

PROYECTO FIN DE CARRERA

Análisis experimental y numérico del fallo en chapas conformadas de aluminio sometidas a tracción biaxial

Carlos Fernando Mellado Castellero

4 de septiembre de 2007

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción. Conformado de chapa por estirado

Una parte importante de la producción metálica industrial la compone la producción de láminas y chapas metálicas obtenidas por laminación, bien en frío o en caliente. Éstas son conformadas posteriormente para fabricar multitud de productos de uso cotidiano, como carrocerías de automóviles, fuselaje de aeronaves, revestimientos de electrodomésticos, elementos de construcción, latas de conservas y bebidas, etc, Fig. 1.1. Una de las características principales que hacen atractivos los productos fabricados mediante conformado de chapa es que presentan una buena resistencia mecánica, así como una excelente relación resistencia-peso([1])

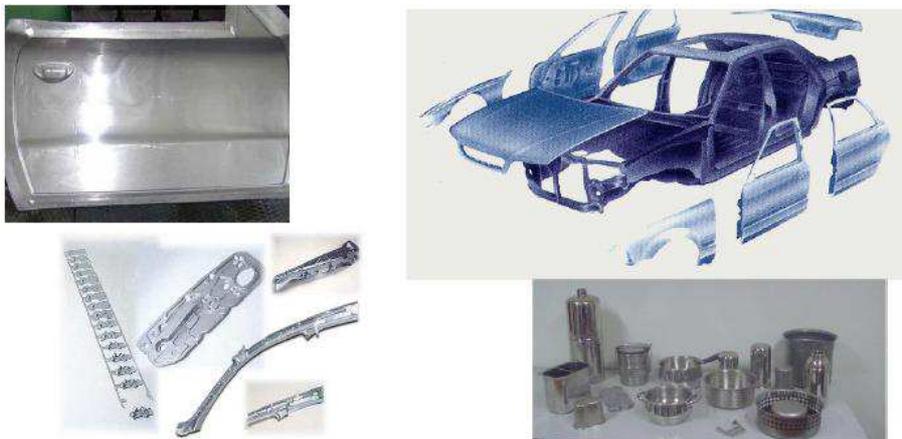


Figura 1.1: Componentes cotidianos obtenidos por conformado de chapa

La mayoría de los metales se funden en lingotes, planchas o palanquillas para posteriormente, por deformación plástica, obtener el producto final. Esto implicará que la forma de la pieza durante el proceso vaya cambiando sin afectar prácticamente al volumen y sin fundir el material, por lo que resultará necesario que el material sufra deformación plástica pero sin llegar a la fractura.

El conformado de chapa por estirado , *stretching*, es intensivamente usado en la

industria aeronáutica para el conformado de la chapa del fuselaje de las aeronaves , véase como ejemplo, la Fig. 1.2. La chapa se sujeta en sus extremos mediante mordazas, mientras que se enfrenta contra ella un punzón o útil de estirado, con la forma 'aproximada' que se quiere obtener en la chapa. Es este proceso el material se encuentra sometido a un estado fundamentalmente de tracción, haciendo que la chapa se conforme plásticamente estando todas las fibras del material alargadas. Este hecho hace que la recuperación elástica sea bastante pequeña, y por tanto, la precisión de la pieza final sea buena y controlable.



Figura 1.2: Obtención del revestimiento del fuselaje por estirado

Los procesos de conformado de chapa se basan fundamentalmente en resultados empíricos; esto implica un proceso de pruebas y reajustes, tanto más prolongado cuanto menor es la experiencia con la geometría y el material del componente en cuestión. Con el fin de asegurar el adecuado diseño del proceso es necesario determinar de manera fiable los límites de conformado del material, es decir, las condiciones para las que se iniciará la fractura de la chapa.

La introducción en el proceso de producción de nuevos materiales en consonancia con los requerimientos actuales implica, por tanto, periodos de experimentación; esto no siempre resulta compatible con la tendencia a la reducción de los tiempos de desarrollo.

El empleo de técnicas por ordenador en el conformado de metal se lleva empleando desde finales de los 70. La tendencia parece moverse hacia un mayor uso de esta tecnología pues permite reducir en gran medida las necesidades de experimentación.

