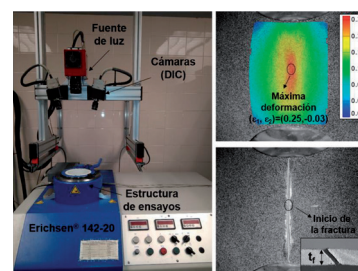


Evaluación crítica de la conformabilidad en chapa de AA2024-T3 deformada mediante conformado incremental mono-punto

Critical evaluation of the formability of AA2024-T3 sheet deformed by single-point incremental forming



J. Andrés López-Fernández, Gabriel Centeno, Andrés J. Martínez-Donaire, Domingo Morales-Palma y Carpóforo Vallengano

Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación. Camino de los Descubrimientos, s/n - 41092 Sevilla (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9141> | Recibido: 05/03/2019 • Inicio Evaluación: 07/03/2019 • Aceptado: 08/05/2019

ABSTRACT

- The evaluation of the enhanced formability in incremental sheet forming processes (ISF), and especially in its simplest variant single point incremental forming (SPIF), has been intensively studied within the sheet metal forming community for the last decade. In general, the formability limit in SPIF is defined by means of the fracture forming limit (FFL). This FFL is usually well above the forming limit curve (FLC), which is the limit controlling failure by necking in conventional sheet metal forming operation on ductile metal sheet. However, low ductility sheet metal such as AA2024-T3 presents usually a fracture-controlled mechanism independent to the forming operation considered. In this context, this paper consist in a critical analysis on formability and failure of AA2024-T3 sheets deformed by SPIF. The study is carried out from a double perspective based on an experimental plan including conventional and incremental forming tests, and numerical simulations using the flow formulation finite element tool DEFORM-3D®. The results show the experimental evidence of a formability enhancement in SPIF above the conventional FFL for this kind of material as well as the necessity of calibrating numerical simulations of these incremental forming processes using experimental data obtained from the corresponding experimental SPIF tests.
- Keywords:** Sheet metal forming, incremental sheet forming (ISF), single point incremental forming (SPIF), formability, fracture.

RESUMEN

La evaluación del incremento de conformabilidad en procesos de conformado incremental de chapa (ISF), y especialmente en su variante mono-punto (SPIF), ha sido estudiada de manera intensiva durante la última década en la comunidad científica de conformado plástico de chapa metálica. De manera general, los límites de conformado en SPIF se definen a través del límite de fractura (FFL). Este FFL normalmente se localiza sensiblemente por encima de la curva límite de conformado (FLC), que controla el fallo por estricción en operaciones convencionales de deformación plástica de chapa. Sin embargo, en chapa metálica de material de baja ductilidad, como es el caso del AA2024-T3, el mecanismo de fallo podría ser fractura dúctil independientemente del proceso de conformado que se utilice. En este contexto, este artículo contempla un análisis crítico de la conformabilidad y el fallo de chapa de AA2024-T3 deformada mediante SPIF. El estudio se ha

llevado a cabo desde una doble perspectiva basada en un plan de experimentos que incluye ensayos de conformado convencionales e incrementales, y en simulaciones numéricas mediante la herramienta de elementos finitos basada en formulación de flujo DEFORM-3D®. Los resultados muestran la evidencia experimental de un aumento de conformabilidad en SPIF por encima del FFL convencional para este tipo de materiales, así como la necesidad de calibrar las simulaciones numéricas de estos procesos de conformado incremental haciendo uso de los datos experimentales de los correspondientes ensayos de SPIF.

Palabras clave: Conformado de chapa, conformado incremental de chapa (ISF), conformado incremental mono-punto (SPIF), conformabilidad, fractura.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de conformado incremental de chapa metálica (*ISF – incremental sheet forming*) surgieron en la década de los 60 del siglo pasado a partir de los trabajos pioneros expresados en forma de patente de Leszak [1] y de Berghahn y Murray [2]. Sin embargo, no es hasta bien entrada la década de los 90 que los procesos de ISF, y en especial su variante mono-punto (*SPIF – single point incremental forming*), comienzan a acaparar el interés de la comunidad científica de procesos de conformado, así como de las industrias afines, especialmente en Japón [3-5]. De manera básica, el proceso de SPIF consiste en un conformado plástico sin matriz en el que la chapa se encuentra anclada a una estructura en su periferia y una herramienta, en general con punta hemisférica, la va deformando de manera local y progresiva siguiendo unas trayectorias que comprenden la geometría final de la pieza a fabricar. La Figura 1 muestra un esquema del proceso de SPIF incluyendo los parámetros más relevantes así como una estructura para ensayos experimentales o *setup*.

Coincidiendo con el inicio del siglo XXI, la investigación en conformado incremental comienza a centrarse en uno de los beneficios claves del SPIF, así como del ISF en general, que consiste en el aumento de conformabilidad de la chapa por encima de los límites de conformado convencionales dentro de los diagramas límite de conformado (*FLD – Forming limit diagram*). En efecto, los trabajos pioneros de Kim y Yang en el 2000 [6] analizan las capacidades del proceso de SPIF en términos de niveles de deformaciones para diferentes geometrías, observándose que las deformaciones que se alcanzan se encuentran notablemente por encima de la curva de fallo convencional por estricción, o curva

límite de conformado (*FLC – Forming limit curve*). Más tarde, los estudios de Kim y Park [7] identifican que el límite de conformabilidad en SPIF, que denominan “*FLC en conformado incremental*”, tiene forma de línea recta de pendiente -1 en el primer cuadrante del espacio de deformaciones principales. Además, en [7] se hace patente cómo ese límite de conformado en SPIF muestra una sensibilidad a determinados parámetros de proceso (radio de herramienta, profundidad por pasada, giro de la herramienta, etc.). Otros trabajos contemporáneos con perspectivas experimentales y/o numéricas llegan a conclusiones similares, quedando toda esta impronta recogida en el artículo de revisión de Jeswiet et al. [8] en 2005.

