barlat
Regla de endurecimiento	Power Law (HR = 2)
Coefficiente de resistencia (k):	710 MPa
Exponente de endurecimiento (n):	0,17
Exponente de Barlat (m):	8
Coefficientes de anisotropía:	R <sub>0</sub> = 0,82 (dirección de laminación) R <sub>90</sub> = 0,56 (dirección transversal)

Tabla 2: Propiedades mecánicas obtenidas para el Modelo 1 AA2024-T3.

Direction	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	E (GPa)	$\nu$
$r_0$	336		69.4	
$r_{45}$	306	526	67.1	0.33
$r_{90}$	318		68.2	

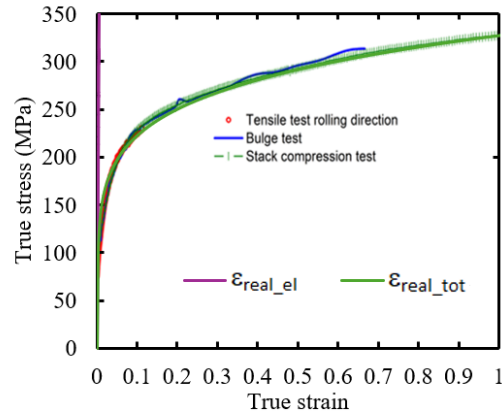
Tabla 3: Propiedades mecánicas a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación. (Extraído de la tesis doctoral de José Andrés López Fernández, 2021).

Las propiedades mecánicas de la aleación AA7075-O han sido determinadas mediante la aplicación de una ley de comportamiento basada en la Ley Hollomon, a partir de la cual se ha obtenido la curva tensión-deformación del material,

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_p$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo real,  $\varepsilon_p$  es la deformación plástica real,  $K$  es el coeficiente de resistencia y  $n$  es el exponente de endurecimiento por deformación.

Para ello, se han tomado como referencia los datos obtenidos por Yao et al. (2023) para la misma aleación y espesor, en el que se emplea un método de identificación hacia adelante para determinar las curvas tensión-deformación de la aleación AA7075-O, considerando la fase de estricción (necking) en la caracterización del material.



Gráfica 3: Tensión equivalente vs. deformación equivalente para tracción, ensayo propuesto por Yao et al. (2023). Aplicación de la ley de comportamiento para el estudio presente para la aleación AA7075.

Las propiedades para la chapa AA7075-O empleadas en el Modelo 2 fueron las siguientes:

AA7075-0	
Densidad	2810 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	62,5 GPa
Coefficiente de Piosson	0,33
Criterio de Plasticidad	Barlat
Regla de endurecimiento	Power Law (HR = 2)
Coefficiente de resistencia (k):	327 MPa
Exponente de endurecimiento (n):	0,165
Exponente de Barlat (m):	8
Coefficientes de anisotropía:	R <sub>0</sub> = 0,80 (dirección de laminación) R <sub>90</sub> = 0,75 (dirección transversal)

Tabla 4: Propiedades mecánicas obtenidas para el Modelo 2 AA7075-O.

### 3.1.2 Análisis de conformabilidad

Con el objetivo de analizar la conformabilidad del material, en el capítulo de resultados se compararán las deformaciones obtenidas en los ensayos experimentales y numéricos con la deformación límite del material. De nuevo, se ha considerado como curva FFL (Límite de Fractura) la obtenida por López-Fernández et al. (2021) a través de ensayos Nakazima en la fig. 28 y la curva de AA75075-O como se muestra en Borrego et al. (2020) que se muestra en la fig. 29. Los detalles completos de los ensayos y la metodología utilizada se encuentran en la tesis doctoral de López (2021). Como se ha comentado en el apartado 2.3, este diagrama representa las deformaciones límite de fractura para el material.

Las curvas FFL, fueron obtenidas a partir de los resultados de los ensayos de tracción y deformación realizados con la metodología Nakazima, que permitió determinar el límite de fractura del material bajo diversas condiciones de carga donde:

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

que representa la relación entre la deformación principal menor ( $\varepsilon_2$ ) y la mayor ( $\varepsilon_1$ ), y se calcula la deformación verdadera en espesor en el instante de fractura mediante la expresión:

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

donde  $t_0$  es el espesor inicial de la chapa y  $t_f$  el espesor final en la zona de fractura.

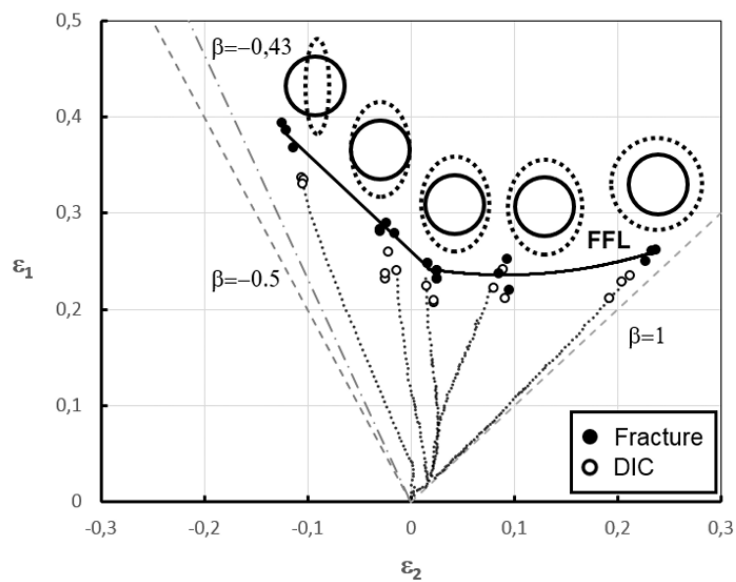


Figura 28: Diagrama de límite de conformado de AA2024-T3 representado por el FFL obtenido de los ensayos Nakazima, considerando cinco trayectorias de deformación diferentes. Fuente: López Fernández, J. A. (2021). Stretch and Shrinking of AA2024-T3 sheet by Single Point Incremental Forming (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla.

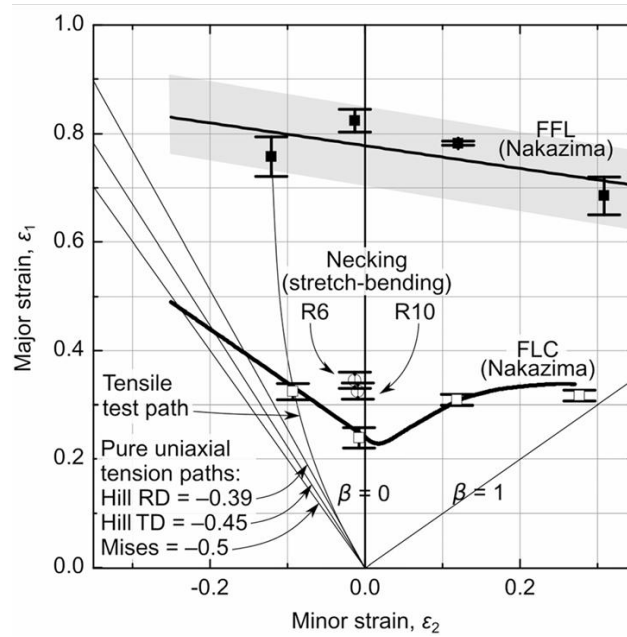


Figura 29: Diagrama de límite de conformado (FLD) en AA75075-O. Borrego et al. (2020).

### 3.2 Preparación de las probetas

Para facilitar el análisis de las deformaciones obtenidas durante los ensayos experimentales, se procedió a la preparación y marcado de las probetas con un patrón de referencia en su superficie. Este marcado resulta imprescindible para la aplicación del método Circle Grid Analysis (CGA), que permite cuantificar la deformación plástica mediante la comparación de las figuras geométricas antes y después del proceso de conformado.

El patrón fue grabado utilizando una máquina láser de fibra modelo LS-XT-S, fabricada por la empresa Lasing (Shandong, China) ubicada en el taller de fabricación de las instalaciones de la UMA (fig. 30). Esta máquina, de dimensiones compactas ( $50 \times 75 \times 88,3$  cm), forma parte de la gama económica ofrecida por el fabricante, y está orientada a usuarios que requieren soluciones accesibles y versátiles para el marcado láser sobre metales y ciertos polímeros.

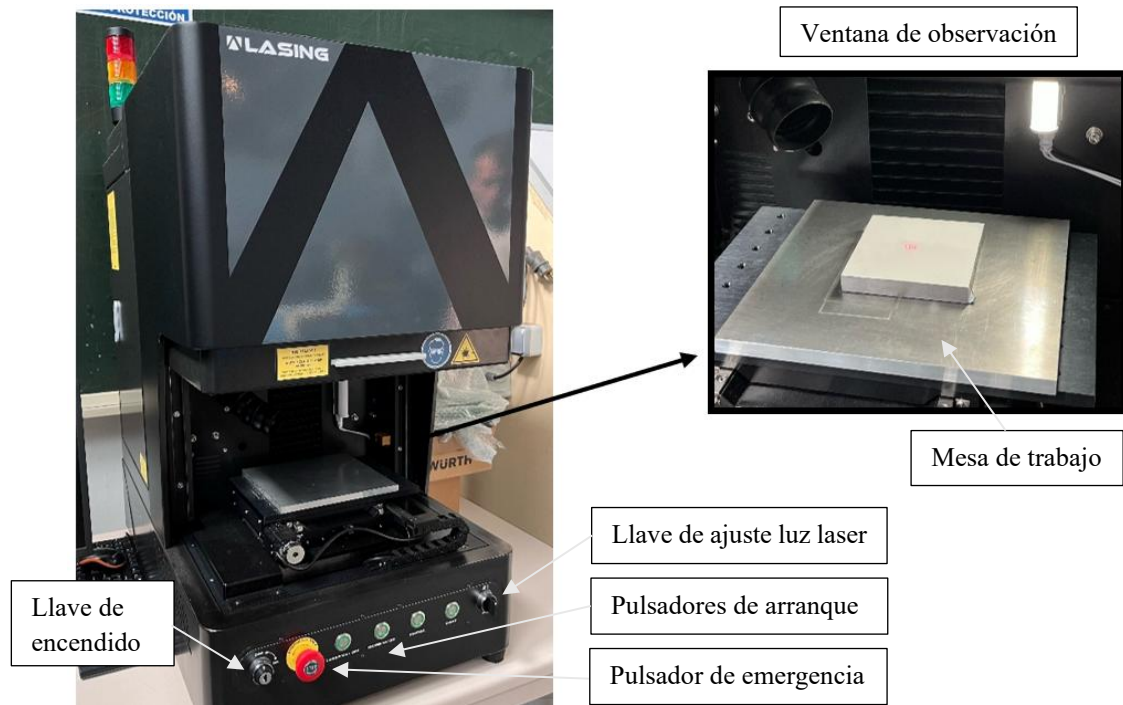


Figura 30: Máquina láser de fibra modelo LS-XT-S, fabricada por la empresa Lasing (Shandong, China) ubicada en el taller de fabricación de las instalaciones de la UMA.

Las probetas se obtuvieron a partir de chapas de aleación AA2024-T3 mediante corte con cizalla eléctrica en los servicios centralizados de la Universidad de Málaga. Las dimensiones de la chapa fueron de 180x180mm, según las especificaciones del ensayo de conformado incremental, realizando el patrón de grabado laser de 100 x100 mm.

Para la evaluación de la deformación superficial, se emplea el método Circle Grid Analysis (CGA). Esta técnica consiste en marcar sobre la chapa una malla de círculos con diámetro uniforme, que tras el conformado se transforman en elipses debido a la deformación plástica. Para este trabajo se ha empleado un código de elaboración propia en MATLAB que implementa esta técnica de análisis de deformaciones. El análisis de estas elipses permite calcular las componentes principales de la deformación y realizar una comparación directa con la curva límite de conformado (FLD).

Este tipo de marcado requiere un ajuste cuidadoso de los parámetros de trabajo, ya que una potencia excesiva puede generar marcas profundas o incluso micro-daños en la superficie de la chapa. Por ello, fue necesario llevar a cabo una etapa de ensayo preliminar sobre una chapa auxiliar, en la que se evaluó el efecto de diferentes configuraciones de potencia, velocidad y número de pasadas.

Para ello, se diseñó un patrón de prueba consistente en una retícula de cuadrados de distintos tamaños mediante SolidWorks, que se importó al software de control del láser. Este patrón permitió explorar un rango amplio de parámetros para identificar una configuración que garantizara buena visibilidad de las marcas sin afectar significativamente las propiedades mecánicas del material.

Como muestra la fig. 31, se realizaron 9 ensayos de patrón previo donde se validaron las condiciones óptimas para garantizar un grabado nítido y superficialmente seguro, sin provocar rebabas ni daños térmicos. Aquí se modificó la potencia desde 9% hasta un 30%, la velocidad de grabado en un rango de 310mm/s hasta 400 mm/s y el número de pasadas del patrón.

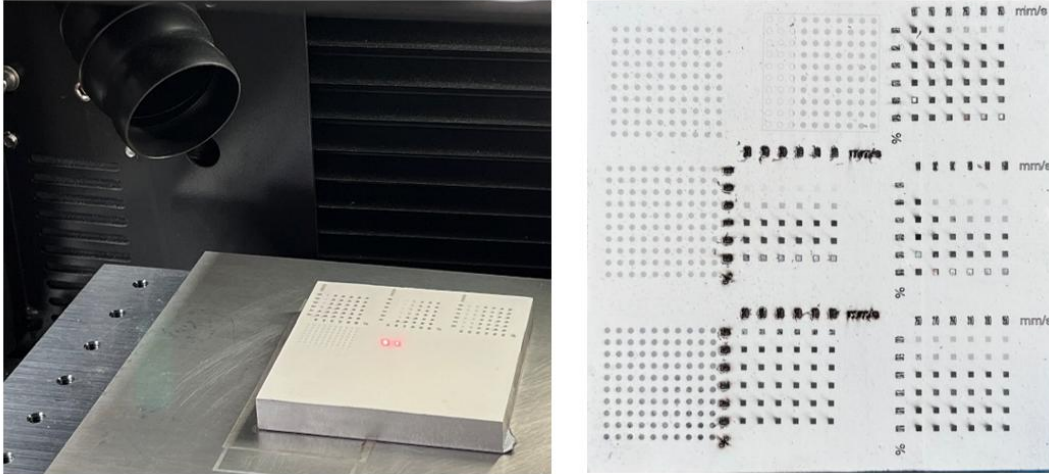


Figura 31: Calibración del patrón de grabado laser para el método experimental.

El proceso de calibración se llevó a cabo con los parámetros que muestra la Tabla 6:

Parámetro	Valor de la maquina LS-XT-S
Potencia efectiva	21 W (20 % de la potencia máxima de la máquina 105 W).
Velocidad de grabado	400 mm/s
Frecuencia	100 kHz
Ancho de pulso	200 ns
Número de pasadas	2 (loop count)
Potencia de salida (haz)	9 %

Tabla 5: parámetros de calibración para el método experimental cajón de trabajo XTL-FC50.

Gracias a esta configuración y calibración previa, se logró obtener un patrón de grabado claramente definido (fig. 32), sin comprometer la integridad mecánica ni térmica de la chapa, lo cual fue esencial para los análisis posteriores de deformación durante el conformado incremental.

Una vez verificada la exactitud del sistema, se inscribió un patrón de referencia mediante la máquina de grabado láser de fibra LS-XT-S. La fig. 33 muestra el patrón grabado, que consistió en una malla regular de círculos de 1 mm de diámetro con una separación entre

centros de 2 mm, dispuestos en una cuadrícula de  $100 \times 100$  elementos. Esta malla servirá para el posterior análisis de la evolución de la deformación durante el proceso, permitiendo la correlación entre los resultados experimentales y las simulaciones numéricas.

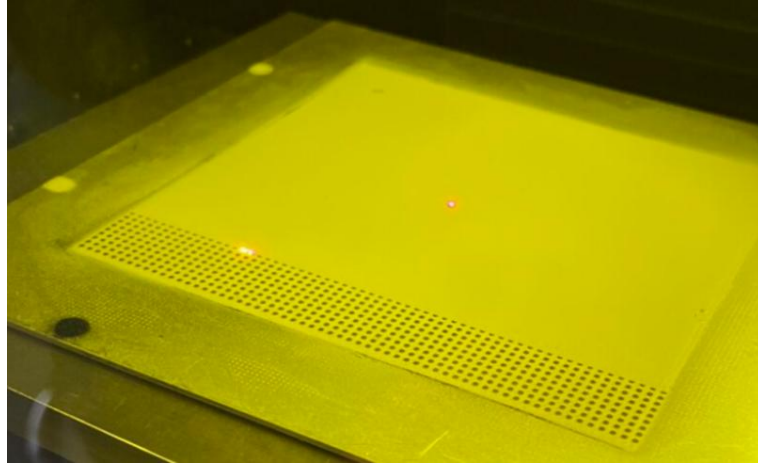


Figura 32: Grabado laser del patrón de lectura en la chapa AA2024-T3 en el Modelo 1.