Entre los métodos por ordenador más recientes para el estudio del conformado de metal destaca, por los resultados obtenidos, el Método de los Elementos Finitos (MEF).

En el presente estudio emplearemos un programa comercial para modelar y simular mediante el MEF un proceso de conformado de chapa, estirado, determinando los límites de conformado mediante el criterio de Tresca.

Adicionalmente se compararán los resultados analíticos con resultados experimentales obtenidos en el laboratorio para la aleación de aluminio 2024 – T3, y espesores 1,2 y 1,6mm.

1.1.1. Comportamiento plástico de la chapa

Para el estudio del conformado y, en general, de los procesos de fabricación que trabajan con lámina de metal, será necesario recordar ciertas expresiones de la teoría de la plasticidad y propiedades de los materiales de trabajo que vamos a utilizar, para poder aplicarlas posteriormente.

Comenzaremos estudiando la chapa isótropa, para dejar el estudio de la anisotropía en el apartado siguiente.

En la mayoría de los procesos de conformado de chapa, las tensiones que principalmente la deforman son las que actúan en el propio plano de la chapa (tensiones de membrana), mientras que la tensión en sentido del espesor suele ser cero o muy pequeña en comparación con éstas. Es por ello, que una simplificación bastante realista, es suponer que la chapa se deforma aproximadamente bajo un estado de tensión plana, simplificando las expresiones que modelan el comportamiento plástico de la chapa.

Así mismo se considerará que el proceso de deformación es un proceso monótono, i.e. no se considerarán descargas intermedias, y además proporcional, i.e. durante la deformación no variarán las direcciones principales de tensión y/o deformación.

Por último, como es habitual, se supondrá en primera aproximación que las deformaciones elásticas son despreciables en comparación con las deformaciones plásticas, considerándose los ejes de referencia que se muestran en la Fig. 1.3.

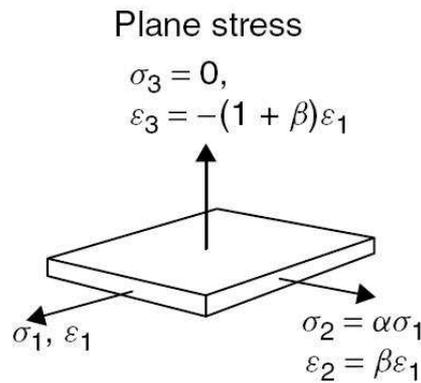


Figura 1.3: Ejes de referencia en una chapa bajo condiciones de Tensión Plana(TP)

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \approx d\varepsilon^p \quad (1.1)$$

Suponiendo un estado de TP las tensiones y los incrementos de deformación existentes son:

$$\begin{aligned}\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 &= 0 \\ d\varepsilon_1 : d\varepsilon_2 : d\varepsilon_3 &= -(d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2)\end{aligned}\quad (1.2)$$

Por convenio se supone que la dirección 1 es aquella en la que la tensión es mayor ($\sigma_1 > \sigma_2$). Es de notar que $d\varepsilon_3$ se obtiene imponiendo constancia de volumen durante la deformación, i.e. $d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0$.

Llamando α y β a las relaciones de las tensiones y deformaciones en el plano de la chapa, y dado el supuesto proceso monótono, las deformaciones pueden ser integradas directamente, quedando de la forma:

$$\varepsilon_1 : \varepsilon_2 : \varepsilon_3 = -(1 + \beta)\varepsilon_1 \quad (1.3)$$

donde

$$\varepsilon_i = \int_{l_{i0}}^{l_{if}} dl_i/l_i = \ln(l_{if}/l_{i0}) \quad (1.4)$$

siendo l_{i0} y l_{if} la longitud inicial y final en dirección i .

Para relacionar las tensiones y deformaciones se supone una regla del flujo plástico igual a la propuesta por Levy-Mises.