No obstante, no es hasta los trabajos pioneros de Silva y coautores [9,10] desde 2008 que se establece un vínculo entre el límite de conformado en SPIF y la mecánica de la fractura. En estos trabajos se plantea un modelo analítico basado en tensiones de membrana para evaluar los estados de tensión/deformación de una chapa delgada deformada por SPIF y se hace además uso del trabajo de Atkins [11] para adaptar el criterio de fractura dúctil basado en el crecimiento de huecos de McClintock [12], poniendo de manifiesto que el hasta entonces denominado límite de conformado en SPIF consistía en el límite de fractura (*FFL – Fracture forming limit*) en modo I, correspondiente a tracción en el plano, del material según la mecánica de la fractura. Estas hipótesis fueron validadas experimentalmente con una amplia batería de ensayos, en especial para chapa de AA1050-H111 de 1 mm de espesor, realizándose además modelos numéricos que permitían predecir el fallo del material en base al daño acumulado según el criterio de fractura antes citado. Esta visión ha sido ampliada en los últimos años para incluir el fallo según el modo II de la mecánica de la fractura, correspondiente a una cortadura en el plano, que estaría definido por el límite de fractura a cortante en el plano de la chapa (*SFFL – Shear fracture forming limit*), estableciéndose así una perspectiva global del fallo en procesos de ISF [13].

A este respecto, existió en los albores de esta década dentro de la comunidad científica de conformado de chapa una discusión en relación a cuáles eran los mecanismos que permitían en chapa dúctil el aumento de conformabilidad en SPIF/ISF por encima del FLC permitiendo que se alcanzara el límite de fractura o FFL, considerándose como parámetros que podían influir en dicho aumento el efecto de la flexión bajo tracción, el efecto de la cortadura,

las concentradas tensiones de contacto o la propia carga cíclica bajo la que se deforma el material, entre otros, como se pone de manifiesto en la revisión crítica de Emmens y van den Boogaard [14]. Aunque ciertos trabajos plantearon que la deformación por encima del FLC era debido al efecto de la cortadura en SPIF [15], hoy en día es ampliamente aceptado que el fallo en conformado incremental de chapa para el rango óptimo de parámetros de proceso está controlado por tensiones de tracción en el plano y limitado por el FFL del material [13]. En este sentido, los autores han evidenciado que no todo el aumento de conformabilidad en SPIF está asociado al efecto de la flexión localizada inducida por el radio de la herramienta [16], sino que es consecuencia de la menor triaxialidad acumulada en ISF con respecto a procesos convencionales [17,18].

Por el contrario, en el caso de materiales poco dúctiles la chapa presenta un fallo que puede acontecer por fractura dúctil en ausencia de estricción localizada. Esto se ha puesto en evidencia por los autores para el caso de chapa de AA2024-T3, tanto para ensayos convencionales, bien sean Nakazima, de tracción biaxial mediante ensayos tipo Erichsen [19] o de estirado con flexión (*Stretch-bending*) con punzones cilíndricos [20], así como para ensayos de ISF [21]. En este sentido, la chapa de 2024-T3 es un material poco dúctil que se emplea de forma intensiva en la industria aeronáutica para la fabricación de revestimientos de aeronaves. Dado el uso en este sector, resulta de enorme importancia el estudio de los límites de conformado de este material en distintos procesos, así como el análisis del posible aumento de conformabilidad que pudiera alcanzarse en conformado incremental de forma análoga a como sucede en materiales dúctiles.

En este contexto, este artículo pretende evaluar la conformabilidad global de chapa de AA2024-T3 de espesor inicial t_0 de 1.2 mm. Para ello se realiza en el apartado 2 una caracterización experimental del comportamiento plástico de la chapa que incluye ensayos Nakazima con diámetro de herramienta 100 mm sobre diferentes geometrías, de estirado con flexión mediante punzones cilíndricos de diferentes diámetros así como ensayos de conformado incremental mono-punto para evaluar el posible aumento de conformabilidad de la chapa. Asimismo se presenta en el apartado 3 un modelo numérico del proceso de SPIF que sirve como apoyo al análisis crítico del efecto del conformado incremental en las deformaciones límite. Los resultados alcanzados, discutidos

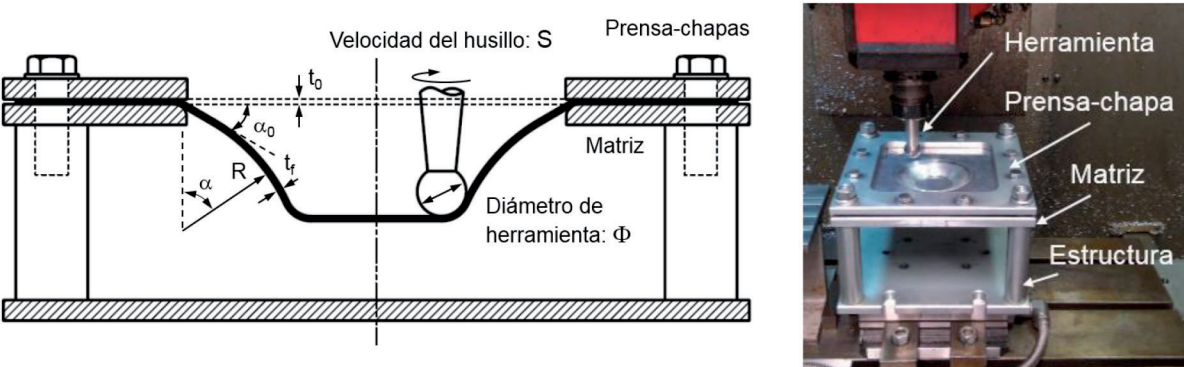


Figura 1: Esquema del proceso de SPIF (izquierda) y setup experimental (derecha)

Límite elástico σ_Y (MPa)	Resistencia a 0° UTS (MPa)	Módulo de elasticidad E (GPa)	Coefficiente de Poisson ν	Coefficientes de Lankford $r_{0^\circ-45^\circ-90^\circ}$
335	526	66.7	0.33	0.84-1.00-0.77

Tabla I: Propiedades mecánicas de la chapa de AA2024-T3

en el apartado 4, demuestran un aumento de conformabilidad en SPIF por encima del FFL convencional para la chapa de AA2024-T3 considerada, y ponen de manifiesto la necesidad de calibrar las simulaciones para procesos de conformado incremental haciendo uso de los datos experimentales de deformaciones de fractura correspondientes a ensayos de SPIF.