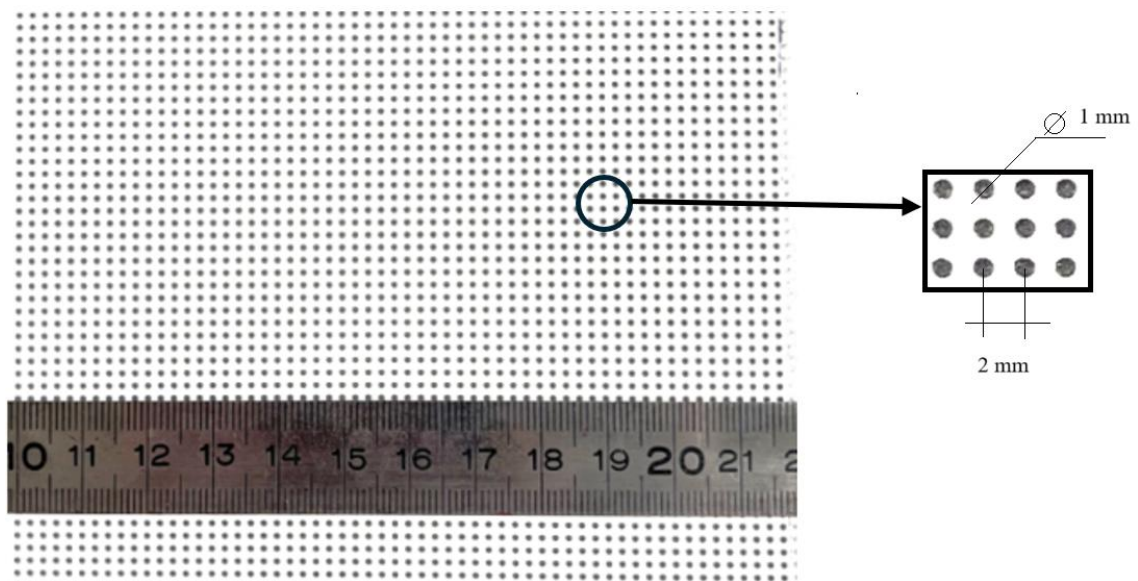


Figura 33: Vista completa y ampliada de la probeta de grabado laser en el método experimental.

### 3.3 Ensayos de SPIF

Para realizar el ensayo experimental mediante SPIF, se empleó el centro de mecanizado vertical Lagun L650 que se muestra en la fig. 34, ubicado en el taller de fabricación de la Universidad de Málaga. Esta máquina, equipada con control numérico y servomotores digitales, permite ejecutar trayectorias complejas con alta precisión.



Figura 34: Centro de mecanizado vertical Lagun L650 ubicado en el taller de fabricación de la UMA.

El Lagun L650 dispone de una superficie útil de trabajo de  $800 \times 460$  mm, recorridos de 650 mm en X, 510 mm en Y y 610 mm en Z, y un motor principal con potencia de 7,5/9 kW (S1/S6). El husillo opera a una velocidad de hasta 8.000 rpm, utilizando un cono portafresas MAS BT40. Además, cuenta con sistema de roscado rígido, almacenamiento automático de herramientas, guías lineales de alta precisión, y refrigeración interna, lo que garantiza estabilidad dimensional y repetibilidad durante los ensayos.

La chapa debe fijarse firmemente sobre un utillaje específico, que en este caso está formado por varios elementos: una matriz de sujeción inferior, sobre la que se apoya la chapa; una matriz de sujeción superior, que se atornilla para inmovilizarla; y una matriz mecanizada, ubicada por debajo, cuya cavidad limita parcialmente la deformación. Este conjunto permite mantener la estabilidad de la chapa durante todo el ensayo, garantizando la repetibilidad del proceso y el control sobre la geometría final obtenida (fig. 35).

Una vez grabado el patrón de referencia sobre la chapa, esta se colocó sobre la matriz asegurando su correcta alineación. Para garantizar que los extremos de la chapa permanecieran inmobilizados durante el ensayo, se optó por una fijación mecánica mediante tornillos distribuidos en los bordes exteriores. Esta fijación se realizó directamente sobre la matriz, asegurando un contacto firme y evitando desplazamientos no deseados que pudieran afectar la calidad del ensayo o introducir errores en el análisis de deformaciones. Esta estrategia de sujeción proporciona condiciones de contorno reproducibles, fundamentales para una correcta comparación con los resultados numéricos y para preservar la validez de los datos experimentales.

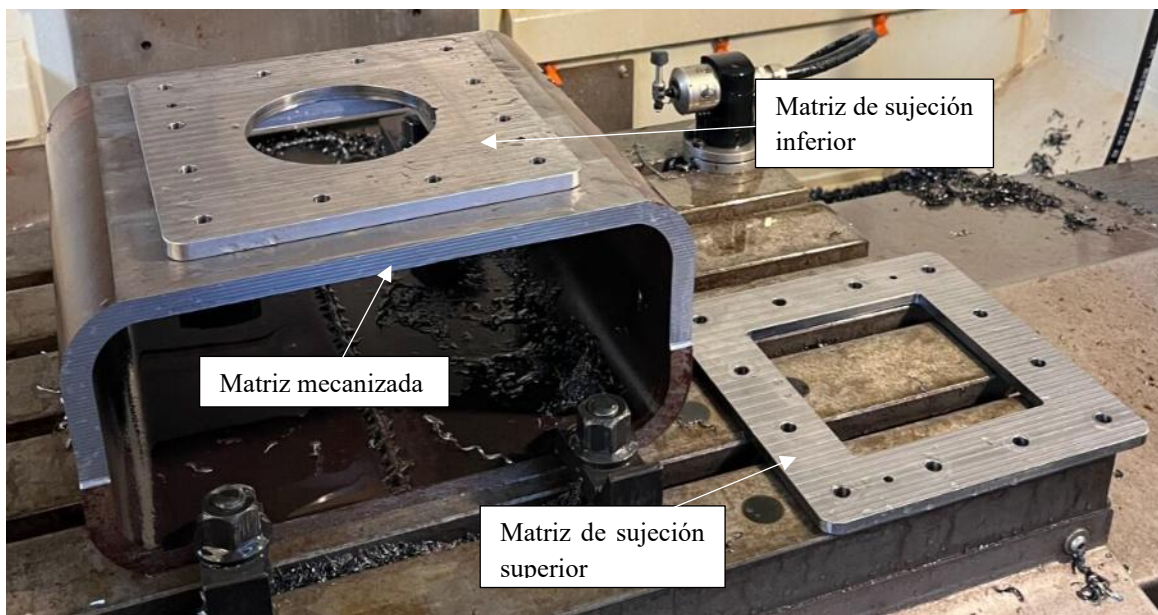


Figura 35: Matriz de sujeción para el método experimental.

Una vez fijada la chapa sobre la matriz, se procedió a la programación de las trayectorias correspondientes al modelo experimental definido. El origen se situó en el centro geométrico de la chapa (fig. 36) y justo sobre su superficie superior, lo cual permite asegurar la simetría del conformado y una referencia dimensional coherente con los modelos numéricos.

La definición del origen en la máquina CNC se llevó a cabo utilizando un palpador analógico (fig. 37), con el que se ajustaron las coordenadas de los ejes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  manualmente. Este procedimiento permitió alinear con precisión el sistema de coordenadas de la máquina con el del archivo G-Code, minimizando desviaciones geométricas no deseadas durante la ejecución del ensayo.

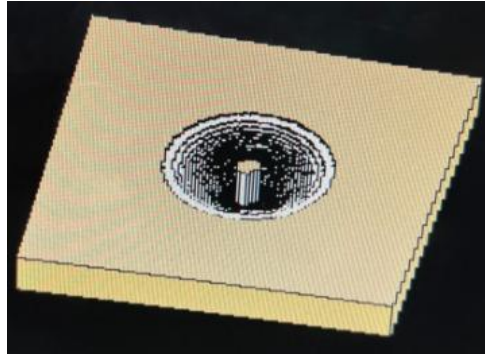


Figura 36: Vista previa de las trayectorias en SPIF.

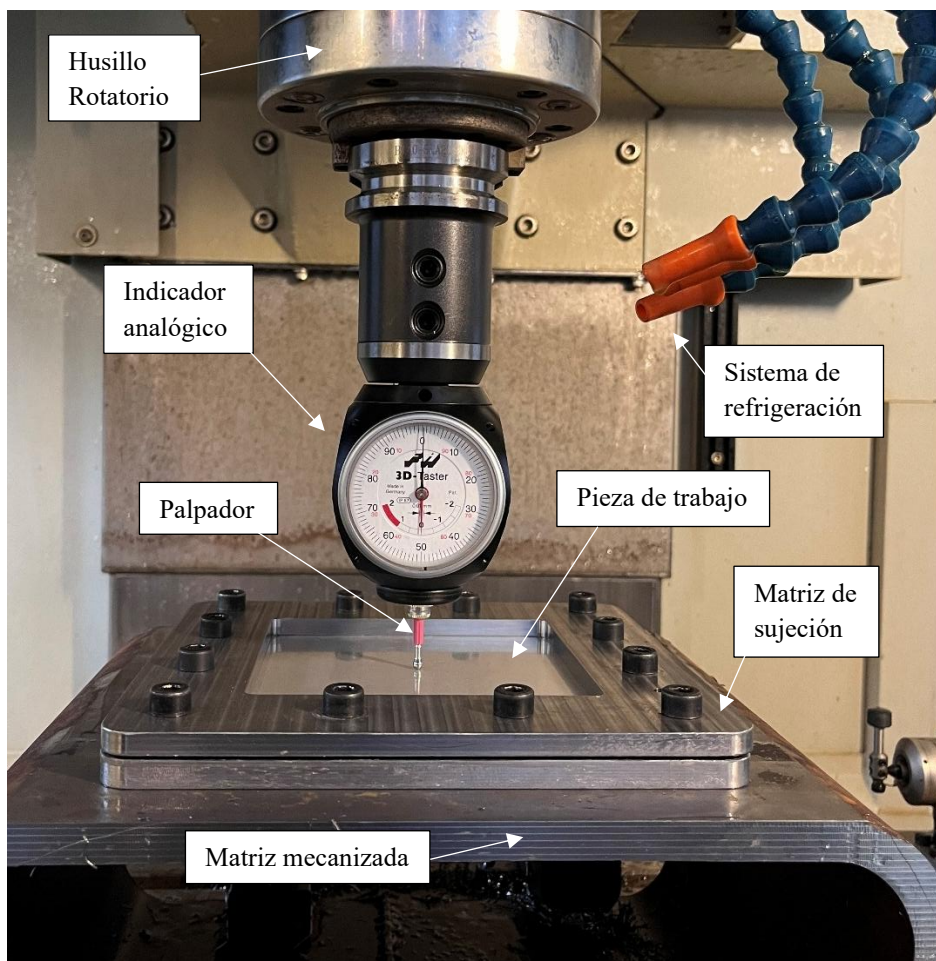


Figura 37: Preparación del montaje experimental. Calibración del eje Z sobre la superficie de la chapa utilizando un palpador 3D.

Previamente al inicio del proceso, como se observa en la fig. 38, se aplicó lubricación sobre la superficie de la chapa con el fin de reducir la fricción entre la herramienta y el material, minimizando el desgaste y evitando defectos superficiales durante el conformado.

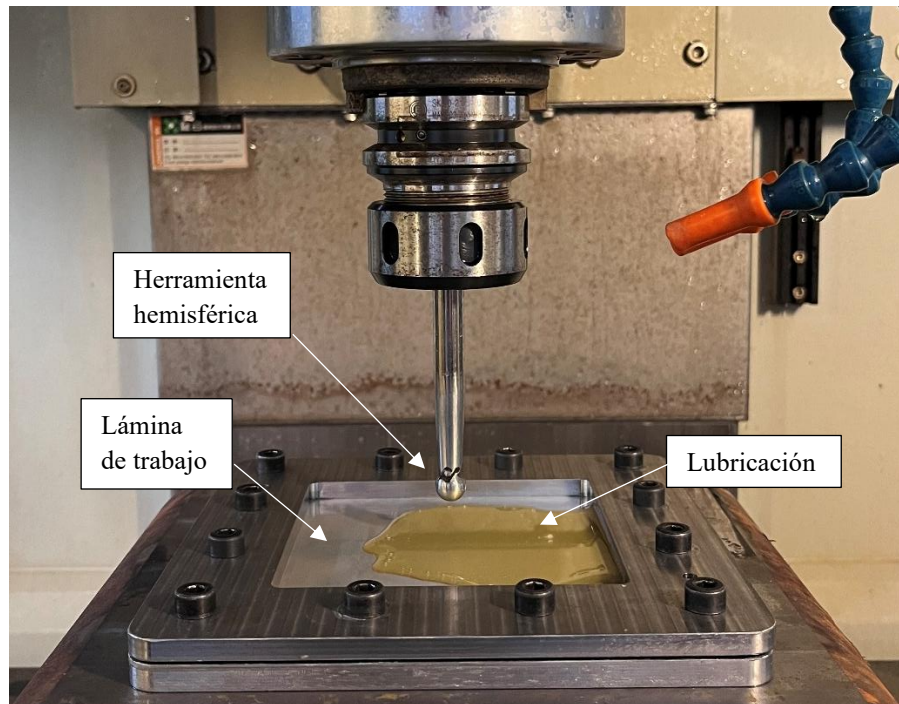


Figura 38: Preparación del montaje experimental. Palpación del origen-pieza en el eje Z sobre la superficie de la chapa utilizando un palpador 3D.

Una vez completadas todas las preparaciones, se inició el proceso de deformación incremental conforme a la trayectoria establecida como muestra la fig. 39.

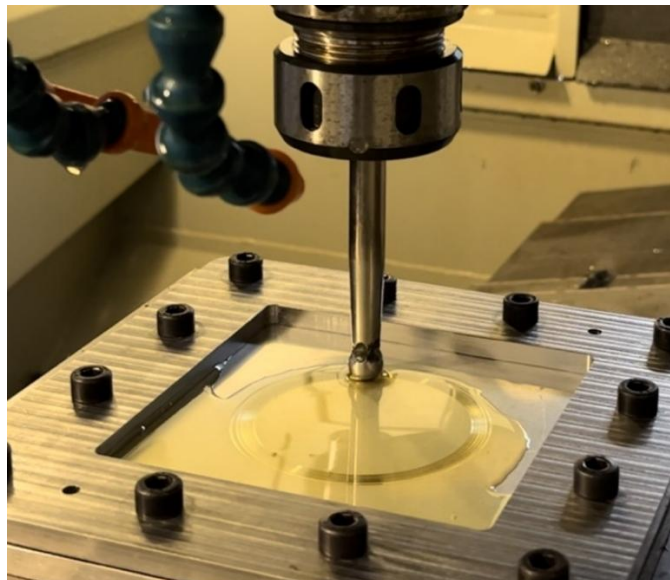


Figura 39: Fotografía del proceso de deformación incremental conforme a la trayectoria establecida.

En el ensayo realizado, se observó en la fig. 40 una fractura por tracción localizada en la zona más profunda de la pieza, próxima al vértice del cono. Esta región concentra las mayores deformaciones plásticas, lo que la convierte en el punto más crítico del proceso.

Como se ha comentado en el apartado 2.3.2 del estado del arte, la deformación en el cono aumenta conforme lo hace el ángulo del cono, produciéndose la fractura para un valor determinado de este ángulo. Una vez que se produce la fractura, el experimento se detiene y la probeta se extrae del set up. En el ensayo realizado, se observó una fractura en Modo I localizada en la zona más profunda de la pieza, tal y como muestra la fig. 41. Esta región concentra las mayores deformaciones plásticas, lo que la convierte en el punto más crítico del proceso. A simple vista, es posible ver la deformación que se produce en la chapa. Los círculos del patrón se han convertido en elipses.

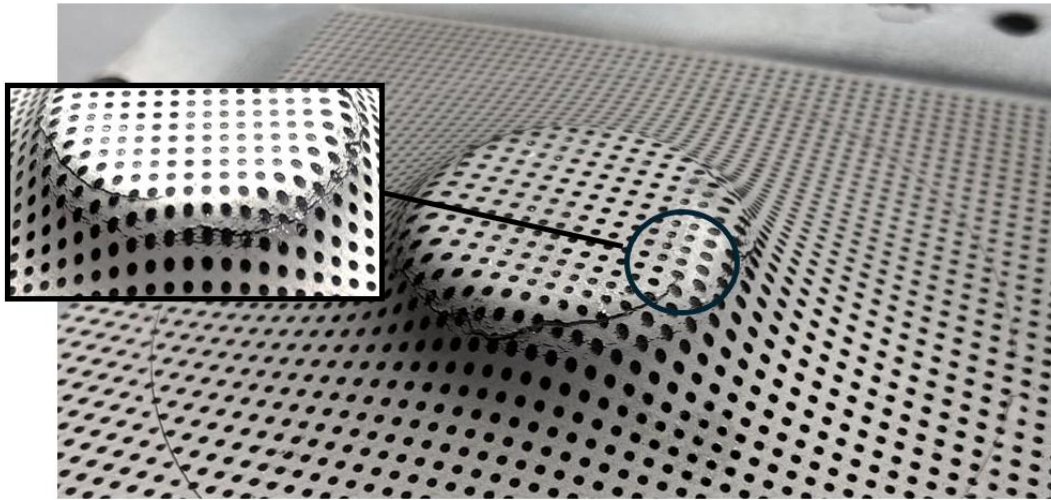


Figura 40: Fractura localizada en la zona de máxima deformación del cono conformado por SPIF. Ampliación del área dañada.