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_{eq}}{d\sigma_{eq}} s_{ij} \quad (1.5)$$

Particularizando esta ecuación para un estado de TP en la chapa, en ejes principales, se obtiene, una vez agrupados los términos:

$$\frac{d\varepsilon_1}{\sigma_1 - \frac{1}{2}\sigma_2} = \frac{d\varepsilon_2}{\sigma_2 - \frac{1}{2}\sigma_1} = \frac{d\varepsilon_3}{-\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_{eq}}{d\sigma_{eq}} \quad (1.6)$$

donde las expresiones de σ_{eq} y ε_{eq} son de la forma:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \sqrt{1 - \alpha + \alpha^2} \quad (1.7)$$

$$d\varepsilon_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} d\varepsilon_1 \sqrt{1 + \beta + \beta^2} \quad (1.8)$$

A partir de estas expresiones es posible obtener una relación entre los parámetros α y β .

$$\beta = \frac{2\alpha - 1}{2 - \alpha} \quad (1.9)$$

$$\alpha = \frac{2\beta + 1}{2 + \beta} \quad (1.10)$$

Por último, los esfuerzos principales por unidad de longitud en un punto de la chapa se definen como:

$$T_1 = \sigma_1 t \quad (1.11)$$

$$T_2 = \sigma_2 t = \alpha T_1 \quad (1.12)$$

siendo t el espesor de la chapa en el punto considerado, el cual se obtiene a partir de la definición de la deformación en el espesor ϵ_3 :

$$t = t_0 e^{\epsilon_3} = t_0 e^{1+\beta\epsilon_1} \quad (1.13)$$

donde t_0 es el espesor inicial de la chapa.

Anisotropía

Como se ha comentado anteriormente, la chapa se obtiene generalmente por laminación. La chapa obtenida por este proceso presenta una dirección preferencial clara que es la dirección de laminación, la cual se define inequívocamente las otras dos direcciones, transversal y normal. Esta direccionalidad hace que determinadas propiedades mecánicas, físicas y químicas dependan de la dirección del ensayo.

La anisotropía de la chapa se cuantifica generalmente a través de los denominados coeficientes de anisotropía plástica, r , obtenidos a partir de ensayos de tracción a 0° , 45° y 90° respecto a la dirección de laminación.

El coeficiente r se define como el cociente entre la deformación transversal (ϵ_w) y la deformación normal (ϵ_t).

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (1.14)$$

Es usual que en una chapa real coexistan tanto anisotropía normal como anisotropía en el plano. Para separar ambos tipos se definen dos parámetros promedios:

- \bar{r} , coeficiente de anisotropía plástica medio, que cuantifica el valor medio de la anisotropía normal.

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (1.15)$$

- Δr , que cuantifica la existencia de una anisotropía en el plano.

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (1.16)$$

Efectos de la anisotropía

La existencia de una anisotropía en el plano, ($\Delta r \neq 0$) provoca que la chapa se deforme de manera diferente dependiendo de la dirección que se tome. Este hecho se puede observar claramente en las piezas embutidas, Fig. 1.4, en las cuales debido a esta anisotropía aparecen unos bordes ondulados característicos, denominados orejetas, Fig. 1.5. Este fenómeno se conoce como *orejeteado*.

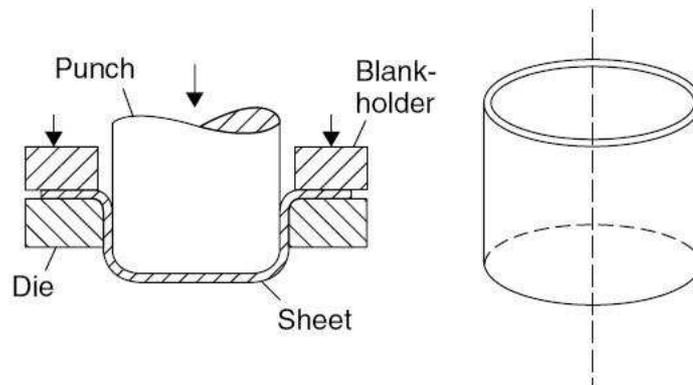


Figura 1.4: Embutición

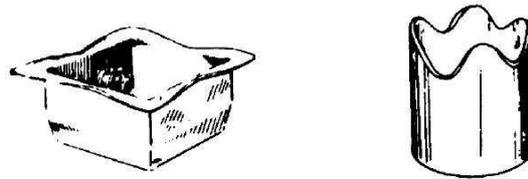


Figura 1.5: Defecto de orejeteado en dos piezas distintas debido a la anisotropía en el plano