2. EXPERIMENTACIÓN

En este apartado se presenta el procedimiento y los métodos empleados para la realización de la parte experimental incluida en este estudio, incluyendo un primer apartado en relación a la caracterización mecánica de la chapa considerada, un segundo apartado en el que se expone la metodología de obtención del FLD del material y un tercer apartado en el que se presenta el plan de experimentos realizado en conformado incremental y las herramientas utilizadas para su análisis.

2.1. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA CHAPA

El material empleado en este trabajo es chapa de aleación de aluminio AA2024-T3 de 1.2 mm de espesor. Las propiedades mecánicas de este material que se muestran en la Tabla I y que incluyen los coeficientes de anisotropía o coeficientes de *Lankford*, que se han obtenido experimentalmente a partir de ensayos de tracción realizados a 0°, 45° y 90° respecto a la dirección de laminación de la chapa.

Por otro lado, la ley de comportamiento del material puede aproximarse mediante la siguiente ley de Swift obtenida a 0° respecto de la dirección de laminación según muestra la Ecuación (1):

$$\bar{\sigma} = 814.04(0.025 + \bar{\epsilon}^p)^{0.245} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

que expresa la relación entre deformación plástica equivalente $\bar{\epsilon}^p$ y tensión equivalente $\bar{\sigma}$.

2.2. OBTENCIÓN DEL FLD

La obtención del diagrama límite de conformado de la chapa de AA2024-T3 de 1.2 mm de espesor considerada se lleva a cabo mediante la realización de ensayos Nakazima con diferentes geometrías de probeta que permiten cubrir estados de deformación en el espacio de las deformaciones principales desde la tracción

uniaxial correspondiente a $\beta = -0.5$ hasta deformación equi-biaxial ($\beta = 1$), estando β definido por la relación entre deformaciones principales mínima y máxima en el plano de la chapa ($\beta = d\epsilon_2 / d\epsilon_1$). Los ensayos se llevan a cabo en una máquina universal para ensayos de chapa modelo Erichsen® 142-20 (ver Figura 2, izquierda), realizándose dichos ensayos según marca la norma ISO 12004-2:2008 [22].

La evolución de los caminos de deformación de los puntos con mayor nivel de deformaciones principales se realiza hasta el fotograma anterior al fallo usando la información adquirida mediante el sistema ARAMIS® de correlación digital de imágenes (*DIC – Digital Image Correlation*), como puede observarse en la Figura 2 (derecha) que se corresponde con el fotograma anterior y posterior al fallo respectivamente. Usando esta información se utilizan distintos métodos para evaluar si ha acontecido estricción durante el proceso de deformación. Tanto el uso de la metodología de evaluación de estricción (*necking*) propuesta en la norma [22] como el uso de recientes métodos desarrollados por los autores [23] indican que el fallo se alcanza mediante fractura dúctil en ausencia de estricción para todos los casos analizados, como también se puede observar de la imagen al microscopio del perfil de la zona de fractura (Figura 2, derecha y abajo).

Una vez alcanzada la fractura, se analiza la evolución de las deformaciones en la zona donde se inicia el fallo obteniéndose la deformación de fractura siguiendo una metodología consistente en la medida de los espesores de fractura que permiten la obtención de una deformación promedio en el espesor $\bar{\epsilon}_{3,f}$. De esta forma, la deformación principal máxima de fractura se obtiene mediante conservación de volumen a través de la expresión:

$$\bar{\epsilon}_{1,f} = \frac{-\bar{\epsilon}_{3,f}}{(1 + \beta^*)} \quad (2)$$

donde $\beta^* = d\epsilon_2 / d\epsilon_1$ es la relación local de deformaciones obtenida a partir de las últimas imágenes analizadas con ARAMIS® previas al fallo. Este procedimiento se completa cortando las probetas ensayadas perpendicularmente a la grieta y midiendo t_f desde una vista de perfil (Figura 2), lo que permite validar las mediciones de espesor a lo largo de la zona de fractura que se han indicado anteriormente. Este procedimiento de evaluación de deformaciones de fractura se ha llevado a cabo por parte de los autores de manera exitosa en trabajos anteriores [16,17] en relación a materiales dúctiles.

La Figura 3 muestra el diagrama FLD resultante de la realización de ensayos tipo Nakazima a lo largo de 4 caminos distintos de deformación, en cada caso hasta el último fotograma anterior al fallo para el punto en el que dicho fallo se inicia. Siguiendo el procedimiento descrito se evalúan para cada caso las deformaciones principales de fractura a través de las mediciones al microscopio y aplicando la Ecuación 2, obteniéndose la línea de fractura o FFL. Cabe destacar que se realizaron 3 ensayos en cada caso para garantizar la repetitividad de los resultados. Nótese que los triángulos huecos representan el último punto proporcionado por ARAMIS® mientras que los símbolos sólidos se corresponden con deformaciones de fractura obtenidas a partir de espesores evaluados al microscopio. Como se puede observar el diagrama límite de conformado o FLD para este material está formado únicamente por el límite de fractura en modo I o FFL. No es posible la representación de la FLC dado que el material no presenta estricción localizada. Dicha ausencia de estricción puede verse claramente en la fractografía mostrada en la Figura 3. Este hecho de ausencia