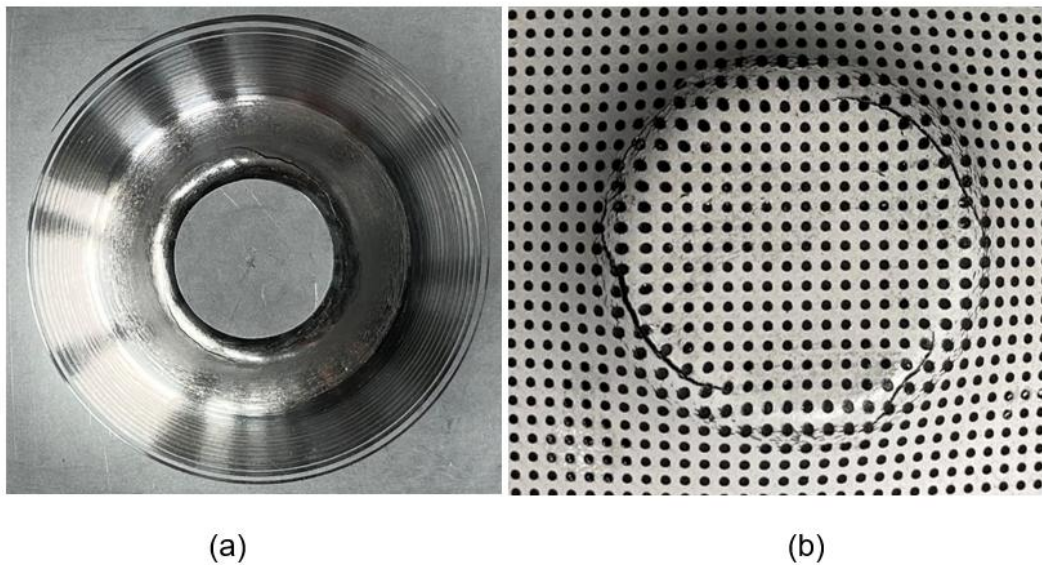


Figura 41: Fotografía del modelo experimental. (a) vista inferior y (b) planta.

Posteriormente, se realizó el ensayo experimental del Modelo 2 las dos chapas superpuestas. En este caso, las chapas se colocaron una sobre otra, sin aplicar lubricación entre ellas para evitar efectos sobre el grabado láser previamente realizado sobre las chapas. Así, se aseguró que el patrón permaneciese intacto y pudiera ser utilizado correctamente en el postprocesado.

La fijación del conjunto de chapas se realizó mediante el mismo sistema de matrices y sujeción mecánica utilizado en el ensayo de chapa del Modelo 1, garantizando la estabilidad y la correcta inmovilización durante el proceso. Las trayectorias de conformado aplicadas fueron idénticas a las utilizadas en los ensayos del Modelo 1, manteniendo así las condiciones de proceso y facilitando la comparación de resultados.

Tras la finalización del ensayo, el análisis se centró en la chapa superior, que es la que experimenta las mayores deformaciones y donde se esperaba la aparición de fracturas. Por su parte, la chapa inferior, debido a su mayor ductilidad, no presentó fractura ni daños significativos, actuando únicamente como una base de soporte que limita la deformación excesiva de la chapa superior.

## 4. Métodos numéricos

Este capítulo describe los modelos numéricos desarrollados para simular el proceso de SPIF convencional, así como el proceso haciendo uso de una chapa de respaldo. En primer lugar, la sección 4.1 detalla los parámetros del modelo computacional de elementos finitos implementado en ANSYS. En segundo lugar, la sección 4.2 explica la definición de la geometría utilizada tanto para la chapa como para la herramienta y el utillaje, y finalmente, en la sección 4.3 se detalla el mallado del conjunto junto con la aplicación de las condiciones de contorno que representan adecuadamente la interacción entre los componentes del sistema.

### 4.1 Parámetros del modelo

Para la simulación del proceso SPIF se ha desarrollado un modelo numérico utilizando el software Ansys LS-Dyna, implementado a través del entorno APDL. Se ha llevado a cabo un análisis dinámico explícito, adecuado para representar con precisión la no linealidad geométrica, el contacto con fricción y el comportamiento plástico anisótropo del material de la chapa.

El modelo emplea el elemento tipo SHELL163, basado en la formulación Belytschko-Tsay, apropiado para el análisis de láminas delgadas sometidas a grandes deformaciones. Este elemento posee 12 grados de libertad en cada uno de sus cuatro nodos (fig. 42), lo que permite representar cargas en el plano, normales y esfuerzos de flexión. Además, se emplearon cinco puntos de integración en el espesor para capturar con precisión los gradientes de tensión y deformación. De las diversas formulaciones disponibles en ANSYS®, la de Belytschko-Tsay proporcionó los mejores resultados; más información puede encontrarse en la sección *Element Reference* del manual de ANSYS® (Ansys User Guide, 2018).

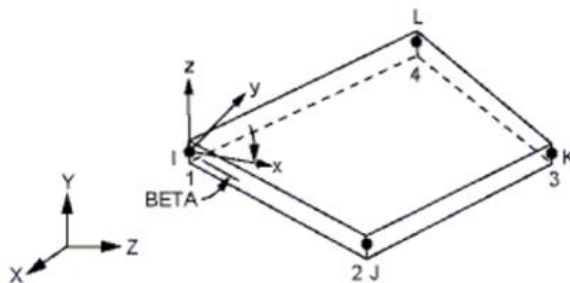


Figura 42: Geometría de tipo Shell163. Teniendo en cuenta que X e Y están en el plano del elemento. Ansys User Guide (2018).

El material considerado para la chapa es la aleación AA2024-T3, modelada como elastoplástico anisótropo mediante el criterio de fluencia Barlat (1989). La ley de

endurecimiento implementada sigue una relación de tipo "power law", siendo los parámetros empleados: un módulo elástico de 69,4 GPa, un coeficiente de Poisson de 0,33, una densidad de 2780 kg/m<sup>3</sup>, un coeficiente de resistencia  $k = 710 \text{ MPa}$ , un exponente de endurecimiento  $n = 0,17$ , y un exponente del criterio de Barlat  $m = 8$ . Los coeficientes de anisotropía empleados fueron  $R_0 = 0,82$  y  $R_{90} = 0,56$ . El eje de la dirección de laminación se ha alineado con el eje Y global mediante la definición de un sistema de referencia local ( $CID = 600$ ), necesario para activar el comportamiento ortótropo en el modelo de material.

La herramienta y la matriz se han considerado como cuerpos rígidos. A ambos se les ha asignado una densidad de 7900 kg/m<sup>3</sup>, un módulo de Young de 210 GPa y un coeficiente de Poisson de 0,3. La herramienta se ha definido como un sólido rígido móvil, mientras que la matriz permanece fija durante toda la simulación.

El contacto entre los cuerpos se ha definido mediante la formulación *automatic\_surface\_to\_surface*, que permite una simulación robusta del contacto con fricción. Se ha especificado un coeficiente de fricción de 0,001 entre la herramienta y la chapa, simulando condiciones de lubricación, y un coeficiente de fricción de 0,05 entre la matriz y la chapa, de acuerdo con los parámetros usados por José Andrés López Fernández (2021).

Con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo y garantizar la estabilidad numérica del análisis explícito, se ha aplicado un factor de escalado de masa igual a 5. Asimismo, se ha introducido un factor de escalado temporal con valor 5000, que permite ajustar la duración efectiva del proceso. Para evitar la aparición de modos espurios en los elementos de tipo shell, se ha introducido un control de hourglass con un valor de penalización  $HGCONTROL = 0,005$ .

Otros dos factores considerados en el diseño de los modelos de elementos finitos fueron el *time scaling* y el *mass scaling*. En el método explícito, la robustez de la simulación depende, entre otros factores, de la discretización temporal en pasos menores que un valor umbral  $\Delta t$ . Este valor viene dado por la ecuación expuesta a continuación, donde  $L_s$  es la longitud característica del elemento shell y  $c$  la velocidad del sonido en el material, definida como:

$$\Delta t_{max} < \frac{L_s}{c},$$

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

Un valor más pequeño de  $\Delta t$  incrementa el número de pasos de integración necesarios, aumentando así el tiempo de simulación. Sin embargo, dado un  $\Delta t_{max}$  admisible, es posible reducir el número total de pasos mediante *time scaling*, que consiste en aumentar artificialmente la velocidad del proceso físico y, por tanto, comprimir la escala temporal de la simulación.

Con el objetivo de reproducir de forma representativa el entorno experimental del proceso SPIF, se aplicaron condiciones de contorno fijas en la periferia de la chapa activa (material 1, AA2024-T3), impidiendo los desplazamientos en las tres direcciones espaciales ( $UX = UY = UZ = 0$ ) para todos los nodos periféricos. La fig. 43 muestra la representación de los materiales empleados en modelo numérico.

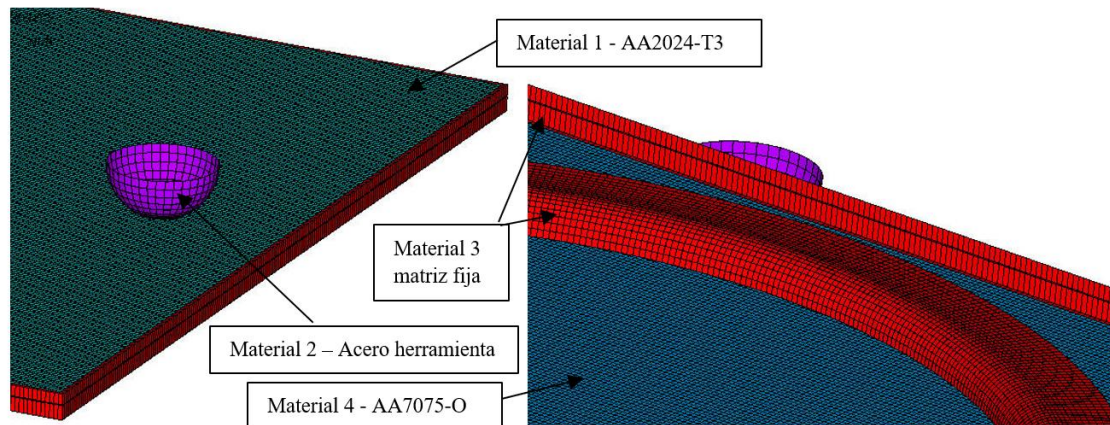


Figura 43: Representación del mallado del modelo numérico empleado en el análisis mediante EF. Se muestran los distintos materiales utilizados: la chapa conformada de aleación AA2024-T3 (Material 1), la herramienta de acero modelada como cuerpo rígido (Material 2), la matriz fija también rígida (Material 3) y la chapa de respaldo de aleación AA7075-O (Material 4).

## 4.2 Geometría

Se desarrollaron dos modelos de elementos finitos: el Modelo 1 correspondiente al conformado mediante SPIF con una chapa y el Modelo 2 correspondiente al conformado usando 2 chapas, una arriba y otra de respaldo. Ambos modelos se muestran en la fig. 44.

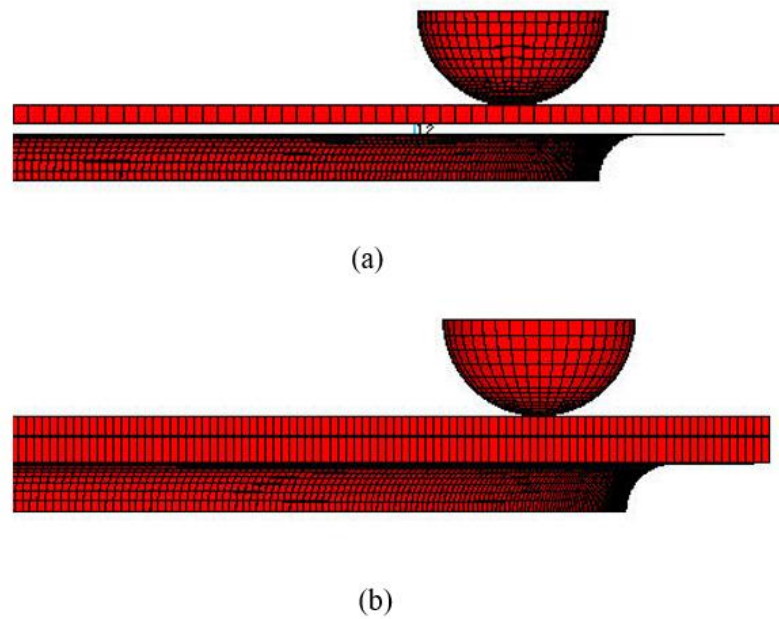


Figura 44: Vista de perfil de los modelos de EF (a) Modelo 1 correspondiente al conformado mediante SPIF con una chapa y (b) Modelo 2 correspondiente al conformado usando 2 chapas, una arriba y otra de respaldo.

Como muestra la fig. 45, cada modelo de elementos finitos incluye tres partes: la matriz de conformado, la herramienta de conformado y la chapa metálica. La matriz, y la herramienta se definieron como cuerpos rígidos con distintas restricciones de desplazamiento donde la matriz resulta fija en el espacio tridimensional y la herramienta controlada mediante vectores de posicionamiento. Por otro lado, la chapa se modeló como cuerpo deformable. Para esta última se empleó el criterio de fluencia anisótropa de Barlat-Lian (1989) junto con la ley de potencia de Swift y las propiedades del AA2024-T3 descritas en el apartado 3.1.

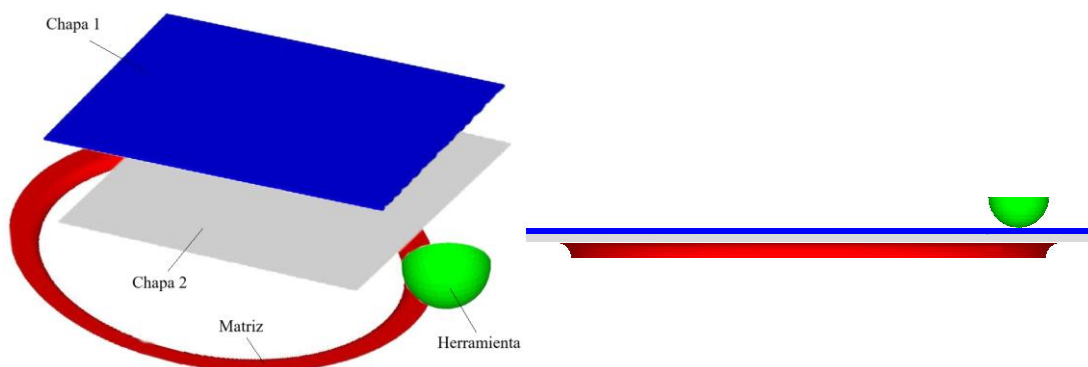


Figura 45: Modelo de Elementos Finitos en SPIF (a) Vista isométrica y (b) vista lateral del ensamblaje propuesto.

La chapa se ha representado como una lámina cuadrada de  $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ , con un espesor nominal de  $1,2 \text{ mm}$ , coincidente con las dimensiones de las probetas empleadas en los ensayos experimentales. Para su definición, se han generado vértices (keypoints) en los límites de un cuadrado centrado en el origen, formando un área bidimensional a partir de la conexión de líneas rectas. Esta área representa la extensión inicial de la chapa, la cual se encuentra sujeta perimetralmente durante el proceso.

La herramienta se ha modelado como una semiesfera rígida, cuyo diámetro nominal es  $12 \text{ mm}$ . Se ha ubicado mediante un sistema de coordenadas local definido en el punto inicial de la trayectoria de la herramienta. La superficie esférica se ha generado a partir de un conjunto de arcos de círculo que definen el perfil hemisférico, el cual es posteriormente rotado para generar la geometría superficial. Para simplificar el modelo y reducir el coste computacional, se ha eliminado la corona superior de la esfera y se ha conservado únicamente la mitad inferior, que es la zona de contacto funcional durante el proceso de conformado incremental.

En cuanto a la matriz, esta ha sido representada como un soporte rígido con una curvatura definida por un radio nominal  $R_{matriz} = 50 \text{ mm}$ . Está situada por debajo del plano inicial de la chapa y se ha definido mediante una combinación de arcos y líneas que describen su perímetro y su zona central de contacto. Esta región incluye tanto un círculo interior, que representa el área de soporte, como líneas de transición con curvatura, destinadas a simular la deformación que sufre la chapa al adaptarse al contorno inferior.

### 4.3 Mallado y condiciones de contorno

El mallado del modelo se realiza mediante la programación detallada en ANSYS, estableciendo diferentes zonas de mallado con características específicas para cada área. Se define inicialmente una malla con 35.500 elementos, utilizando la instrucción NUMSTR para controlar la asignación de elementos y nodos. Se aplica un refinamiento de la malla en la zona intermedia del modelo, correspondiente al área de contacto entre la chapa y la herramienta, donde se genera la mayor deformación. Este refinamiento se realiza ajustando el tamaño de los elementos en las zonas de mayor deformación utilizando el comando LESIZE y el remallado automático con AMESH. En áreas como la herramienta y la matriz inferior, se utilizan configuraciones específicas de mallado para asegurar una adecuada resolución en estos componentes.

La malla de los distintos componentes está formada por elementos con forma de cuadrilátero regular de  $0,5 \text{ mm}$  de lado para la chapa, ajustándose el tamaño de los elementos por debajo de  $0,5 \text{ mm}$  para evitar inestabilidades derivadas de factores como el escalado de masa, el control de hourglassing o el escalado temporal.

Para la simulación del proceso, se han empleado dos estrategias de mallado con el software ANSYS, con el objetivo de analizar su impacto en la precisión de los resultados y en la eficiencia computacional.

El primer mallado se diseñó con una distribución en sectores, implementando un refinamiento progresivo hacia el centro de la chapa (radio  $r$  cercanos a 0), donde se espera una mayor concentración de esfuerzos y deformaciones. Para lograr esta configuración, se utilizó el siguiente procedimiento:

Se definió el sistema de coordenadas global  $CSYS,0$ . Se establecieron los parámetros de numeración de elementos y nodos mediante `NUMSTR,ELEM,1E6` y `NUMSTR,NODE,1E6`. Se seleccionaron las áreas de interés con `ASEL,S,AREA,,100,199`, asignando atributos de material y elementos a cada sector con `AATT,1,1,1` (fig. 46). Se activó la estrategia de mallado estructurado `MSHKEY,1` y la opción de mallado `MOPT,QMESH,DEFAULT`. Se establecieron tamaños de elemento diferenciales con el comando `LESIZE`, asignando mayor densidad de nodos en regiones críticas y menor densidad en zonas periféricas para optimizar el costo computacional. Finalmente, como muestra la fig. 47, se generó la malla en cada sector con `AMESH`.