La anisotropía normal ($r \neq 0$) influye directamente en la capacidad de la chapa a conformarse y en la tendencia al fallo de la misma. Un valor de $r > 1$ indica que la deformación normal que sufre la chapa es menor que su deformación transversal, tiene como efecto el retraso del fallo de la chapa, favoreciendo así su conformado.

La anisotropía normal modifica también la forma de la superficie de fluencia. Así un valor de r superior a la unidad alarga la elipse de fluencia en el diagrama $\sigma_1 - \sigma_2$ según su eje mayor y lo acorta ligeramente según su eje menor, como puede verse en la Fig. 1.6. Este efecto ocasiona que, dependiendo del estado tensional en que nos encontremos, la resistencia del material en dicho punto sea superior o inferior a la que se obtendría con un material isótropo.

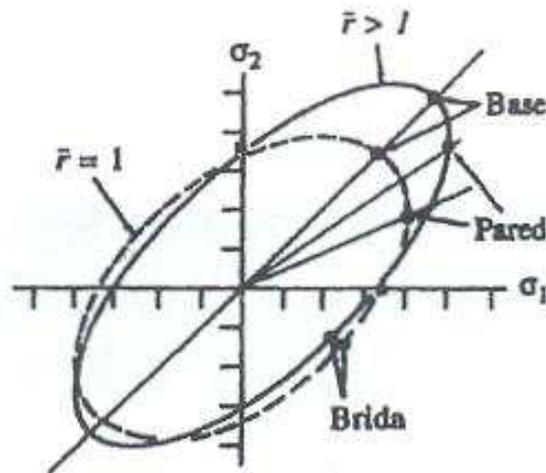


Figura 1.6: Efecto de la anisotropía normal

Inestabilidad y fallo de la chapa. Diagrama límite de conformado

Todo proceso de conformado está limitado por el 'fallo' de la chapa, entendiendo por ello cualquier evento que inutilice la pieza. Entre los más comunes están los siguientes:

- Inestabilidad global: Ocurre cuando la pieza no es capaz de soportar una determinada fuerza se deforma globalmente hasta que se produce la rotura del material. Un ejemplo típico es el fallo de la probeta en un ensayo de tracción.
- Inestabilidad localizada: Se produce por la aparición de una estricción localizada en una banda muy estrecha. Una vez que ésta aparece, se concentra de dicha región toda la deformación posterior del material, este fallo es muy común en materiales dúctiles.
- Fractura: Dependiendo de la ductilidad del material éste puede romper bien de manera dúctil o de forma frágil.
- Arrugamiento: Es uno de los fallos que aparecen bajo estados de compresión.

A continuación profundizaremos un poco más en el fallo por inestabilidad localizada, por ser el más común y, por tanto, uno de los que más nos limita los procesos de conformado de chapa.

Inestabilidad localizada

Durante el proceso de conformado de chapa y bajo ciertas circunstancias, se llega a un momento en que la deformación de la chapa se concentra a lo largo de una zona de ancho muy reducida. Dicha zona recibe el nombre de *estricción localizada*, siendo su ancho del orden del espesor de la chapa. Una vez que esta aparece, toda la deformación posterior de la chapa se produce en ella, mientras que el resto de la chapa no se deforma significativamente.

Experimentalmente se observan dos hechos importantes:

- La estricción localizada aparece cuando la fuerza principal máxima alcanza un valor máxima.
- En la zona de estricción, la deformación a lo largo de la misma es nula.