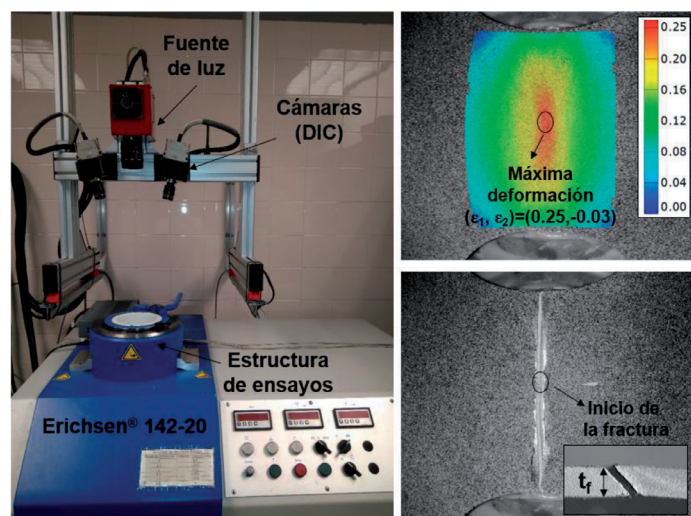


Figura 2: Máquina universal de ensayos de chapa (izquierda) y evaluación de deformaciones de fractura mediante DIC usando ARAMIS® y evaluación de espesor de fractura mediante microscopía óptica (derecha)

Diámetro de herramienta ϕ (mm)	Penetración por pasada Δz (mm/pasada)	Profundidad de la herramienta en la fractura (mm)
20	0.2	13.4 / 13.4 / 13.4
20	0.5	13.5 / 14.0 / 13.5
10	0.2	14.4 / 13.8 / 13.8
10	0.5	14.5 / 14.0 / 14.0

Tabla II: Ensayos de conformado incremental

de estricción diferencia el comportamiento del material analizado en relación a las chapas de alta ductilidad comúnmente utilizadas en conformado incremental (caso de aleaciones de aluminio como AA1050-H111 [8] o AA7075-O [18] y aceros como el AISI304-H111 [16]), lo que justifica el interés del estudio de la conformabilidad de la chapa de AA2024-T3 deformada mediante SPIF.

Por otro lado, la realización de ensayos de tracción-flexión con punzones de 20 y 10 mm sobre una geometría de probeta idéntica a la Nakazima correspondiente al segundo camino (de izquierda a derecha) considerado, permite comprobar la influencia de la flexión localizada en el nivel de deformaciones principales de fractura. Como puede observarse, aunque el uso de un punzón cilíndrico de 20 mm produce niveles de deformaciones principales de fractura en el plano de la chapa prácticamente coincidentes con el *límite de fractura*, en el caso de punzón de 10 mm de diámetro se produce un aumento del nivel de deformación principal máxima de fractura que puede cuantificarse en torno al 10%.

2.3. PLAN DE ENSAYOS Y EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES EN SPIF

Para poder evaluar el posible incremento de conformabilidad en SPIF se realizan una serie de ensayos de conformado incremental mono-punto haciendo uso de herramientas de 20 y 10 mm de diámetro respectivamente. Los ensayos se realizan sin velocidad de giro del husillo y utilizando lubricante para conformado de chapa metálica. Se consideran dos valores de penetración por pasada, 0.2 y 0.5 mm/pasada respectivamente. Todos los ensayos de SPIF se realizan hasta que se produce la fractura en el material siguiendo una trayectoria de cono truncado ajustado a las dimensiones de la estructura (para más información acerca de las geometrías

de ensayo consultar publicaciones previas [16,17]). Como puede identificarse en la Tabla II, el resultado de los ensayos en términos de profundidad de herramienta alcanzada varía poco en función de los parámetros de proceso, siendo levemente superior la profundidad final en el caso de herramienta de 10 mm de diámetro, aunque para un análisis más exhaustivo de la conformabilidad de la chapa habrá que evaluar las deformaciones principales alcanzadas en cada uno de los casos. Por otro lado, la variación de la penetración por pasada entre 0.2 y 0.5 milímetros parece tener poca influencia en la profundidad de la herramienta en la fractura.

Para el análisis de las deformaciones principales alcanzadas en los ensayos de SPIF se utiliza el sistema ARGUS® basado en la medición automática de patrones de puntos deformados. El patrón de punto se acomete mediante un sistema de electro-marcado previo a la realización del ensayo, teniendo la matriz de puntos una distancia de 2 mm entre centros y los puntos un diámetro de 1 mm. En la Figura 4 se muestra la distribución de deformaciones principales alcanzada por la probeta medida con ARGUS® para un ensayo realizado con herramienta de 20 mm de diámetro y 0.2 mm de penetración por pasada. Como puede observarse, el nivel de deformaciones aumenta dentro del primer cuadrante del espacio de las deformaciones principales a lo largo del cono truncado en un estado próximo a deformación plana desde la zona de la chapa indeformada hacia la zona con máximo nivel de deformaciones, cercana al domo. A partir de esta zona de mayor nivel de deformaciones (puntos en rojo en la Figura 4), estas disminuyen a un nivel ligeramente inferior de deformación mínima en el plano de la chapa hasta la zona indeformada del domo de la probeta de ensayo.