Esta configuración permitió un mallado más detallado en la zona central, lo que teóricamente contribuiría a una mayor precisión en el análisis de esfuerzos y deformaciones en el proceso ISF.

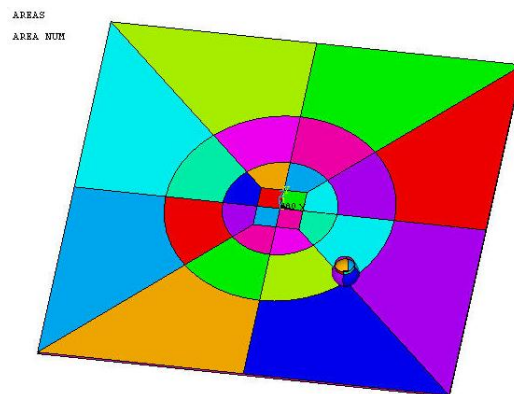


Figura 46: División por áreas para el mallado por secciones.

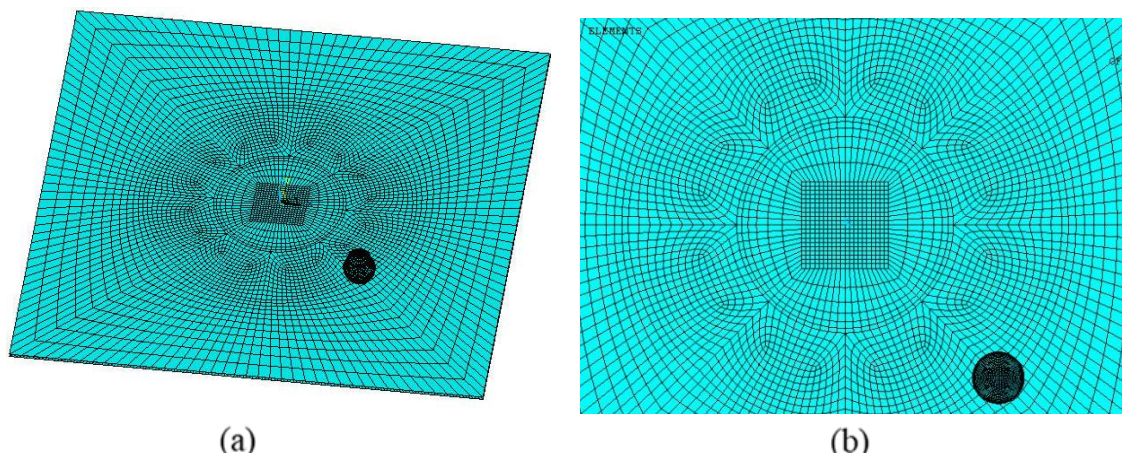


Figura 47: Mallado por secciones con alta precisión. (a) vista completa de la chapa y (b) vista ampliada del mallado.

El segundo mallado se definió con una distribución homogénea de elementos en toda la superficie de la chapa (fig. 48), con el objetivo de evaluar su rendimiento en términos de precisión y tiempo de cómputo. Una vez establecidas las áreas, se procedió a la generación del mallado como se aprecia en la fig. 49.



Figura 48: Distribución homogénea de las áreas.

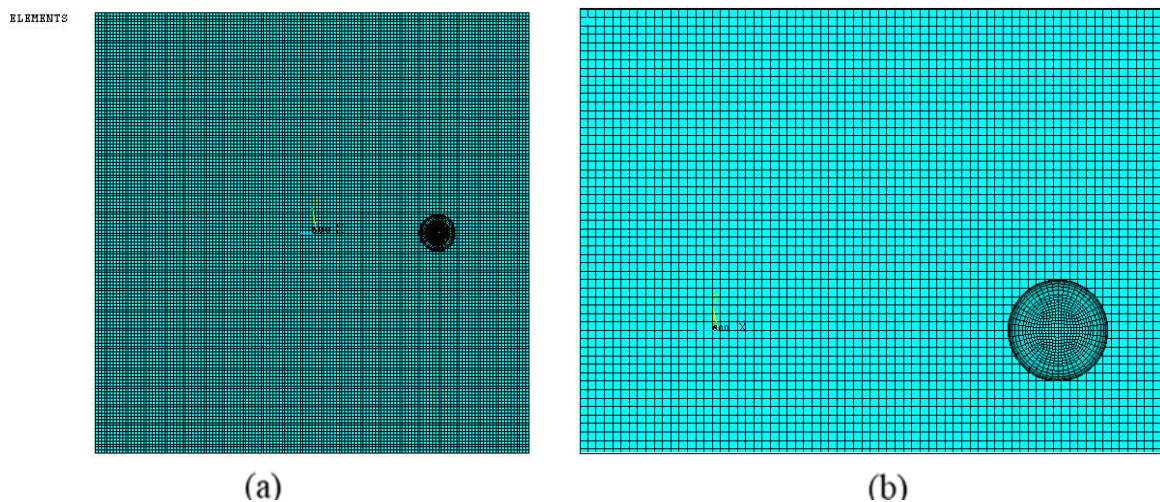


Figura 49: Mallado uniforme de la chapa metálica. (a) vista completa de la chapa y (b) vista ampliada del mallado.

Tras realizar las simulaciones en ANSYS con ambas configuraciones de mallado, se observó que el mallado uniforme no incrementaba significativamente los tiempos de cálculo, aunque facilitaba considerablemente el análisis de los resultados obtenidos.

Aunque el mallado por sectores proporcionaba una mayor densidad de elementos en la zona central, la diferencia en los valores de esfuerzos y deformaciones con respecto al mallado uniforme era mínima. Dado que el objetivo del estudio es analizar el

comportamiento general del conformado incremental de chapa sin incurrir en un alto costo computacional, se optó por utilizar el mallado uniforme en la simulación final.

Los contactos entre cuerpos se modelaron mediante elementos de contacto tipo *Forming Surface To Surface (FSTS)*, configurados con un coeficiente de fricción estática y dinámica variable según la interfaz. En ambos modelos, la chapa actuó como superficie de contacto y la matriz y la herramienta como superficies objetivo. Se asumió un modelo de fricción de Coulomb, fijando el coeficiente dinámico a 0,01 en la interfaz herramienta-chapa, valor calibrado mediante comparación de resultados numéricos y experimentales de evoluciones de deformación y fuerza.

La interacción entre el punzón y la chapa activa se define mediante EDCGEN con fricción de tipo  $\mu_1$ , y la interacción entre la chapa y la chapa de respaldo o la matriz se define con un segundo coeficiente  $\mu_2$ , permitiendo estudiar el comportamiento del sistema con distintas condiciones tribológicas. Se aplicó un factor de penalización ( $PENO = 4$ ) y un coeficiente de amortiguamiento viscoso ( $VDC = 20\%$ ) para estabilizar el contacto durante cargas dinámicas, siguiendo las recomendaciones habituales en simulaciones de *metal forming* con elementos SHELL163.

Estas condiciones, en conjunto, permiten reproducir con fidelidad el comportamiento mecánico del proceso SPIF bajo el enfoque híbrido propuesto, facilitando el análisis de la influencia de la chapa de respaldo frente a la configuración con matriz tradicional.

Mediante la aplicación conjunta de escalado temporal y escalado de masa, el tiempo de simulación se redujo en un orden de magnitud. Por ejemplo, el análisis del modelo, que contaba con aproximadamente 8.000 elementos en la lámina, vio su duración pasar de 3 días a menos de 6 horas.

## 5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la simulación numérica y los ensayos experimentales realizados en este trabajo. Se analizan los datos obtenidos en términos de distribución de deformaciones, evolución de la geometría y comparación con los límites de conformabilidad ya conocidos del material.

En primer lugar, se describe el comportamiento de la chapa en el conformado de un cono de ángulo variable, evaluando su respuesta en el espacio de las deformaciones principales mediante un Diagrama de Límite de Conformado (FLD). A partir de los resultados de simulación en ANSYS, se identifican las zonas críticas donde la deformación alcanza los límites de fractura establecidos en los ensayos Nakazima.

En segundo lugar, se realiza el mismo estudio con dos chapas juntas (una principal y otra de respaldo), con el objetivo de analizar el efecto de esta configuración en la mejora de la conformabilidad del material. Se comparan ambos casos, evaluando cómo la presencia de la contrachapa influye en la distribución de tensiones y en la capacidad del material para alcanzar mayores niveles de deformación antes de la fractura.

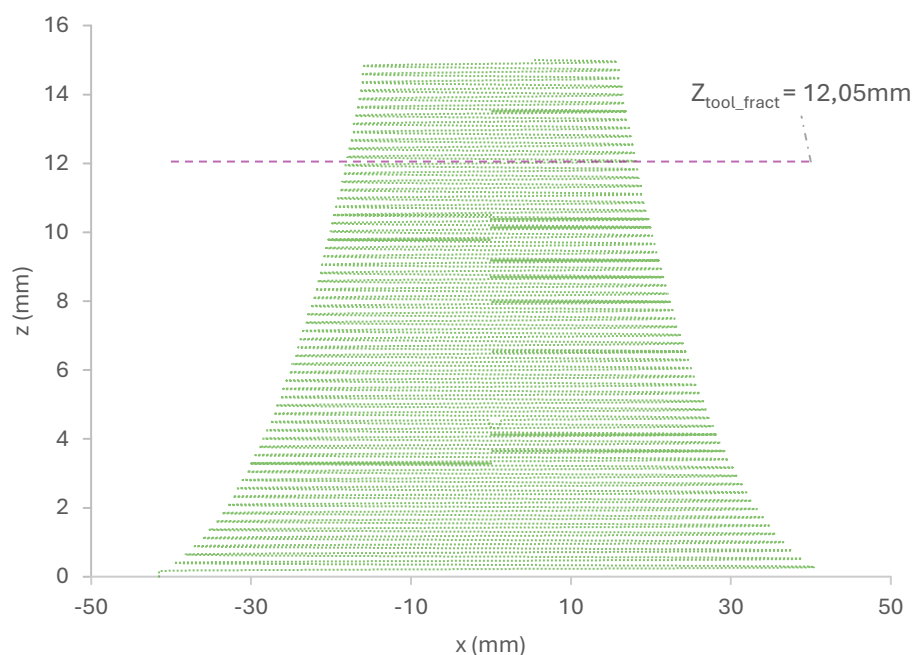
Finalmente, se contrastan los resultados numéricos con los ensayos experimentales, validando la precisión del modelo y estableciendo una correlación entre la predicción de fractura y la rotura observada en las muestras reales.

En el método experimental se aprecia como la grieta no se inició exactamente en el vértice, sino ligeramente desplazada hacia el interior de la pared cónica, lo que sugiere que la trayectoria de la herramienta y la geometría del perfil influyen en la localización del fallo. Este tipo de comportamiento coincide con lo descrito en la literatura especializada en SPIF, donde se ha documentado que la distribución no uniforme de tensiones puede anticipar la fractura en zonas cercanas, pero no coincidentes con el punto de máxima profundidad. Estos hallazgos son coherentes con estudios previos que han identificado diversos modos de fallo en el proceso SPIF. Por ejemplo, Martins et al. (2019) clasificaron los modos de fractura en geometrías cónicas en tres categorías principales: (i) fractura circunferencial, (ii) fractura oblicua y (iii) aparición de arrugas o torsión en la pared de la pieza. Estas fallas están asociadas a la acumulación de deformación plástica y a la interacción compleja de esfuerzos de tracción, flexión y cizalladura durante el proceso de conformado incremental.

Además, investigaciones recientes han destacado que, en el SPIF, la fractura puede ocurrir sin una etapa previa de estricción o "necking", a diferencia de los procesos de conformado convencionales. Silva et al. (2011) observaron que la fractura en SPIF puede desarrollarse directamente debido a la acumulación localizada de daño, influenciada por factores como el radio de la herramienta, la trayectoria de conformado y las propiedades del material.

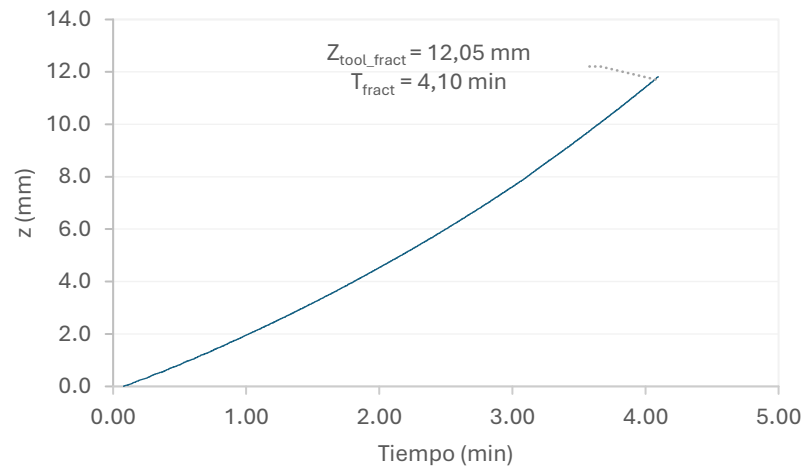
La gráfica 4 muestra la evolución de la trayectoria  $x$  de desplazamiento de la herramienta en función de  $z$ . Se observa que la herramienta sigue un movimiento en espiral, característico del conformado incremental, donde el desplazamiento en los ejes  $X$  e  $Y$  se desarrolla en capas progresivas mientras que el eje  $Z$  controla la profundidad de conformado.

Desde el punto de vista de la simulación numérica, la evolución progresiva de las trayectorias sugiere una distribución homogénea de la deformación, lo que permite predecir con precisión la respuesta del material. La estabilidad del desplazamiento en el tiempo es un indicador clave para evaluar la calidad del conformado y su posible correlación con la localización de zonas críticas de deformación.



Gráfica 4: Trayectoria de la coordenada  $x$  de la herramienta de conformado para el modelo numérico.

El desplazamiento en el eje  $Z$  (gráfica 5) refleja una evolución continua, alcanzando un valor máximo cercano a 12,05 mm, lo que indica la profundidad final de la chapa conformada.



Gráfica 5: Evolución temporal de la coordenada  $z$  de la herramienta de conformado para el modelo numérico hasta la fractura de la probeta.

## 5.1 Cono de ángulo variable con chapa simple (Modelo 1)

El estudio del cono de ángulo variable permite analizar la respuesta del material en un proceso de conformado incremental con una geometría que presenta variaciones en el ángulo de pared. Esta configuración genera zonas con diferentes estados de deformación, lo que proporciona información detallada sobre los límites de conformabilidad del material y su evolución a lo largo del proceso.

Como referencia, se emplea la curva de límite de conformado (FLD) del aluminio AA2024-T3 obtenida experimentalmente por Lopez-Férrandez et al. (2023).

El modelo utilizado está compuesto por tres partes fundamentales: la chapa deformable, el punzón rígido y una herramienta de soporte inferior. En esta primera configuración (Modelo 1), se emplea una chapa simple sin soporte inferior. La geometría corresponde a un cono de ángulo variable, el cual se ha definido mediante coordenadas clave que delimitan la región activa del conformado.

### 5.1.1 Análisis en el espacio de las deformaciones principales.

Para estudiar las deformaciones que se dan durante el proceso de ISF, se han realizado diferentes enfoques. Por un lado, se han seleccionado diferentes secciones características en el cono obtenido. Estas secciones dan información sobre la deformación que se produce en la chapa y permiten comparar el modelo numérico con el test experimental, sirviendo también de validación del modelo. Por otro lado, se ha analizado la evolución temporal de diferentes puntos en el FLD. Esto permite observar el historial de deformación experimentado por un punto del cono y visualizar su comportamiento con respecto a la curva límite experimental FFL.

Para la validación del modelo numérico se han comparado las deformaciones de una sección obtenida del ensayo experimental con las correspondientes deformaciones del modelo numérico (fig. 50a). En el caso experimental, la sección analizada corresponde al momento en el que se produce la fractura y la probeta fue retirada del setup (fig. 50b). Este instante se caracteriza por la profundidad alcanzada por la herramienta al terminar el ensayo  $Z_{tool-fract}$ . Sin embargo, en el modelo numérico es posible obtener las deformaciones en cualquier instante de tiempo durante la simulación, es decir, para cualquier profundidad de herramienta  $Z_{tool}$ . Es crucial extraer las deformaciones del modelo para la misma profundidad de herramienta en que se produce la fractura en el caso experimental, ya que el modelo no predice la fractura.

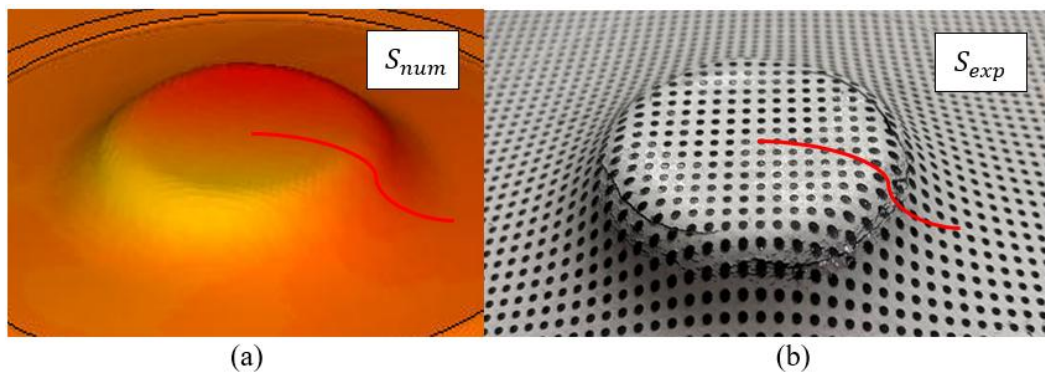


Figura 50: Representación visual de la sección de análisis en (a) la probeta numérica del modelo y (b) la probeta experimental en la chapa AA2024-T3.