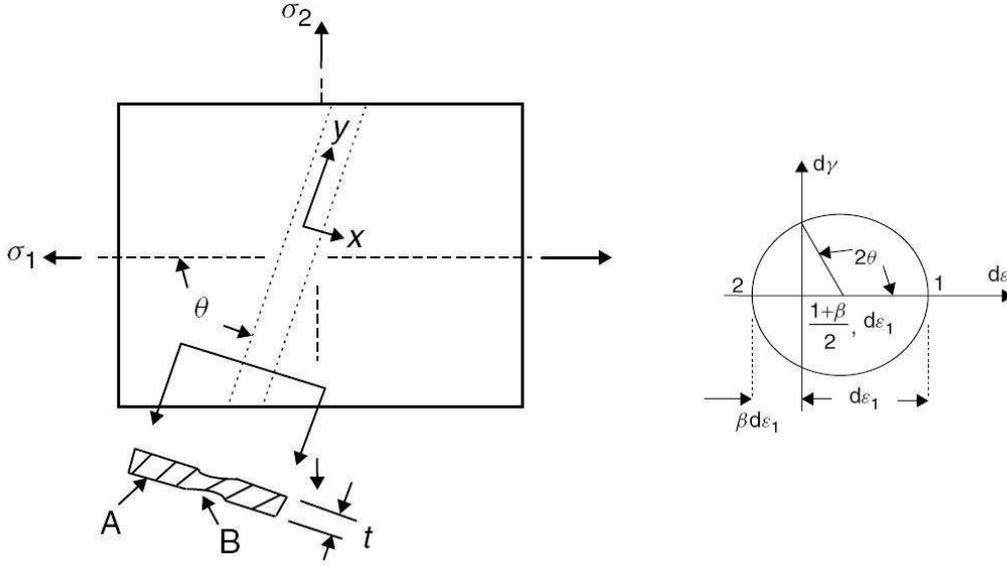


Figura 1.7: Estricción localizada y difusa en una chapa ensayada a tracción. La estricción se produce a un ángulo θ respecto a la dirección principal máxima

Las condiciones locales de deformación en esta zona son de deformación plana (DP), independientemente del estado global de deformación en el resto de la pieza.

Teniendo en cuenta lo anterior y suponiendo la condición de proceso monótono proporcional, la condición para que se produzca la estricción localizada se expresa:

$$dT_1 = 0 \rightarrow d(\sigma_1 t) = 0 \rightarrow \frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + \frac{dt}{t} = 0 \quad (1.17)$$

Debiéndose cumplir la condición de alargamiento, i.e $d\epsilon_{2'} = 0$, donde la condición $2'$ está orientada a lo largo de la estricción. La ecuación anterior, en términos de deformaciones, se tiene:

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = -\frac{dt}{t} = -d\epsilon_3 = (1 + \beta) d\epsilon_1 \rightarrow \frac{1}{\sigma_1} \frac{d\sigma_1}{d\epsilon_1} = 1 + \beta \quad (1.18)$$

Suponiendo una ley de comportamiento parabólica, $\sigma_{eq} = K\epsilon_{eq}^n$, y suponiendo las expresiones de σ_{eq} y $d\epsilon_{eq}$ la estricción localizada se produce cuando ϵ_1 alcanza un valor crítico de:

$$\epsilon_1^* = \frac{n}{1 + \beta} \quad (1.19)$$

Teniendo en cuenta que $\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$, se tiene que la condición para la inestabilidad localizada queda de la forma:

$$\epsilon_1^* + \epsilon_2^* = n \quad (1.20)$$

Diagrama Límite de Conformado(FLD, Forming Limit Diagram)

Si la condición de inestabilidad dada por la ecuación anterior se dibuja en el espacio de deformaciones principales, éste queda dividido en dos partes. Si un punto de la chapa se sitúa por debajo de la condición de inestabilidad, indica que la estricción localizada no se producirá, no fallando la chapa. Si por el contrario, el punto se sitúa por encima de dicha condición, significa que se habrán alcanzado las condiciones necesarias para la aparición de la inestabilidad, produciéndose por tanto el fallo de la chapa. Este gráfico en su conjunto recibe el nombre de Diagrama Límite de Conformado(FLD o Forming Limit Diagram).