Siguiendo este procedimiento de medida con ARGUS® se obtienen las distribuciones de deformaciones principales para los distintos ensayos de SPIF que se muestran en la Tabla II. Como es de esperar de los resultados de dicha tabla, las distribuciones de todos estos casos son similares, alcanzándose niveles de deformaciones levemente superiores en el caso de herramienta de 10 mm

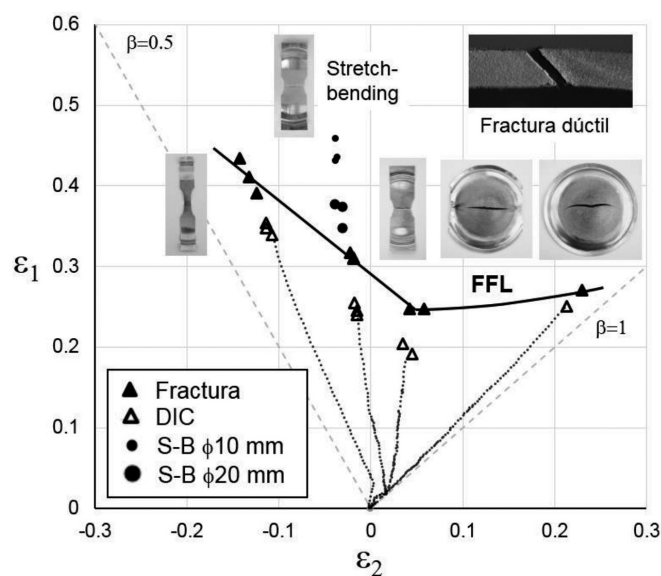


Figura 3: Diagrama límite de conformado (FLD) de la chapa de AA2024-T3 de 1.2 mm de espesor

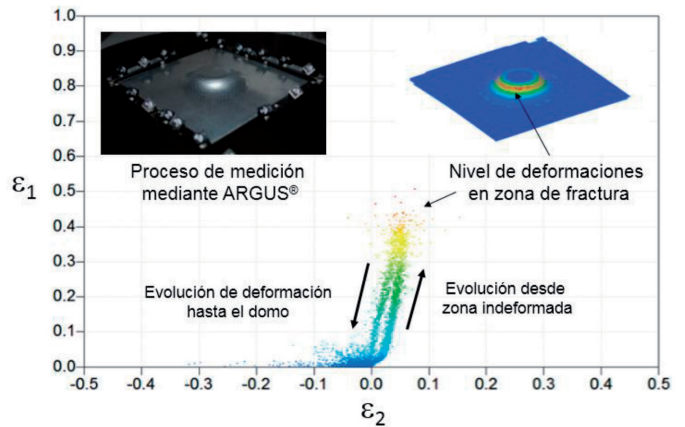


Figura 4: Distribución de deformaciones principales en probeta deformada mediante SPIF con herramienta de 20 mm de diámetro y penetración por pasada de 0.2 mm

de diámetro. Por último, el procedimiento para la evaluación de las deformaciones de fractura en SPIF es similar al expuesto en el apartado 2.2 para ensayos convencionales (ver procedimiento en [16,17]).

3. MODELADO NUMÉRICO

En este apartado se presenta el modelo numérico realizado en DEFORM™-3D con objeto de analizar virtualmente el proceso de SPIF realizado sobre la chapa de AA2024-T3 de 1.2 mm de espesor. DEFORM™-3D es un programa comercial de elementos finitos basado en formulación de flujo y de método implícito, que se utiliza tanto en procesos de conformado volumétrico de metales [24] como de conformado de chapa [17,25], así como para la simulación de procesos de mecanizado [26]. En este caso, el modelo se utilizará para evaluar los caminos de deformación hasta la fractura que se producen en SPIF para el AA2024-T3 y como herramienta de predicción del fallo en dicho proceso.

El modelo numérico está construido en base a elementos tetraédricos, teniendo la malla inicial 60.000 aproximadamente. Como puede observarse en la Figura 5, se consideran tres zonas de mallado con disposición circular, correspondiendo la zona intermedia a la zona de contacto de la chapa con la herramienta y donde se produce por tanto mayor deformación, por lo que se lleva a cabo un alto refinamiento en relación al tamaño de los elementos. Además, la simulación se realiza con remallado automático, permitiendo que el programa adapte el tamaño de la malla en las zonas donde se producen mayores niveles de deformación. El punzón o herramienta se define como elemento rígido analítico y sigue la trayectoria real de la herramienta en los experimentos. Los elementos de la chapa que se encuentran en el área que define el apriete del prensa-chapas contra la matriz se encuentran empujados, teniendo sus desplazamientos restringidos.

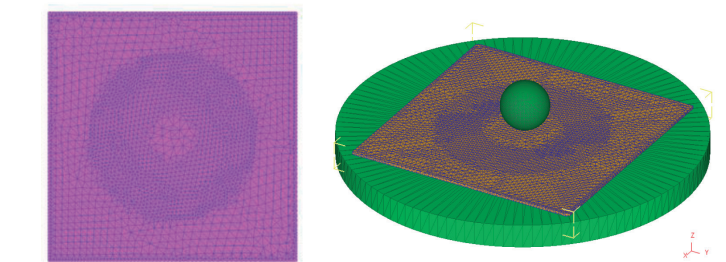


Figura 5: Mallado de las distintas zonas de la chapa (izquierda) y modelo incluyendo matriz y herramienta (derecha)

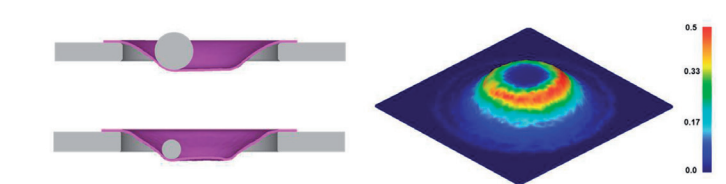


Figura 6: Geometría deformada obtenida en DEFORM™-3D para ensayo de SPIF con diámetros de herramienta $\phi 20$ y $\phi 10$ mm respectivamente (izquierda) y distribución de deformación principal máxima en el caso de $\phi 20$ mm (derecha)

La definición del material en el modelo numérico se realiza bajo la asunción de un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento cinemático siguiendo la ley de Swift presentada en la sección 2.1. Teniendo en cuenta el elevado coste computacional del modelo y dado el efecto despreciable sobre las deformaciones límite que implica una leve variación de la profundidad por pasada dentro de los rangos establecidos [16,17], se fija esta en 0.5 mm/pasada con el objetivo de reducir los pasos de simulación. Los distintos casos objeto de estudio se simulan hasta las profundidades finales mostradas en la sección 2.3 en la Tabla 2, correspondientes a la fractura del material.