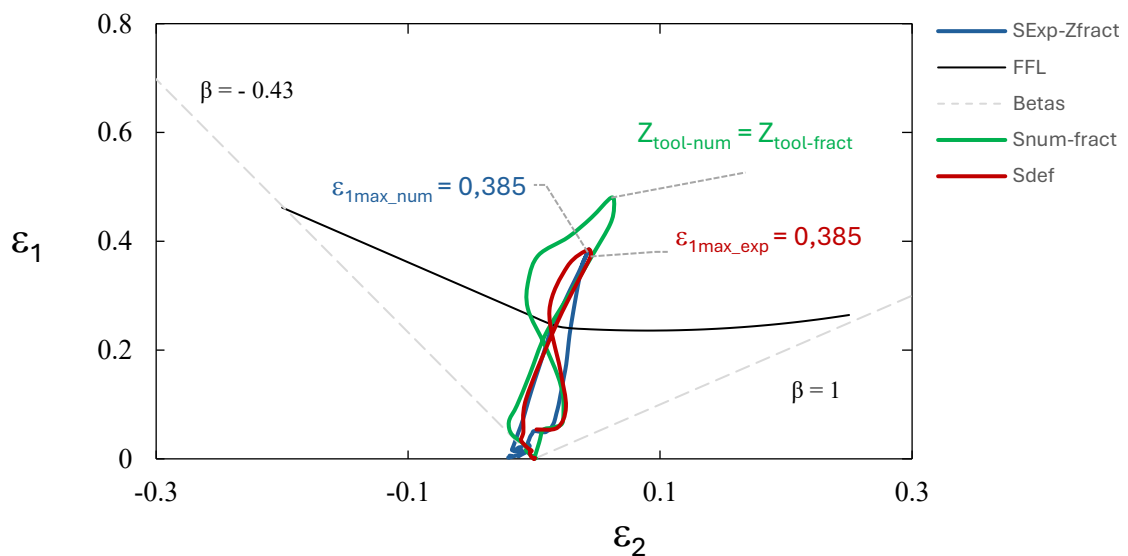
La gráfica 6 muestra las deformaciones obtenidas en una sección característica representadas en el Diagrama de Límites de Conformado (FLD). En este gráfico, la curva negra representa el límite de fractura basado en López-Fernández et al. 2021, mientras que las deformaciones de las secciones numéricas y experimental se representan con diferentes colores.

En primer lugar, la curva azul corresponde a la sección obtenida de la probeta experimental, y se representa como  $S_{Exp-Zfract}$ . La profundidad de herramienta en  $Z$  se ha denominado  $Z_{tool-fract}$ , ya que la probeta se ha retirado del test en el instante de la fractura. Se observa como la curva sobrepasa los límites FFL convencionales por encima de la línea de fractura. Este comportamiento, que indica incremento de conformabilidad con respecto al conformado convencional (curva FFL), es habitual en SPIF.

En segundo lugar, la curva verde corresponde a la sección numérica obtenida para la profundidad de herramienta  $Z_{tool-num} = Z_{tool-fract}$ . Es decir, se ha extraído la curva numérica para una profundidad  $Z$  que coincide con la profundidad del ensayo en el momento de la fractura. Esto proporciona una referencia clave para validar la predicción del modelo numérico. Esta curva se ha representado como  $S_{num-fract}$ , es decir, sección numérica en el momento de la fractura.

Se observa una buena concordancia general en la forma de ambas curvas, especialmente en la tendencia de los estados de deformación. No obstante, la deformación máxima predicha numéricamente resulta algo mayor que la experimental, sobrepasando los límites FFL en conformado convencional hasta alcanzar dicha fractura. Esta diferencia puede considerarse aceptable, teniendo en cuenta que se trata de un análisis explícito con deformaciones incrementales, donde la localización exacta del instante de fractura resulta difícil de determinar (Ambrogio et al., 2013).

Además, es importante señalar que la elección del instante  $Z_{tool-num}$  en el que se extraen las deformaciones numéricas puede influir en esta discrepancia. En la práctica, es complejo identificar con precisión el momento exacto en que se produce la fractura durante el proceso simulado, ya que intervienen fenómenos como la recuperación elástica tras la localización de la deformación o pequeñas diferencias en el criterio de parada entre experimento y simulación. Por esta razón, se ha añadido una curva adicional en color rojo ( $S_{def}$ ) que representa el estado de deformación numérica en el instante en el que la deformación máxima coincide con la medida experimental ( $\epsilon_{1max} = 0,385$ ). Esta representación permite realizar comparaciones más homogéneas entre las variables extraídas, especialmente permite realizar el análisis del estado de triaxialidad en condiciones similares de deformación.



Gráfica 6: Validación del modelo de EF en el espacio de las deformaciones principales: Comparación numérico-experimental de una sección en el momento de la fractura.

En general, la gráfica 6 muestra una buena concordancia entre la trayectoria de deformaciones principales obtenida experimentalmente y la estimada mediante simulación numérica en el instante de fractura ( $S_{num-fract}$ ). Ambas curvas presentan una evolución similar en el espacio de deformaciones principales ( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ), lo que indica que

el modelo es capaz de reproducir adecuadamente la tendencia general del proceso de conformado.

Dado que se trata de un modelo explícito y que contempla contactos y en el que las deformaciones se acumulan de forma incremental, es habitual que se presenten pequeñas desviaciones en los valores de deformación. Sin embargo, el error apreciado es del orden del que se observa en la literatura especializada, donde la evaluación de las trayectorias y el comportamiento general del material tienen mayor relevancia que la coincidencia exacta de los valores máximos de deformación. En este sentido, el objetivo principal del modelo no es predecir con exactitud la deformación en el punto de fractura, sino capturar la tendencia y la evolución del estado tensional y las deformaciones del material a lo largo del proceso.

Las diferencias observadas pueden justificarse por diversos factores. Por un lado, los errores experimentales y de medición son inherentes a las técnicas utilizadas, como la correlación digital de imágenes, lo que introduce cierto margen de incertidumbre. Por otro lado, la anisotropía del material AA2024-T3 puede afectar significativamente la trayectoria de deformación, especialmente en zonas donde el estado tensional cambia rápidamente. Además, las variaciones geométricas locales, como el espesor de la chapa o los radios de curvatura durante el proceso, también influyen en la localización y forma de la fractura.

Para evaluar la evolución de las deformaciones principales en la chapa AA2024-T3 sometida al proceso de conformado incremental, se han seleccionado cuatro puntos clave en el tiempo de ruptura (fig. 51). En cada punto, se graficaron las deformaciones principales y, se han comparado con el FFL para determinar la proximidad al fallo.

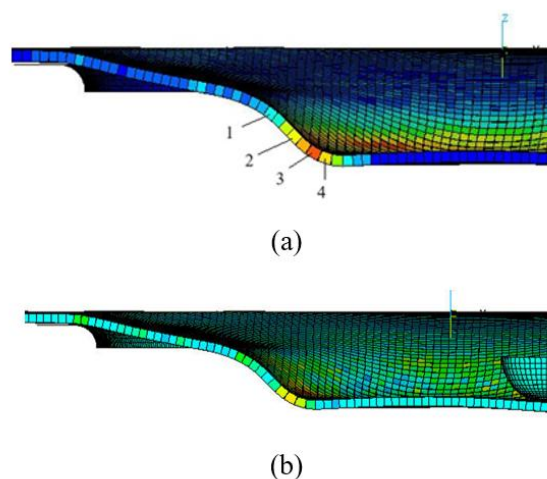
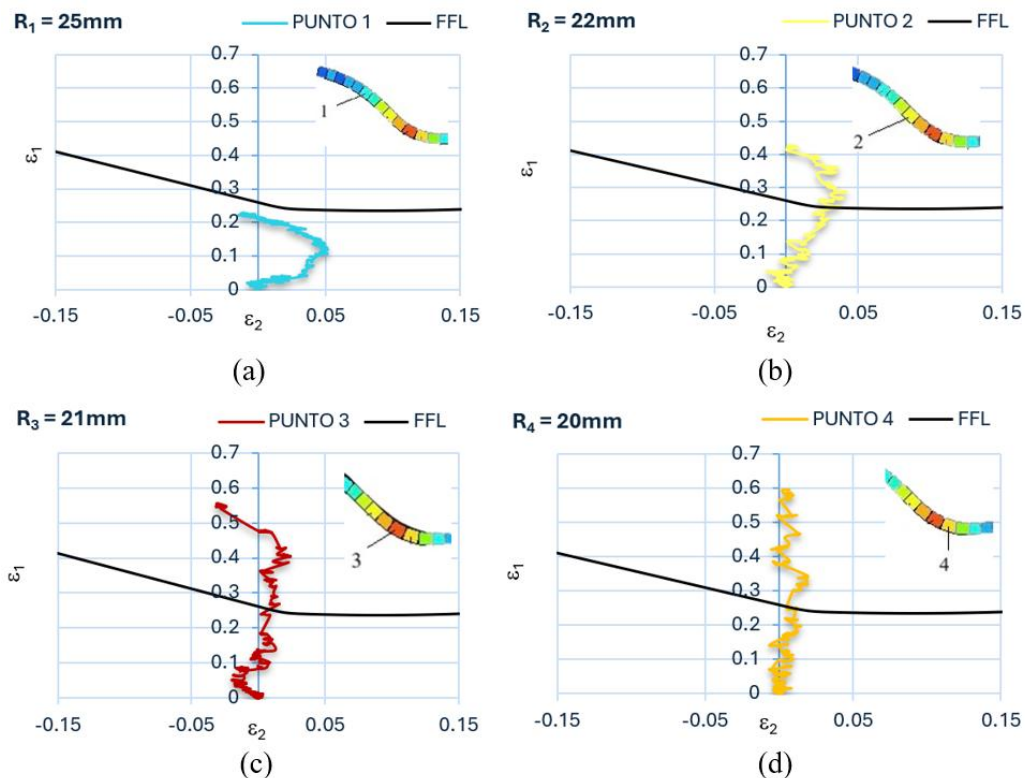


Figura 51: Distribución de las deformaciones principales en el instante de rotura para el Modelo 1. (a) deformación principal máxima  $\epsilon_1$  y (b) deformación principal mínima  $\epsilon_2$ .

Además de usar diferentes secciones para validar el modelo, se ha analizado la evolución de deformación de varios puntos clave de la chapa. Estos puntos se han seleccionado coincidiendo con el punto de mayor deformación de la chapa y puntos contiguos. La gráfica 7 muestra la distribución de la deformación principal total mecánica  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$  obtenida mediante un análisis de elementos finitos en LS-DYNA para una lámina metálica sometida a un proceso de conformado incremental. La escala de colores en ambas imágenes indica la magnitud de la deformación, donde los valores bajos aparecen en tonos azules y los valores más altos, próximos a la fractura, en tonos rojos.

Se han identificado cuatro puntos clave a lo largo del perfil deformado, lo que permite analizar la evolución de las deformaciones en función de la ubicación dentro de la geometría conformada.



Gráfica 7: Evolución temporal de los puntos 1,2,3 y 4. (a) Punto alejado de la zona de interés con  $R_1 = 25\text{ mm}$  (b) punto cercano a la zona de interés  $R_2 = 22\text{ mm}$  (c) Punto de interés para  $R_3 = 21\text{ mm}$  y (d) punto cercano a la zona de interés para  $R_4 = 20\text{ mm}$ .

En el proceso SPIF, el ángulo de pared  $\alpha$  define la inclinación con la que la herramienta avanza sobre la chapa. Un mayor  $\alpha$  implica que la chapa sufre un estiramiento más severo (aumenta  $\epsilon_1$ ) y, en consecuencia, mayor adelgazamiento (más negativo  $\epsilon_3$ ) como se ha mencionado en el apartado 2.3.2 del estado del arte. Por el contrario, un menor  $\alpha$  reduce la magnitud de la deformación principal y atenúa la reducción de espesor. Esto coincide con la distribución de deformaciones que aparece en la gráfica 7, que muestra la evolución

temporal de diferentes puntos a los que corresponde diferente ángulo de pared y por tanto diferente deformación.

En primer lugar, el punto 1 mostrado en la gráfica 7a muestra la evolución de un elemento ubicado a una distancia de 25 mm desde el eje central de la geometría. Se encuentra alejado del punto más crítico (punto 3). Se observa la tendencia a tensión biaxial inicial del elemento, notablemente por debajo de la FFL, una vez que la herramienta pasa por dicho elemento, este regresa a la zona de deformación plana.

En segundo lugar, la gráfica 7b muestra el punto 2 ubicado a un radio de 22 mm más cercano al punto de máxima deformación. En este caso, se aprecia menor tendencia a tensión biaxial y, una vez que la herramienta sobrepasa dicho elemento, el comportamiento del elemento vuelve a ser en la zona de deformación plana. Se aprecia como claramente sobrepasa los límites convencionales FFL sin llegar a la fractura.

En tercer lugar, la gráfica 7c muestra el punto de máxima deformación en un radio de 21 mm. Aquí puede observarse que la evolución se produce prácticamente en condiciones de deformación plana hasta el final. Las deformaciones superan notablemente el FFL, mostrando un incremento de conformabilidad típico del SPIF.

Por último, la gráfica 7d señala el punto 4 en un radio de 20 mm donde se observa la evolución en condiciones de deformación plana, sin llegar a estar en contacto con la herramienta, superando de igual manera la FFL.

En conjunto, estos resultados muestran cómo la herramienta de conformado incremental genera diferentes estados de deformación en la chapa a medida que avanza sobre la superficie.

### 5.1.2 Análisis en el espacio de la triaxialidad

Los resultados presentados en la sección anterior han demostrado que los niveles de deformación alcanzados mediante el conformado incremental de chapa superan el límite convencional de conformabilidad, representado por la FFL del material en condiciones de carga proporcional. Como consecuencia, el inicio de la fractura en ISF no puede predecirse de manera precisa basándose únicamente en el FLD. En este contexto, diversos estudios han propuesto el uso de diagramas de triaxialidad de tensión promedio frente a la deformación equivalente para una predicción más precisa del fallo en este proceso (Mirnia & Shamsari, 2017; Magrinho et al., 2019; Martínez-Donaire et al., 2019).

Siguiendo este enfoque, en la presente sección se analizará la evolución de la triaxialidad de tensión en el proceso ISF, utilizando el criterio de fluencia de Barlat 89.

En primer lugar, se presentan las curvas FFL del material en función de la triaxialidad de tensión. La curva negra corresponde al límite de conformabilidad determinado mediante el criterio de Barlat 89 obtenido mediante ensayos Nakazima, mientras que la curva gris

representa la predicción obtenida con el criterio de fluencia isotrópico de von Mises, adaptado de López-Fernández et al., 2023.

Se ha analizado la triaxialidad en la capa top, siendo esta la que está en contacto con la herramienta, (capa 1) y en la capa bottom, la que no entra en contacto con la herramienta (capa 5) mostradas en la fig. 52.

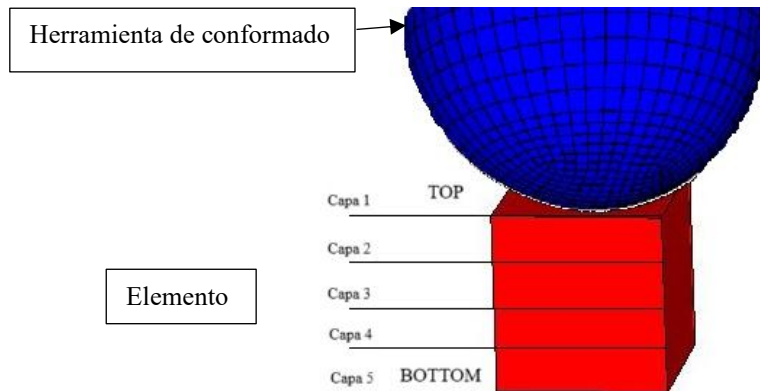
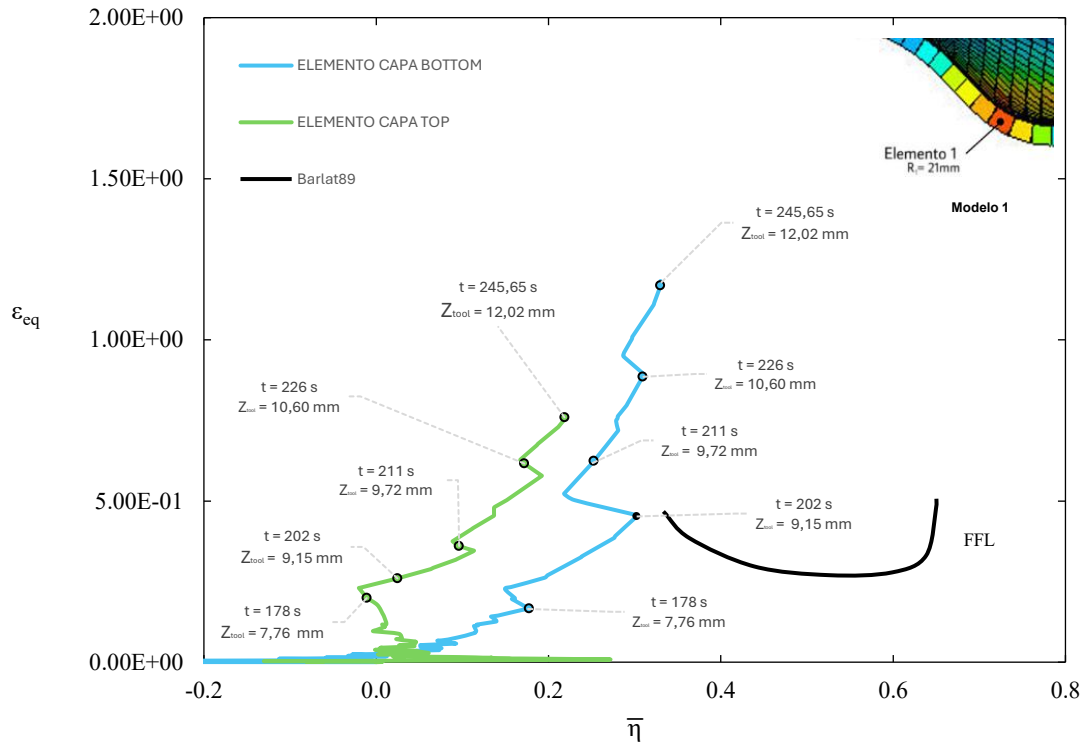


Figura 52: Distribución numérica de las capas en un elemento para 5 puntos de integración.