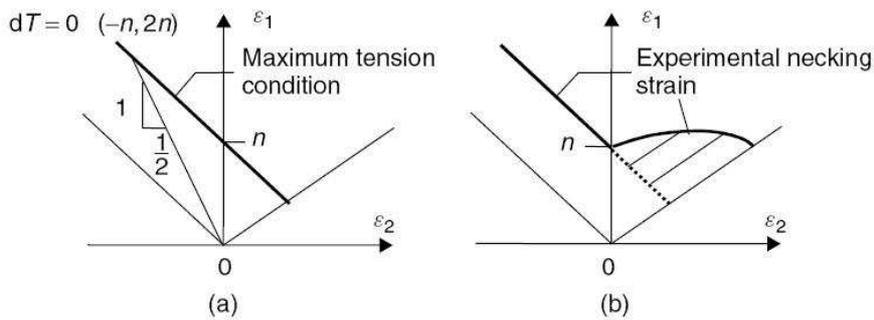


Figura 1.8: (a)FLD teórico.(b) Observación experimental.

La orientación de la estricción, respecto de la dirección de la deformación máxima, puede obtenerse fácilmente a partir de la condición de alargamiento nulo ($d\epsilon'_2 = 0$). Empleándose el círculo de Mohr en deformaciones, se obtiene fácilmente que el plano de alargamiento nulo forma un ángulo θ con la dirección principal 1 de valor:

$$\cos 2\theta = \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (1.21)$$

Este modelo presenta una clara limitación, sólo es válido para valores de β menores que cero. Si β es mayor que cero, implica que ambas deformaciones son positivas y, por tanto, no existe ninguna dirección con alargamiento nulo, como pudo observarse en la Fig. 1.8.

Según el modelo anterior no es obvio que aparezca una inestabilidad localizada en el rango de deformaciones biaxiales de tracción. No obstante, la evidencia experimental muestra lo contrario. En este rango, la estricción se inicia en defectos o imperfecciones preexistentes en el material.

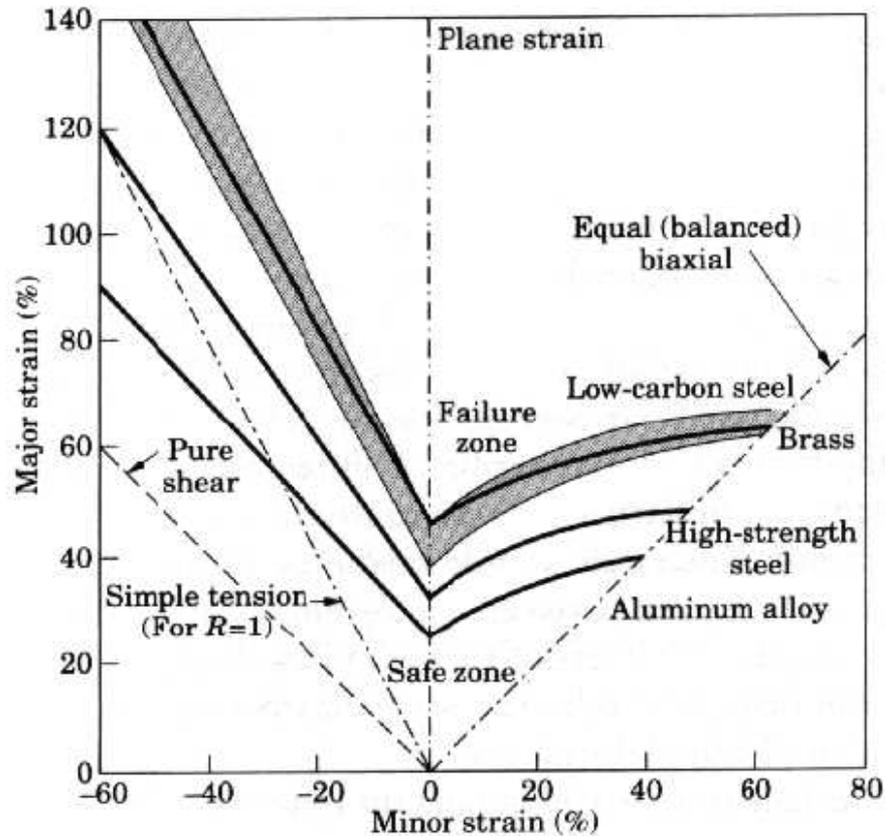


Figura 1.9: Evolución real del FLD para diferentes materiales en todo el rango de β