La Figura 6 muestra la sección de la geometría en el momento correspondiente al fallo (profundidad final de herramienta en el instante de fractura Δz_f mostrada en la Tabla II) obtenida en las simulaciones numéricas para ensayos de SPIF con diámetros de herramienta $\phi 20$ mm y $\phi 10$ mm respectivamente, así como la distribución de deformación principal máxima en el caso de $\phi 20$ mm que alcanza en este caso un valor máximo de 0.661 (ver Figura 6, derecha)

Por último, cabe destacar que para una simulación típica como las mostradas en la Figura 6 que incluyen remallado automático, el tiempo promedio de cálculo de la unidad central de proceso (CPU) es de aproximadamente 40 horas usando un ordenador con procesador Intel i7-6500U CPU (2.60 GHz) con sus 4 núcleos en paralelo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en los ensayos de SPIF en términos de deformaciones principales alcanzadas dentro del diagrama límite de conformado o FLD de la chapa de AA2024-T3, caracterizado como se ha expuesto anteriormente a través del límite de fractura o FFL dado que el material no presenta estricción en ninguno de los ensayos realizados. Así mismo se evalúan frente a estos resultados experimentales los proporcionados por el modelo numérico realizado en DEFORM™-3D para los dos diámetros considerados (20 y 10 mm respectivamente) y se discute el procedimiento a seguir para una correcta predicción de fallo en SPIF haciendo uso de programas de elementos finitos.

En este sentido, la Figura 7 muestra las deformaciones principales experimentales que establecen la conformabilidad y el fallo por fractura dentro del FLD de la chapa de AA2024-T3 para ensayos de SPIF con herramienta de 20 mm (izquierda) y 10 mm (derecha), habiéndose evaluado dichas deformaciones usando ARGUS® y obteniéndose posteriormente los puntos de fractura mediante medición al microscopio según se explica en la sección 2. Por un lado, en ambos casos (20 y 10 mm de diámetro de herramienta en SPIF), las validación del modelo numérico de elementos finitos es evidente en términos de deformaciones principales, prediciendo dichos modelos de manera precisa las deformaciones límite en simulaciones realizadas hasta la profundidad de fractura experimental promedio en cada caso. En efecto, la validación de modelos numéricos en SPIF (para este y para otros materiales [27]) es fundamental para el análisis de los estados de tensión/deformaciones que producen el fallo de la chapa. Por otro lado, el aumento

Diámetro de herramienta ϕ (mm)	Daño crítico (según FFL)	Daño crítico según ecuación (4)	Daño acumulado (3) (modelo numérico)
20	0.28	0.33	0.36
10		0.38	0.39

Tabla II: Daño crítico calibrado en el FFL y en SPIF versus predicción del modelo numérico a la profundidad de fallo

de conformabilidad por encima del FFL convencional debido a la flexión localizada en *stretch-bending* es pequeña (casi inexistente en el caso de herramienta de diámetro 20 mm), mientras que los estados de deformación producidos en SPIF permiten alcanzar deformaciones muy por encima del conformado convencional de en torno al doble en términos de deformación principal máxima en el plano de la chapa en un estado cercano a deformación plana. Por ello, al igual que ocurre en materiales dúctiles, en los que el conformado convencional está limitado por estricción (FLC) y el conformado incremental por fractura (FFL), para los materiales que no presentan estricción como es el caso del AA2024-T3, el incremento de conformabilidad (en este caso por encima del FFL) tampoco se puede deber únicamente a la flexión [16] inducida, caracterizada por el valor de la relación entre el espesor inicial de la chapa y el radio de la herramienta (parámetro t_0/R). Estos resultados en relación a la flexión inducida a través del parámetro t_0/R permiten cuantificar para distintos materiales la influencia de la flexión en el aumento de conformabilidad en SPIF que resulta en una mayor reducción de espesor antes del fallo [28,29].

Cabe destacar la importancia de que el proceso de SPIF permita alcanzar deformaciones muy por encima del límite de fractura convencional. En este sentido, trabajos recientes [13] han puesto de manifiesto que el límite de fractura definido por el FFL no debería verse afectado por el proceso de conformado para un estado de deformaciones determinado. Sin embargo, en un trabajo muy reciente de los autores [18] centrado en el estudio de bridas deformadas en SPIF mediante análisis en el espacio de la triaxialidad (relación entre tensión media y tensión equivalente) pone de manifiesto que los estados de triaxialidad promedio en que se producen los procesos incrementales tienen valores de triaxialidad sustancialmente menores que los convencionales, no correspondiendo con los esperados en el espacio de las deformaciones principales (FLD) que en el presente caso deberían corresponder a un estado cercano a deformación plana, con un nivel de triaxialidad que para este caso debería estar en torno a $1/\sqrt{3}$.

En relación con lo anterior, los trabajos de Atkins [11] desarrollan el criterio de McClintock [12] de fractura por crecimiento de huecos, que ha sido utilizado en SPIF [13] ligando la triaxialidad

acumulada con el daño por crecimiento de huecos, según la siguiente ecuación de daño acumulado:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

que relaciona el daño acumulado con la integral de la triaxialidad frente a deformación equivalente. La fractura se produce cuando se alcanza un determinado valor crítico, que suponiendo un criterio de plastificación de Hill 48 toma la expresión:

$$D_{crit} = \frac{(1+r)}{3} (\epsilon_{1f} + \epsilon_{2f}) \quad (4)$$

donde r es el coeficiente de anisotropía promedio y ϵ_{1f} y ϵ_{2f} son las deformaciones principales de fractura. Como se expone en [13], para este caso la integral de daño acumulado es independiente del camino de deformación. Otros criterios clásicos de fractura pueden verse analizados en [18] y [30] para operaciones de estirado y embutición, respectivamente.