A lo largo del proceso de conformado, se registra la evolución de la deformación equivalente ( $\epsilon_{eq}$ ) frente a la triaxialidad promedio ( $\bar{\eta}$ ) en dos elementos característicos: uno situado en la capa superior (TOP, capa 1) y otro en la capa inferior (BOTTOM, capa 5).



Gráfica 8: Estudio de la triaxialidad en tensiones para puntos críticos de la simulación numérica en el Modelo 1.

La gráfica 8, recoge distintos instantes de tiempo y posiciones correspondientes a dos capas de un mismo elemento. Esto permite comparar cómo, incluso en momentos equivalentes y a la misma cota, el estado tensional y la deformación pueden diferir significativamente entre ambas capas. En lugar de emplear la triaxialidad de tensión instantánea, este trabajo utiliza la triaxialidad de tensión promedio como una métrica, que considera efectivamente el historial de carga inherente a ISF para una mayor precisión y predicciones de fractura, tal y como se realizó en López-Fernández et al. (2021).

Como se puede observar en el gráfico 6, para una  $Z_{tool} = 9,15 \text{ mm}$ , se observa una gran diferencia en cuanto a deformación equivalente y triaxialidad promedio. En la curva verde (capa top) el valor de este se encuentra cercano al cero mientras que la curva azul (capa Bottom) se desplaza hasta alcanzar valores cercanos a FFL.

El minuto 4,01 (245,65s) es el tiempo en el que se para el proceso experimental dado que la lámina rompe, llegando a alcanzar niveles de triaxialidad inferiores a FFL y deformación equivalente significativamente superiores, situando estos puntos a la izquierda de la curva, siendo el elemento en la capa top el más distanciado a la izquierda.

## 5.2 Cono de ángulo variable con chapa de soporte (Modelo 2)

En esta sección se amplía el análisis realizado en la sección 5.1, donde se estudiaron los resultados obtenidos con una chapa simple en el Modelo 1. Con el fin de evaluar el impacto de la incorporación de una segunda chapa en el comportamiento del cono de ángulo variable, se han realizado nuevos ensayos y simulaciones. La incorporación de la segunda chapa de respaldo tiene como objetivo mejorar la estabilidad estructural y modificar la distribución de tensiones y deformaciones en la pieza.

Se procederá a analizar los resultados tanto en el espacio de las deformaciones principales como en el espacio de la triaxialidad, permitiendo una comparación directa con los resultados obtenidos en la configuración anterior. Con este análisis se busca identificar y cuantificar las mejoras potenciales en el desempeño del cono al incorporar una chapa de soporte, aportando información relevante para la optimización del diseño y recursos.

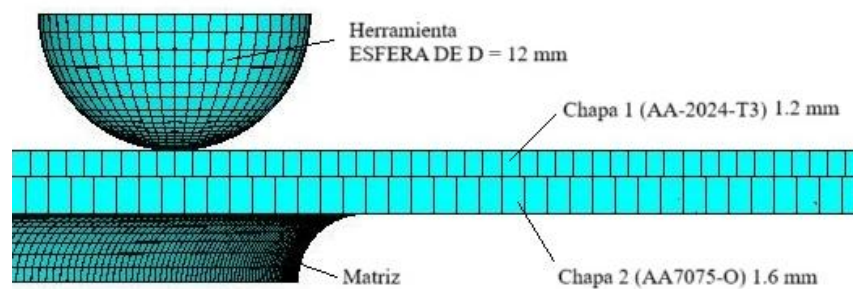


Figura 53: Visualización numérica del segundo ensayo en ANSYS añadiendo una segunda chapa.

Como muestra la fig. 53, se optó por modelar dos chapas con distintas características para evaluar la influencia de las propiedades materiales y geométricas en el comportamiento del proceso de conformado. La chapa superior, elaborada en AA2024-T3, constituye el elemento de interés principal.

Por otro lado, la chapa inferior se modeló con AA7075-O y un mayor espesor (1,6 mm frente a 1,2 mm en la chapa superior). Esta elección responde a la intención de realizar un análisis de sensibilidad que permita observar cómo las variaciones en las propiedades mecánicas y en la geometría (espesor) influyen en la distribución de deformaciones y tensiones durante el proceso. Al emplear un material con una respuesta plástica y de endurecimiento diferente, se pueden generar patrones de deformación distintos en la zona inferior, lo que facilita la identificación de la influencia del confinamiento y la rigidez local en el estado de deformación del conjunto.

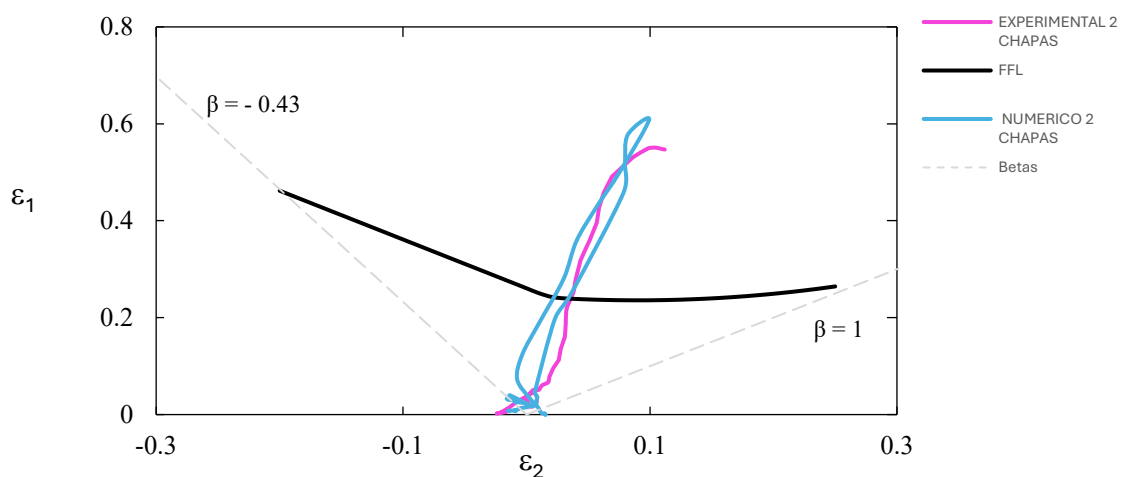
El AA7075-O es una aleación de alta resistencia en estado recocido (O), lo que significa que ha sido tratada térmicamente para obtener una mayor ductilidad y facilidad de conformado, a costa de tener una resistencia mecánica inferior en comparación con otros estados.

### 5.2.1 Análisis en el espacio de las deformaciones principales.

Se procede a evaluar la influencia de la incorporación de una segunda chapa en la evolución de las deformaciones principales durante el proceso de SPIF. Se busca determinar si la adición de este refuerzo modifica la trayectoria en el espacio  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  en comparación con el caso de una chapa simple y, en consecuencia, si se puede esperar una mejora en la distribución de tensiones y un retraso en la aparición del fallo.

El análisis se orienta a comparar las trayectorias de las deformaciones principales obtenidas mediante simulación numérica y ensayos experimentales, identificando diferencias en la evolución del estado de deformación al incluir una segunda chapa. En particular, se pretende determinar si actúa como elemento estabilizador, desplazando la trayectoria hacia valores menos críticos y, por ende, incrementando la capacidad de conformabilidad del sistema.

De igual manera, se identificarán secciones críticas a lo largo del cono conformado, ubicadas en zonas donde se evidencian concentraciones de deformación. Estas secciones se analizaron tanto en los resultados numéricos como en los experimentales.



Gráfica 9: Modelo EF en el espacio de las deformaciones principales para dos chapas en el Modelo 2. Comparación numérico-experimental de una sección en el momento de la fractura.

En la gráfica 9 se observa la trayectoria de las deformaciones principales  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  hasta el instante de fractura, evidenciando aspectos relevantes en el comportamiento del material.

En primer lugar, la curva de deformación se aproxima a una región de deformación biaxial positiva, en la que tanto  $\varepsilon_1$  como  $\varepsilon_2$  alcanzan valores positivos de forma simultánea. La segunda chapa actúa como un refuerzo, aumentando la rigidez global del sistema. Esto limita la capacidad de la chapa superior para expandirse libremente en todas las direcciones.

Tanto el modelo numérico como los resultados experimentales muestran una tendencia similar en el diagrama. Las ligeras diferencias observadas pueden atribuirse a la calibración del modelo constitutivo, a las simplificaciones en las condiciones de contorno durante la simulación y a los efectos complejos de fricción no lineal entre las chapas.

Adicionalmente, es relevante considerar la evolución de la deformación  $\varepsilon_3$ . En procesos SPIF, refleja el adelgazamiento o espesamiento de la chapa durante el conformado. En este caso, la interacción entre las dos chapas podría estar favoreciendo un adelgazamiento más controlado y homogéneo, evitando concentraciones excesivas de tensión a lo largo del espesor. Este comportamiento contribuye a retrasar la iniciación de la fractura, al distribuir de manera equilibrada las deformaciones en las tres direcciones.

Para evaluar la distribución de las deformaciones principales en la chapa AA7075-O sometida al proceso de conformado incremental, se analizaron cuatro puntos clave en la Z de fractura. En cada punto, se graficaron las deformaciones principales y, se compararon con la FFL para determinar la proximidad al fallo.

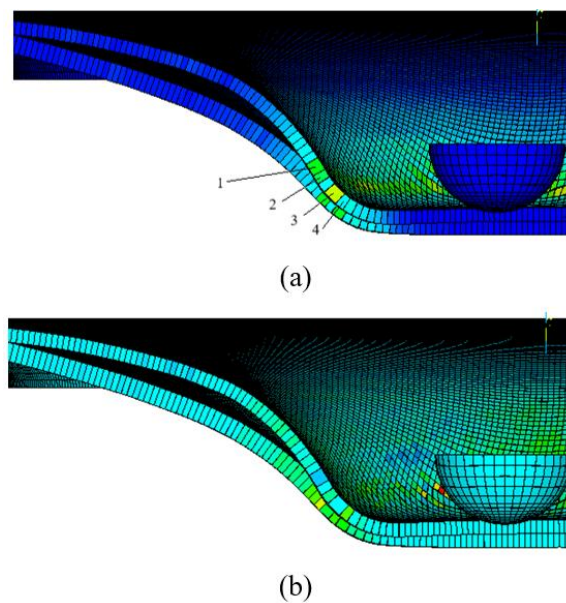
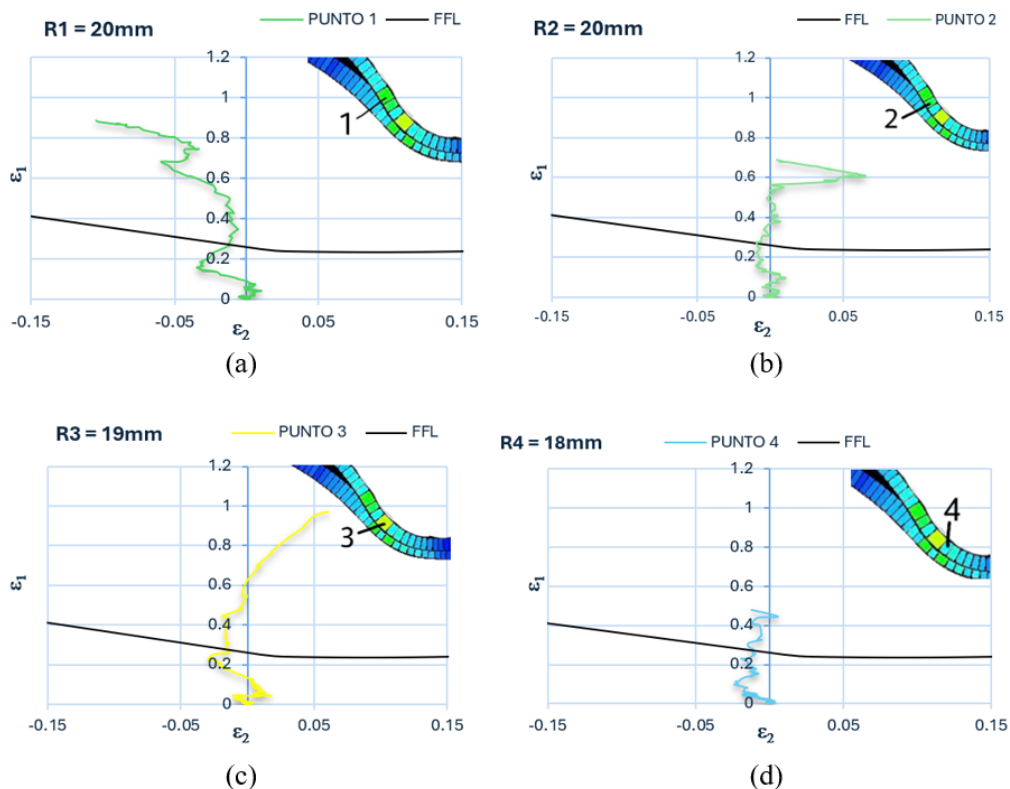


Figura 54: Distribución de las deformaciones principales para dos chapas en la capa TOP en el instante de rotura  $t = 316,8 \text{ s}$  y  $Z_{fract} = 17,975 \text{ mm}$  (a) deformación máxima  $\varepsilon_1$  y (b) deformación principal mínima  $\varepsilon_2$ .

A continuación, se describen los cuatro puntos clave (1, 2, 3 y 4) señalados en la zona de fractura visualizados en la fig. 54, tomando como referencia la escala de deformaciones principales mostrada en las figuras. Estos puntos se han seleccionado por presentar niveles críticos de deformación para la  $Z_{fract}$  del Modelo 2 y, por lo tanto, ser representativos para comparar con la FFL y evaluar la cercanía al fallo.



Gráfica 10: Evolución temporal para el Modelo 2 de los puntos 1,2,3 y 4 para 2 chapas. (a) Punto cercano de la zona de interés con  $R_1 = 20\text{mm}$  (b) punto próximo a la zona de interés  $R_2 = 20\text{mm}$  (c) Punto de interés para  $R_3 = 19\text{mm}$  y (d) punto cercano a la zona de interés para  $R_4 = 18\text{mm}$ .

En primer lugar, el punto 1 mostrado en la gráfica 10a muestra la evolución de un elemento ubicado a una distancia de  $R_1 = 20\text{mm}$  desde el eje central de la geometría. Se encuentra alejado del punto más crítico (punto 3). La tendencia predominante es de deformación plana, superando con claridad el FFL. Esta evolución sugiere que la presencia de la chapa inferior permite una acumulación de deformación mayor, probablemente al limitar el movimiento libre del material hacia el lado inferior, reduciendo el riesgo de inestabilidad.

En segundo lugar, la gráfica 10b recoge el comportamiento del punto 2, también situado a un  $R_2 = 20\text{mm}$  pero en una región simétrica respecto al punto 1. De manera similar, se observa una evolución en deformación plana, con incrementos bruscos en la deformación principal. El punto supera ligeramente la FFL sin presentar indicios de fallo.

La gráfica 10c representa el punto 3, ubicado a  $R_3 = 19\text{mm}$ , correspondiente a la zona de máxima sollicitación del proceso. En este caso, el incremento de la deformación principal es notable, alcanzando valores superiores a 1,1, significativamente por encima de la FFL. La trayectoria se desarrolla casi en su totalidad en el dominio de deformación plana, sin cambios bruscos de curvatura, lo que confirma que el modelo con chapa de respaldo permite una conformación más profunda sin provocar fractura ni inestabilidades localizadas.

Por último, la gráfica 10d muestra el punto 4, situado en una posición aún más cercana al eje ( $R_4 = 18 \text{ mm}$ ), fuera del área directa de contacto con la herramienta. La trayectoria también se desarrolla en condiciones de deformación plana y alcanza niveles de deformación superiores a los observados en modelos sin soporte, aunque sin llegar a los valores críticos del punto 3.

### 5.2.2 Análisis en el espacio de la triaxialidad

Los resultados obtenidos en la sección anterior muestran que, la introducción de una segunda chapa como respaldo ha permitido alcanzar deformaciones de fractura superiores a las obtenidas en el caso de SPIF sin chapa de respaldo. La chapa inferior aumenta la compresión a través del espesor, lo que sugiere un retraso en la aparición de la fractura y una mayor capacidad de conformabilidad.

Para comprender mejor el mecanismo de fallo en este proceso y evaluar el efecto del respaldo, se procederá a un análisis en el espacio de la triaxialidad de tensión.

Se toman como referencia sendos modelos, Modelo 1 elemento de fractura para  $R_{fract-1} = 21 \text{ mm}$  y  $Z_{fract-1} = 12,05 \text{ mm}$ , Modelo 2 elemento de fractura para  $R_{fract-2} = 19 \text{ mm}$  y  $Z_{fract-2} = 17,98 \text{ mm}$ .