En este sentido, la Tabla III muestra el valor del daño crítico obtenido para el nivel de deformaciones correspondiente al FFL así como en el instante de fractura experimental por SPIF obtenidos analíticamente con la Ecuación (4) y numéricamente a partir de la Ecuación (3). Queda así patente tanto en la Figura 7 como en la Tabla II que la calibración del daño crítico en SPIF debe realizarse haciendo uso de deformaciones de fractura en SPIF y no de las correspondientes al FFL en el citado estado de deformación plana, lo que daría lugar a errores significativos en la predicción del fallo por fractura, en especial en materiales con comportamiento similar a la chapa de AA2024-T3 analizada.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha evaluado de manera global el incremento de la conformabilidad y las deformaciones límite de chapa de AA2024-T3 en SPIF analizado frente a procesos de conformado convencional (ensayos Nakazima y *stretch-bending*), cuantificándose el aumento de conformabilidad de la chapa en conforma-

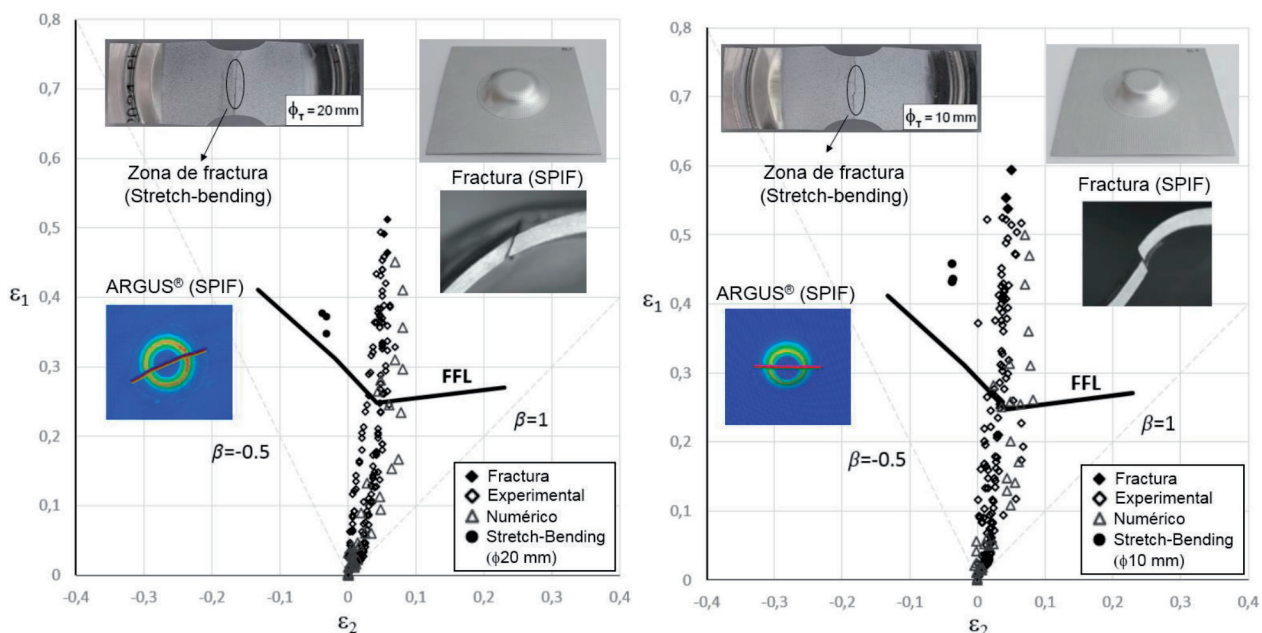


Figura 7: Evaluación de la conformabilidad y del fallo por fractura dentro del FLD del material para ensayos de SPIF con herramienta de 20 mm (izquierda) y 10 mm (derecha) de diámetro frente a deformaciones límite en *stretch-bending*

do incremental. Asimismo se ha realizado un modelo numérico del proceso de SPIF que sirve como soporte al análisis crítico del efecto de aumento de conformabilidad en relación a las deformaciones límite y al análisis en términos de triaxialidad del daño acumulado según el criterio de fractura por crecimiento de huecos de McClintock. En este contexto, las conclusiones particulares del estudio son:

- El fallo del AA2024-T3 se produce siempre por fractura dúctil en ausencia de estricción, tanto en el caso de conformado convencional (ensayos Nakazima y de *stretch-bending*) como en procesos de conformado incremental.
- En SPIF se produce un notable aumento de conformabilidad por encima del límite de fractura convencional, casi el doble de deformación real principal máxima en el plano de la chapa que en conformado convencional, lo que se explica debido a que los estados de deformación que se producen en SPIF no se corresponden con los esperados del FLD.
- Como ya ocurre en el caso de chapa dúctil, en la que el FLD se caracteriza a partir de los límites de estricción (FLC) y fractura (FFL), en el caso de aleaciones poco dúctiles que presentan fallo directo por fractura como el AA2024-T3 el incremento de conformabilidad en SPIF no puede explicarse únicamente por el efecto de la flexión localizada.
- Por último, se ha puesto de manifiesto la necesidad de calibrar las simulaciones numéricas en el proceso de SPIF haciendo uso de los datos experimentales de fractura correspondientes a dichos ensayos de conformado incremental para poder realizar una predicción adecuada del fallo por fractura en este tipo de materiales.

REFERENCIAS

- [1] Leszak E. "Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming". U.S. Patent 3,342,051, 19 September 1967.
- [2] Berghahn WG, Murray GF. "Method of Dieless forming Surfaces of Revolution". U.S. Patent 3,316,745, 2 May 1967.
- [3] Matsubara S. "Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool". Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity 1994. Vol. 35-406. p.1311-1316.
- [4] Kitazawa K, Wakabayashi A, Murata K, Seino J. "A CNC incremental sheet metal forming method for producing the shell components having sharp corners". Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity 1994. Vol. 35-406. p.1348-1353.
- [5] Iseki H, Kumon H. Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity 1994. Vol. 35-406. p. 1336-1341.
- [6] Kim TJ, Yang DY. "Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process". International Journal of Mechanical Sciences 2000, Vol. 42. p.1271-1286.
- [7] Kim YH, Park JJ. "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. Journal of Material Processing Technology 2002, Vol. 130-131, p.42-46.
- [8] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Duflou J, Allwood J. "Asymmetric SPIF of sheet metal". CIRP Annals 2005. Vol. 54-2, p.88-114.
- [9] Silva MB, Skjoedtb M, Martins PAF, Bay N. "Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis". International Journal of Machine Tools & Manufacture 2008. Vol. 48. p. 73-83.
- [10] Silva MB, Skjoedtb M, Atkins AG, Bay N, Martins PAF. "Single-point incremental forming and formability-failure diagrams". The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 2008. Vol. 43-1. p.15-35.
- [11] Atkins AG. "Fracture in forming". Journal of Material Processing Technology 1996. Vol. 56: p.09-18.
- [12] McClintock FA. "A criterion for ductile fracture by the growth of holes". Journal of Applied Mechanics 1968. Vol. 35. p.363-71.
- [13] Isik AK, Silva MB, Tekkaya AE, Martins PAF. "Formability limits by fracture in sheet metal forming". Journal of Material Processing Technology 2014. Vol. 214. p.1557-1565.

- [14] Emmens WC, Van den Boogaard AH. "An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming". Journal of Material Processing Technology 2009. Vol. 209. p.3688-95.
- [15] Jackson K, Allwood JM. "The mechanics of incremental sheet forming". Journal of Material Processing Technology 2009. Vol. 29. p.1158-74.
- [16] Centeno G, Bagudanch I, Martínez-Donaire AJ, García-Romeu ML, Vallengano C. "Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming". Materials & Design 2014. Vol. 63. p20-29.
- [17] Centeno G, Martínez-Donaire AJ, Bagudanch I, Morales-Palma D, García-Romeu ML, Vallengano C. "Revisiting Formability and Failure of AISI304 Sheets in SPIF: Experimental Approach and Numerical Validation". Metals 2017. Vol. 7. p531.
- [18] Martínez-Donaire AJ, Borrego M, Morales-Palma D, Centeno G, Vallengano C. "Analysis of the influence of stress triaxiality on formability of hole-flanging by single-stage SPIF". International Journal of Mechanical Sciences 2019. Vol. 151. p.76-84.
- [19] Vallengano C, Morales D, García-Lomas FJ. "A study to predict failure in biaxially stretched sheets of aluminum alloy 2024-T3". Materials and Manufacturing Processes 2008. Vol. 23-3. p.303-310.
- [20] Centeno G, Doblas FJ, Martínez-Palmeth LH, Martínez-Donaire AJ, Vallengano C. "FEA of the bending effect in the formability of metal sheets via incremental forming". Steel Research International 2012. Special Issue Metal Forming, pp. 447-450.
- [21] Centeno G, Martínez-Donaire AJ, Vallengano C, Martínez-Palmeth LH, Morales D, Suntaxi C, García-Lomas FJ. "Experimental study on the evaluation of necking and fracture strains in sheet metal forming processes". Procedia Engineering 2013. Vol. 63. p.650-658.
- [22] International Standard ISO 12004-2:2008. Metallic materials-sheet and strip determination of forming limit curves, Part 2: Determination of forming limit curves in the laboratory. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland; 2008.
- [23] Martínez-Donaire AJ, García-Lomas FJ, Vallengano C. "New approaches to detect the onset of localised necking in sheets under through-thickness strain gradients". Materials & Design 2014. Vol. 57. p.135-145.
- [24] Amigo FJ, Camacho AM. "Reduction of induced central damage in cold extrusion of dual-phase steel DP800 using double-pass dies". Metals 2017. Vol. 7. p.335.
- [25] Lee YS, Kwon YN, Kang SH, Kim SW, Lee JH. "Forming limit of AZ31 alloy sheet and strain rate on warm sheet metal forming". Journal of Material Processing Technology 2008. Vol. 201. p.431-435.
- [26] Arisoy YM, Guo C, Kaftanoglu B, Özel, T. "Investigations on microstructural changes in machining of Inconel 100 alloy using face turning experiments and 3D finite element simulations". International Journal of Mechanical Sciences 2016. Vol. 107. p.80-92.
- [27] Gómez-López LM, Miguel-Eguía V, Martínez-Martínez A, Coello-Sobrinho J, Manjabacas-Tendero MC. "Simulation and validation of incremental forming to ASTM B-265 titanium alloy sheet". Dyna 2015. Vol. 90-4. p.393-399.
- [28] Silva MB, Nielsen PS, Bay N, Martins PAF. "Failure mechanisms in single point incremental forming of metals. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2011. Vol. 56. p.893-903.
- [29] Soeiro JMC, Silva CMA, Silva MB, Martins PAF. "Revisiting the formability limits by fracture in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technologies 2015. Vol. 217. p.184-192.
- [30] Vallengano C, Erce JJ, García-Lomas FJ. "Predicción del fallo en el conformado plástico de chapa mediante criterios de fractura dúctil". Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica 2005, Vol. 9-2. p.101-111.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad a través de la ayuda DPI2015-64047-R. También se quiere agradecer a los profesores P.A.F. Martins y M.B. Silva del IDMEC de la Universidad de Lisboa así como a la profesora M.L. García-Romeu y la Dr. I. Bagudanch de la Universidad de Girona, por haber permitido el uso de su maquinaria e instalaciones para la realización de ensayos.