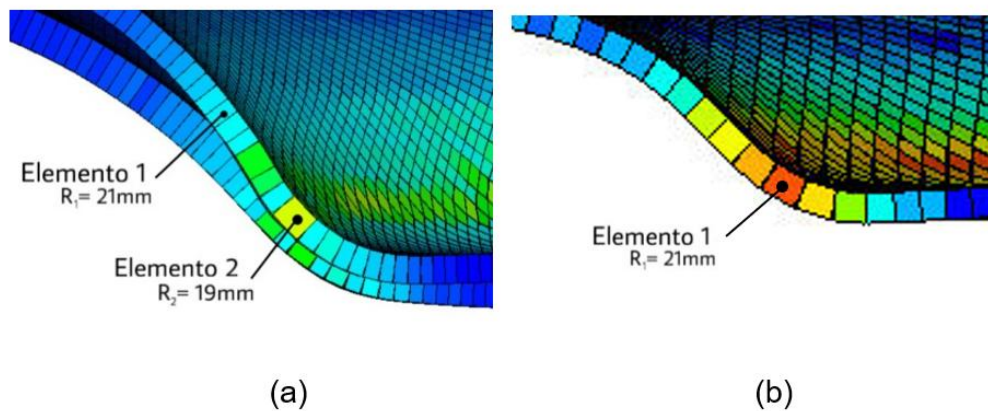
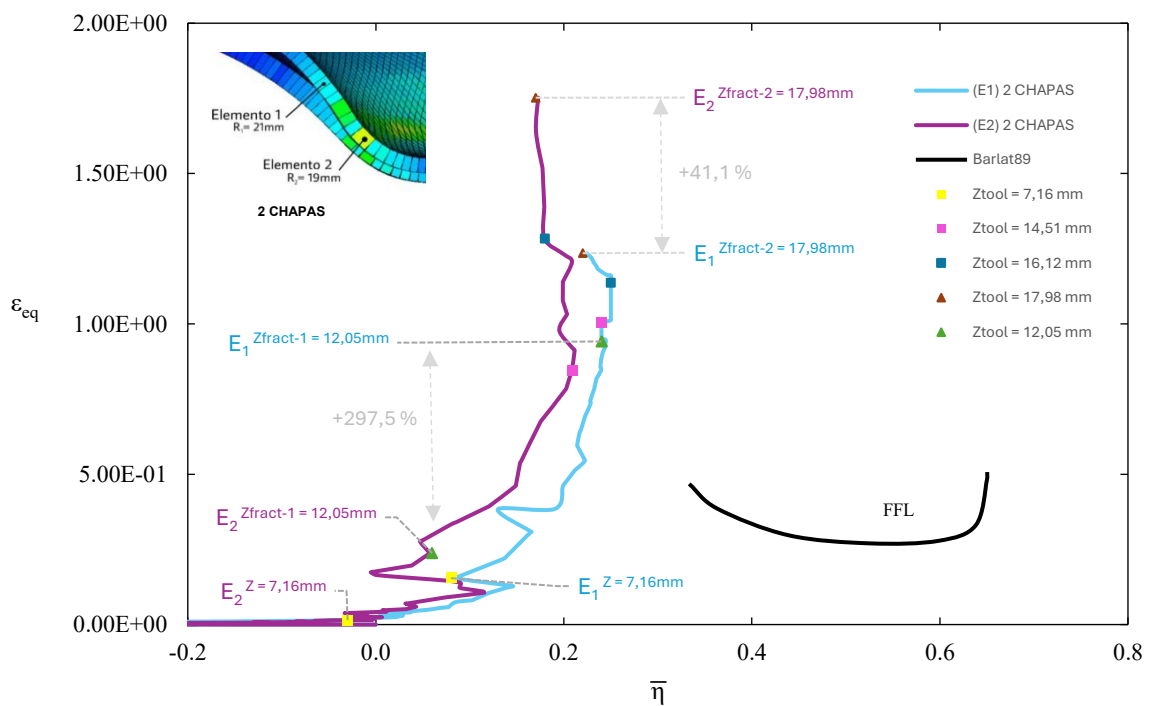


Figura 55: Selección de elementos de estudio. (a) Modelo 2 donde muestra el Elemento 1 correspondiente a la  $Z$  de fractura del Modelo 1 para un radio de 21mm y Elemento 2 correspondiente con la  $Z$  de fractura del Modelo 2 para un radio de 19mm y (b) Modelo 1 donde señala el Elemento 1 correspondiente a la  $Z$  de fractura del Modelo 1 para un radio de 21mm.

Como muestra la fig. 55, se seleccionaron elementos representativos en la zona crítica de deformación para ambos modelos estudiados. En primer lugar, se eligió un elemento ubicado en la  $Z$  de fractura del Modelo 1, correspondiente a un radio característico de 21 mm, el cual permite evaluar el comportamiento del conformado incremental con una única chapa. A este mismo radio, se seleccionó un elemento en el Modelo 2 (con doble

chapa), lo que permite una comparación directa bajo las mismas condiciones geométricas, pero con un refuerzo adicional que influye en el estado tensional.

Adicionalmente, se analizó un segundo elemento en el Modelo 2, situado en la Z de fractura correspondiente a un radio de 19 mm. Este caso resulta especialmente relevante, ya que en el Modelo 1 no fue posible alcanzar dicho radio debido a la aparición prematura de la fractura, lo que evidencia el incremento de la conformabilidad asociado al uso de una chapa de respaldo. Esta selección de elementos permitirá estudiar la evolución de la triaxialidad y la deformación equivalente hasta la rotura, aportando información clave sobre las diferencias en el comportamiento mecánico entre ambos enfoques de conformado.



Gráfica 11: Estudio de la triaxialidad en tensiones para elementos críticos de la simulación numérica para 2 chapas en el Modelo 2.

La gráfica 11 muestra la evolución de la deformación equivalente ( $\epsilon_{eq}$ ) en función de la triaxialidad promedio de tensiones ( $\bar{\eta}$ ) para los elementos analizados. Los distintos puntos marcados sobre las curvas representan la progresión del conformado a medida que avanza la bajada de la herramienta ( $Z_{tool}$ ), permitiendo correlacionar el incremento de la deformación con el estado tensional del material en cada instante.

Se observa que, en azul celeste para el Elemento 1 ( $R_{E1} = 21 \text{ mm}$ ), la curva del modelo con refuerzo evoluciona con una triaxialidad positiva moderada ( $\bar{\eta} \approx 0,2$ ), sin superar

los límites definidos por la curva de fractura de Barlat89 ni alcanzar la zona crítica de la FFL, lo cual justifica la ausencia de fractura. Se encuentra significativamente por la izquierda de FFL para valores bajos en triaxialidad y altos en deformación equivalente.

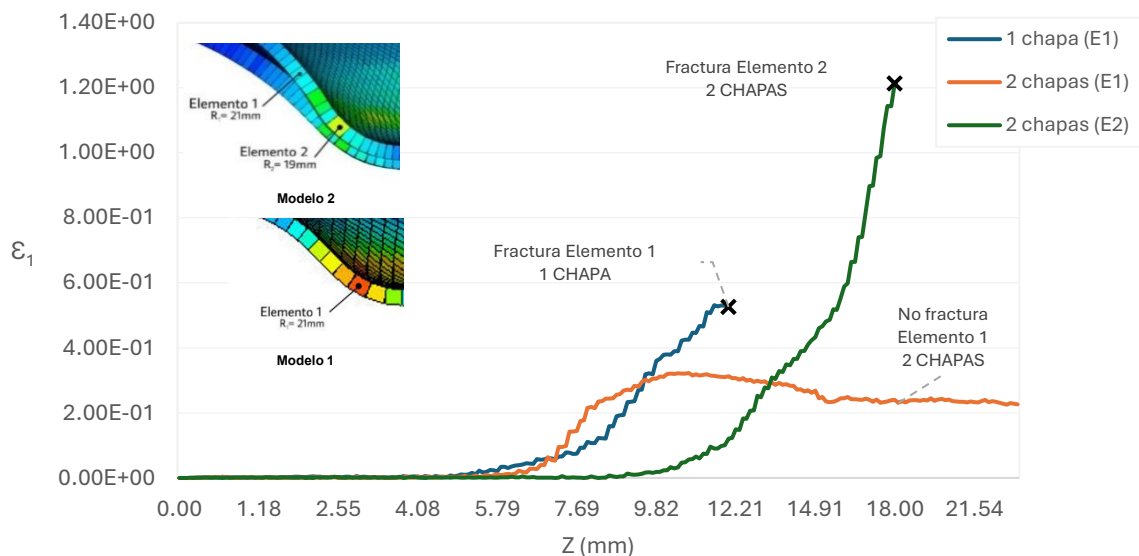
El Elemento 2 color púrpura en la gráfica 11, del Modelo 2, correspondiente al radio más reducido ( $R_{E2} = 19 \text{ mm}$ ), muestra una trayectoria más acentuada, alcanzando deformaciones equivalentes del orden de  $\varepsilon_{eq} \approx 1,7$  antes de fracturar. Esta curva traza un camino creciente en triaxialidad positiva, manteniéndose dentro del límite de fractura definido por Barlat hasta los últimos pasos de proceso.

### 5.3 Comparativa de resultados

Una vez analizados individualmente los modelos de cono de ángulo variable con y sin chapa de soporte, en esta sección se presentan los resultados comparativos con el objetivo de evaluar el impacto del uso de una chapa inferior en el comportamiento del material durante el proceso de conformado incremental.

#### 5.3.1 Comparativa en el espacio de las deformaciones principales

En este apartado se comparan los resultados de deformación principal máxima ( $\varepsilon_1$ ) y deformación equivalente ( $\varepsilon_{eq}$ ) obtenidos para los elementos representativos  $E_1$  y  $E_2$  en los modelos de una y dos chapas.



Gráfica 12: Deformación principal para los elementos de interés en Modelo 1 y Modelo 2.

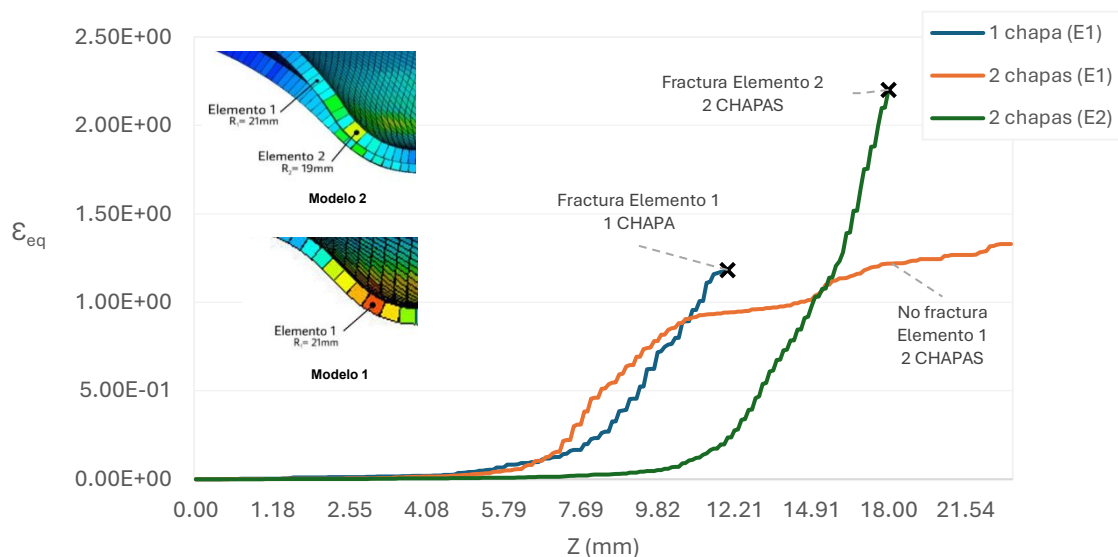
En la gráfica 12 se representa la evolución de la deformación principal máxima ( $\varepsilon_1$ ) en función del desplazamiento vertical de la herramienta ( $Z$ ) para los elementos seleccionados en ambos modelos.

Para una misma posición de herramienta, el Elemento 1 en el Modelo 1 (una sola chapa) alcanza una deformación máxima antes de fractura que es bastante mayor que la obtenida para el mismo elemento del Modelo 2 (con chapa de respaldo). Además, en el Modelo 2, el elemento 1 nunca alcanza la fractura, estabilizándose la deformación en torno a  $\varepsilon_1 \approx 0,2487$ , lo que indica una mayor resistencia al fallo.

Para analizar la fractura en el caso de dos chapas, es necesario estudiar el Elemento 2, que corresponde a una zona más alejada del centro. Este análisis sólo tiene sentido en el Modelo 2, ya que en el modelo 1 la fractura ocurre antes de alcanzar dicha región. En este elemento, la deformación crece de forma progresiva y sostenida, superando  $\varepsilon_1 = 1,2137$  antes de producirse la fractura a  $Z_{fract}^{Modelo\ 2} = 17,98$  mm, lo que evidencia la mayor capacidad de conformabilidad del modelo con chapa de respaldo, en comparación con el modelo de SPIF (un 130,7% más de  $\varepsilon_1$  de fractura).

En general, se observa que el uso de una chapa de soporte permite acumular mayores deformaciones plásticas antes de la fractura, desplazando la localización del fallo hacia regiones más alejadas y aumentando el rango útil de conformado.

En la gráfica 13, se presenta la evolución de la deformación equivalente ( $\varepsilon_{eq}$ ) en función de la bajada de la herramienta ( $Z$ ) para los elementos representativos seleccionados en los modelos numéricos.



Gráfica 13: Evolución comparativa de la deformación equivalente en el Modelo 1 y Modelo 2 para los elementos de interés.

Los resultados muestran claramente cómo en el Modelo 1, el Elemento 1 alcanza una deformación equivalente de  $\varepsilon_{eq}^{fractura(E1)} \approx 1,18$  antes de fracturar a  $Z_{fract(E1)}^{Modelo 1} = 12,02 \text{ mm}$ .

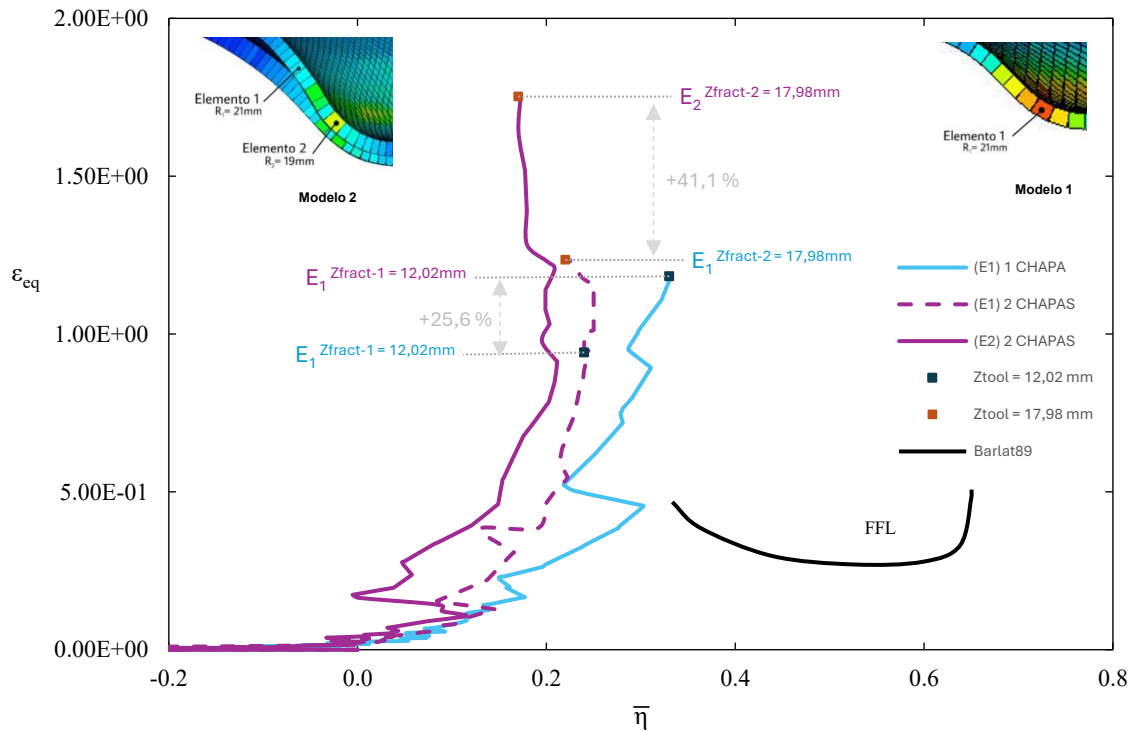
En el Modelo 2, el mismo elemento (Elemento 1) presenta una evolución más contenida de la deformación, sin llegar a la fractura, y estabilizándose alrededor de  $\varepsilon_{eq} \approx 0,70$ . Esto indica una mayor estabilidad local y una disminución del daño acumulado en esa región.

Por otro lado, el Elemento 2, muestra una acumulación sostenida de deformación equivalente hasta superar  $\varepsilon_{eq} = 2,2012$ , fracturando a  $Z_{fract(E2)}^{Modelo 2} = 17,98 \text{ mm}$  mostrando un incremento del 86,5 % en la deformación equivalente en el momento de fractura respecto al modelo convencional de una sola chapa. Este resultado pone en evidencia que, al evitar la fractura prematura en la zona crítica (Elemento 1), el proceso puede avanzar más, permitiendo que zonas más alejadas acumulen mayores deformaciones.

### 5.3.2 Comparativa en el espacio de la triaxialidad

Con el objetivo de profundizar en la comprensión del comportamiento del material durante el conformado incremental, se ha llevado a cabo un análisis comparativo en el espacio de la triaxialidad promedio ( $\bar{\eta}$ ) frente a la deformación equivalente ( $\varepsilon_{eq}$ ). Este enfoque permite estudiar no solo la magnitud de la deformación alcanzada, sino también el estado de tensión asociado, proporcionando información clave sobre la proximidad a condiciones críticas de fallo.

La gráfica 14 muestra la evolución de la deformación equivalente frente a la triaxialidad promedio del estado de tensiones para los elementos seleccionados en los modelos de una y dos chapas.



Gráfica 14: Estudio comparativo de la triaxialidad en tensiones para elementos críticos de la simulación numérica para 1 chapa simple en el Modelo 1 y 2 chapas en el Modelo 2.

En primer lugar, se observa que el Elemento 1 en el Modelo 1 (una chapa) alcanza una deformación equivalente máxima a  $\varepsilon_{eq} = 1,183$ , con valores de triaxialidad promedio de  $\bar{\eta} = 0,33$ . Sin embargo, al añadir una segunda chapa (Modelo 2), este mismo elemento alcanza una deformación equivalente ligeramente superior bajo niveles de triaxialidad menores ( $\varepsilon_{eq} = 0,942$  y  $\bar{\eta} = 0,24$ ), lo que sugiere una mejora en la distribución de tensiones y una mayor capacidad de conformabilidad sin provocar la rotura.

Por otro lado, el Elemento 2 del Modelo 2, ubicado en la zona de fractura final, muestra una trayectoria continua hasta valores de  $\varepsilon_{eq} = 1,752$ , manteniéndose en una región de triaxialidad considerablemente más baja ( $\bar{\eta} = 0,17$ ) durante la mayor parte del proceso. Este comportamiento confirma que la presencia de la chapa de respaldo no solo retrasa la aparición de fractura, sino que también modifica el camino de carga en el espacio de triaxialidad, alejando el estado tensional del dominio crítico descrito por la FFL convencional. En general, todas las trayectorias se encuentran por encima de la FFL obtenida por Barlat89, lo cual es consistente con el hecho de que el proceso de conformado incremental genera rutas de carga no proporcionales que permiten alcanzar mayores niveles de deformación antes de la fractura.

## 6. Conclusiones

En este apartado se recogen las principales conclusiones obtenidas en este trabajo de fin de máster. Se discuten una serie de conclusiones generales de los resultados que posteriormente serán extendidas a través de unas conclusiones particulares. Además, se plantean posibles líneas de trabajo futuro orientadas a mejorar la caracterización del proceso, ampliar la validez del modelo propuesto y explorar nuevas configuraciones y materiales que optimicen el rendimiento del método.

### 6.1 Conclusiones generales

El presente trabajo de fin de máster propone un método híbrido de conformado incremental de chapa monopunto (SPIF), que usa una segunda chapa como respaldo, lo que lo convierte en un proceso similar al conformado mediante dos puntos (TPIF). Esta modificación mantiene la reducción de costes asociada a los procesos incrementales monopunto, basados en la eliminación de matriz inferior y ha demostrado, no sólo ser un proceso viable en términos de ejecución, sino capaz de aumentar la conformabilidad asociada a los procesos monopunto (SPIF).

El estudio del proceso se ha basado en dos enfoques diferentes: (i) un análisis experimental y posterior análisis de deformaciones que demuestra la viabilidad y mejoras introducidas por el método propuesto y (ii) un análisis numérico mediante elementos finitos que respalda los resultados experimentales y proporciona una explicación en términos de tensiones, ya que estas últimas no es posible medirlas de manera directa sobre el material.

Las conclusiones generales anteriores se han obtenido a través de las siguientes conclusiones específicas:

- Se ha usado un setup de conformado incremental instalado en un centro de mecanizado por CNC de 3 ejes para realizar dos ensayos de conformado incremental: un ensayo con la variante monopunto (SPIF) y otro con chapa de respaldo (el método propuesto en este TFM). Ambos procesos han resultado viables en la configuración establecida, pudiéndose alcanzar los esfuerzos necesarios y las características técnicas necesarias para su ejecución.
- Los ensayos se han basado en la **fabricación de secciones cónicas de ángulo variable**, una geometría típica usada en conformado incremental para evaluar la conformabilidad del material en condiciones de deformación plana. En este caso, el ángulo de la generatriz del cono, variable usada para medir la conformabilidad de una forma indirecta, ha sido mayor en el proceso propuesto en este TFM (el

Modelo 2 que usa chapa de respaldo), mostrando una mejoría en términos de conformabilidad.

- Los troncos de cono obtenidos experimentalmente han sido analizados en términos de deformaciones. Es dicho análisis, se han obtenido las deformaciones en las zonas más representativas. Dichas deformaciones han demostrado también la **mejoría en términos de conformabilidad aportada por el proceso propuesto** en comparación con la del proceso de conformado incremental monopunto (SPIF). Además, estas deformaciones han sido la base para validar los modelos numéricos diseñados en este trabajo. El análisis de las deformaciones principales también corroboró la tendencia hacia un estado de deformación biaxial en el momento de fractura.
- Se han desarrollado dos **modelos numéricos en ANSYS LS-Dyna** que reproducen (a) el comportamiento del proceso de conformado incremental monopunto (SPIF) y (b) el proceso propuesto con chapa de respaldo (TPIF-modificado). Ambos modelos han sido ajustados y validados usando resultados experimentales basados en los ensayos realizados en este trabajo. Los resultados muestran que el uso de una chapa metálica de respaldo permite alcanzar niveles de deformación superiores a los obtenidos para el conformado monopunto, lo cual retrasa el inicio de la fractura y mejorando la distribución de deformaciones en la zona deformada.
- Los modelos numéricos han demostrado reproducir el comportamiento en términos de deformaciones los resultados obtenidos en los experimentos, lo cual los hace fiables para el estudio de tensiones. Se han analizado por tanto las evoluciones de los niveles de triaxialidad promedio en tensiones, variable que ha demostrado estar relacionada con la aparición del fallo en modo I en conformado de chapa. De esta forma, el modelo de conformado con chapa de respaldo ha mostrado valores de triaxialidad menores que el modelo con chapa de respaldo, lo cual se ha explicado en este trabajo por la compresión extra que aporta la chapa de respaldo. Este nivel de triaxialidad menor provoca un menor crecimiento de los huecos existentes en el material y es probablemente la causa del retraso del fallo por fractura dúctil.

Como conclusión final, el método híbrido propuesto no solo es técnicamente viable, sino que presenta ventajas potenciales en cuanto a coste, simplicidad del utillaje y adaptabilidad del proceso, especialmente en aplicaciones donde se requiera una solución flexible y de bajo volumen de producción. Por tanto, se puede decir que añadir una chapa de respaldo, aumenta la compresión a través de la chapa principal, provocando estados de triaxialidad menores que en el caso de SPIF sin chapa de respaldo. Esto lo hace una opción cuando se necesitan fabricar bajos números de piezas que exigen altos niveles de deformación.

## 6.2 Trabajos futuros

Dado que este estudio constituye una primera aproximación, se identifican varias líneas de investigación futuras necesarias para consolidar y ampliar los resultados obtenidos:

Cabe esperar que las propiedades mecánicas tanto de la chapa principal como de la chapa de respaldo influyen en el proceso. Es especialmente interesante explorar otras combinaciones de materiales, tanto para la chapa principal como para la de respaldo, con el fin de evaluar el efecto de las propiedades mecánicas relativas en la eficiencia del proceso. Algunos ejemplos pueden ser realizar variaciones en el espesor, rugosidad o condiciones de lubricación entre chapas.

Los experimentos realizados en este trabajo se han hecho bajo unos mismos parámetros de proceso, i.e igual diámetro de herramienta, bajada en eje z, velocidad de giro etc. Es conocido que dichos parámetros influyen significativamente en la conformabilidad del material, así como en la recuperación elástica, entre otros. Sería por tanto de interés científico analizar el efecto que tiene usar diferentes valores de estos parámetros en las piezas realizadas.

Por último, es importante extender este enfoque a geometrías de mayor complejidad y bajo estados de deformación diferentes, con los objetivos de (1) evaluar los límites de conformabilidad bajo otros estados y (2) analizar su potencial industrial en sectores como la automoción, la aeronáutica o la fabricación de utillajes personalizados.

## Bibliografía

Allwood J, Braun D, Music O (2010) The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology* 210(11):1501–1510

Allwood JM, Shouler DR (2007) Paddle forming: a novel class of sheet metal forming processes. *Annals of the CIRP* 56(1):257–260

Kalpakjian S, Schmid S (2014) *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th ed. Pearson Education, Harlow

D. E. Herrera, M. López, M. Bernal, A. Pájaro (2025) Proceso de doblado. 12-14

Wang C (1993) Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operations in sheet-metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* Volume 53, Issues 3–4, September 1995, pp 759-780

Dieter GE (1961) *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill, New York.

Groover MP (2010) *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4th ed. Wiley, Hoboken, NJ, pp 610–720.

Antonelli V (2008) Pressure distribution and surface quality during forming of thermoplastic composites with a collection of rubber particles as mould half Flores (2022) Esquema de un proceso de conformado de alta velocidad mediante campos electromagnéticos pulsados pp 1

MachineMFG (s.f.) *Sheet Metal Forming Processes and Equipment*. Ilustración esquemática del proceso de conformado explosivo

Manufacturing Guide (s.f.) Spin forming of discs. Representación del spinning convencional

Leszak E (1967) Apparatus and process for incremental dieless forming

Kitazawa K (1997) Limit strains for cnc incremental stretch-expanding of alu minum sheets. *J of Japan Institute of Light Metals* 47:445-450

Kitazawa K, Nakane M (1997) Hemi-ellipsoidal stretch expanding of aluminum sheet by cnc incremental forming process with two path method. *J of Japan Institute of Light Metals* 47:440-445

Kitazawa K, Wakabayashi A, Murata K, Yaejima K (1996) Metal ow phenom ena in computerized numerically controlled incremental stretch-expanding of aluminum sheets. *J of Japan Institute of Light Metals* 46:65-70

Powell N, Andrew C (1992) Incremental Forming of Flanged Sheet Metal Components Without Dedicated Dies. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 206(1):41-47

Matsubara (1994) Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool. J of the JSTP 35(1):1311-1316

Shankar R, Jadhav S, Goebel W, Rand Homberg, Kleiner M (2005) Incremental sheet metal forming of preformed sheets. Proceedings of the ICTP 2005, Verona, Italy

Jeswiet J, Hagan E (2002) Rapid proto-typing of a headlight with sheet metal. Transactions of North American Manufacturing Research Institute 30:33-38

Jong-Jin P, Yung-Ho K (2003) Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. Journal of Materials Processing Technology 140:447-453

FICEP Automation (2020) Single Point Incremental Forming at University of Aveiro – SPIF-A Project. YouTube, 02:15

McAnulty T, Jeswiet K, Doolan M (2016) Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology pp 43-54

Le V, Ghiotti A, Lucchetta G (2008) Preliminary studies on single point incremental forming for thermoplastic materials. International Journal of Material Forming 1/1:1179-1182

Franzen V, Kwiatkowski L, Martins P, Tekkaya (2009) Single point incremental forming of pvc. Journal of Materials Processing Technology 209:462-469

Jackson K, Allwood J, Landert M (2008) Incremental forming of sandwich panels. Journal of Materials Processing Technology 204/13:290-303

Silva et al. (2010) Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. The Journal of Adhesion, 82:1091–1115, 2006

Hagan E, Jeswiet J (2003) A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 217(2):213-225

Shim M, Park J (2001) The formability of aluminum sheet in incremental forming. Journal of Materials Processing Technology 113/13:654-658

Lu B, Fang Y, Xu D, Chen J, Ou H, Moser N, Cao J (2014) Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. International Journal of Machine Tools & Manufacture 85:14-29

- Fan G, Sun F, Meng X, Gao L, Tong G (2009) Electric hot incremental forming of ti-6al-4v titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 49:941-947
- Husmann T, Magnus C (2016) Thermography in incremental forming processes at elevated temperatures. *Measurement* 77:16-28
- Hirt G, Ames J, Bambach M, Kopp R (2004) Forming strategies and process modelling for cnc incremental sheet forming. *Annals of CIRP* 53/1/2004:203
- Young D, Jeswiet J (2004) Wall thickness variations in single point incremental forming. *J of Engineering Manufacture* 218:204-210
- Filice L, Fantini L, Micari F (2002) Analysis of material formability in incremental forming. *Annals of the CIRP* 51/1/2002:199-202
- Ayachi N, Guermazi N, Pham CH, Manach PY (2020) Development of a Nakazima Test Suitable for Determining the Formability of Ultra-Thin Copper Sheets. *Metals* 10(9):1163.
- Paul SK (2014) An improved methodology to determine forming limit diagram using Nakazima test. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 75:399–409.
- Suárez FF, Utterback JM (1995) Dominant designs and the survival of firms. *Strategic Management Journal* 16(6):415–430
- Emmens W, Van den Boogaard A (2008) Tensile tests with bending: a mechanism for incremental forming. *Int J Mater Form Suppl* 1:1155-1158
- Emmens W, Van den Boogaard A (2009) An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. *Journal of material processing technology* 209:3688-3695
- Ambrogio G, Costantino I, De Napoli L, Filice L, Frantini L, Muzzupappa M (2004) Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology* 153-154:501-507
- Ambrogio G, Gagliardi F, Filice L (2013) Robust design of incremental sheet forming by taguchis method. *Procedia CIRP* 12:270-275
- Magrinho M, Silva G, Centeno G, Moedas F, Vallellano C, Martins P (2019) On the determination of forming limits in thin-walled tubes. *International Journal of Mechanical Sciences* 155:381-391

- Vallellano C, Morales D, Garca-Lomas FJ (2008) A study to predict failure in bi axially stretched sheets of aluminum alloy 2024-t3. *Materials and Manufacturing Processes* 23:3:303-310
- Isik K, Silva M, Tekkaya A, Martins P (2014) Formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 214:1557-1565
- Soeiro J, Silva C, Silva M, Martins P (2015) Revisiting the formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 217:184-192
- Eyckens P, He S, Van Bael A, Van Houtte P, Duflou J. Forming limit predictions for the serrated strain paths in single point incremental sheet forming. *AIP Conf Proc*, vol. 908, (2007), p. 141–6
- Centeno G, Martnez-Donaire Andres J, Bagudanch I, Morales-Palma D, Garcia Romeu ML, Vallellano C (2017) Revisiting formability and failure of aisi304 sheets in spif: Experimental approach and numerical validation. *Metals* 7:531
- Malhotra R, Xue L, Belytschko T, Cao J (2012) Mechanics of fracture in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology* 212:1573-1590
- McClintock FA (1968) A criterion for ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics* 35:363-371
- Rice J, Tracey D (1969) On the ductile enlargement of voids in triaxial stress elds. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 17:201-217
- Bao Y, Wierzbicki T (2004) On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences* 46:81-98
- Cristino V, Montanari L, Silva M, Atkins A, Martins P (2014) Fracture in hole anging produced by single point incremental forming. *Int Journal of Mechanical Sciences* 83:146-154
- Ayada M, Higashino T, Mori K (1987) Central bursting in extrusion of inhomogen eous materials. *ICTP 1987 Proceedings of the 2nd International Conference on Technology of Plasticity* 1:553-558
- Centeno G, Doblaz F, Martnez-Palmeth L, Martnez-Donaire A, Vallellano C (2012a) Fea of the bending e ect in the formability of metal sheets via incre mental forming. *Steel Research International Spl. Issue Metal Forming*:447-450
- Centeno G, Silva M, Cristino V, Vallellano C, Martins P (2012b) Hole- anging by incremental sheet forming. *International Journal of Machine Tools and Manu facture* 59:46-54

- Centeno G, Bagudanch I, Martnez-Donaire A, Garcia-Romeu M, Vallellano C (2014) Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single point incremental forming. *International Journal of Mechanical Sciences* 63:20-29
- Centeno G, Martnez-Donaire Andres J, Bagudanch I, Morales-Palma D, Garcia Romeu ML, Vallellano C (2017) Revisiting formability and failure of aisi304 sheets in spif: Experimental approach and numerical validation. *Metals* 7:531
- Shin YC, Park SH, Ko SH, Kim HK (2002) Process planning for incremental sheet metal forming using machining feature approach. *Journal of Materials Processing Technology* 130–131:42–46.
- Hussain G, Gao L, Hayat N, Rafiq MA (2007) A novel method to reduce forming forces in single point incremental forming using rotated vertical wall. *Journal of Materials Processing Technology* 189(1–3):373–376.
- Belytschko L, Moran (2000) *Nonlinear finite elements for continua and structures*. Wiley
- Lopez-Fernandez J, Centeno G, Martnez-Donaire Andres J, Morales-Palma D, Vallellano C (2019) Critical evaluation of the formability of aa2024-t3 sheet deformed by single-point incremental forming. *DYNA- Ingeniera e Industria* 94(5):523-529
- López-Fernández JA, Centeno G, Martínez-Donaire AJ, Morales-Palma D, Vallellano C. Stretch flanging of AA2024-T3 sheet by single-stage SPIF. *Thin-Walled Structures* (2021);160. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107338>.
- López-Fernández JA, Centeno G, Vallellano C. Wrinkling in shrink flanging by single point incremental forming. *Int J Mech Sci* (2023);240.
- López-Fernández JA, Borrego M., Centeno G., Vallellano C. Fracture in stretch flanging by single point incremental forming, *International Journal of Mechanical Sciences* (2024), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109438>
- Zhang GE, Yao J, Jack SH, Wu X (2003) Shrink anging with surface contours. *Journal of Manufacturing Processes* 5(2):143 153
- Borrego M, Morales-Palma D, Martínez-Donaire AJ, Centeno G, Vallellano C (2020) 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*.