El FLD, desde que se introdujera en la década de los 60, se ha convertido en una de las herramientas más importantes para diagnosticar el fallo en procesos de conformado de chapa. Para ello, sólo se necesita evaluar las deformaciones sobre la pieza en concreto, lo cual se puede hacer mediante el método de la rejilla de círculo, Fig. 1.10, o mediante un proceso de videogrametría, como el que se comentará posteriormente en este trabajo. Los ensayos a realizar son muy parecidos al ensayo Erichsen. Consistiendo principalmente en deformar la chapa, Fig. 1.11, sujeta en sus extremos, con un punzón semiesférico bien lubricado.

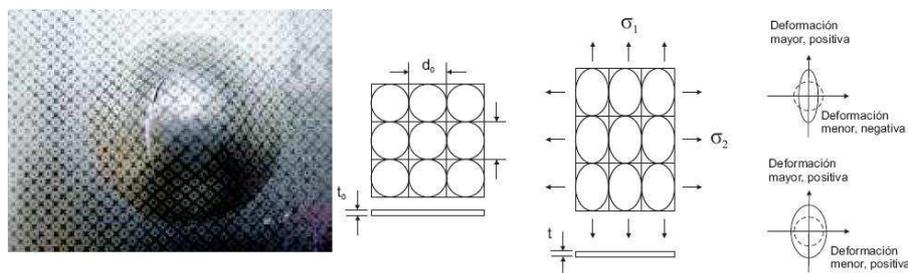


Figura 1.10: Deformación de la retícula de círculos

Durante el conformado de la chapa los círculos, obtenidos mediante marcado electroquímico, pasan a ser elipses, por lo que es posible determinar los valores máximo de las deformaciones principales experimentadas por la chapa.

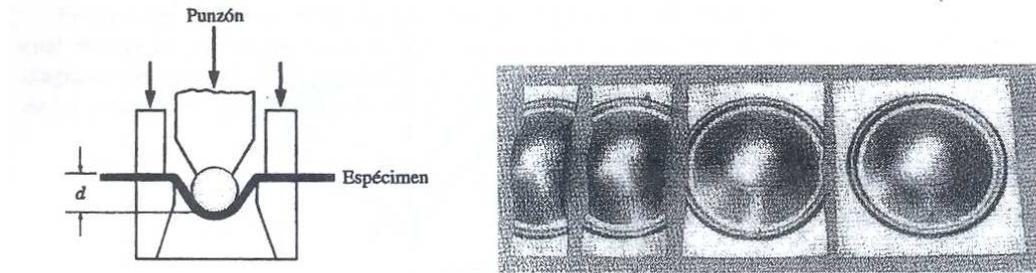


Figura 1.11: Esquema del ensayo y probetas para la determinación de los FLD

Hoy día se tiende a estimar numéricamente o analíticamente la forma del FLD.

Los FLD dependen del material y del espesor de la chapa. Algunos de los factores de influencia y sus efectos:

- Endurecimiento por deformación

Cómo puede verse en la Fig. 1.12, el FLD corta al eje principal de deformación en un valor igual a n . Ésto implica que un aumento de n supone reducir proporcionalmente las posibilidades de fallo.

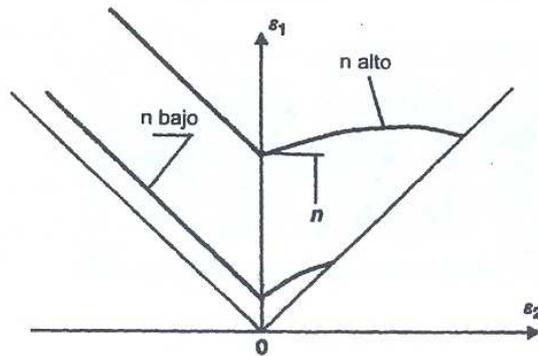


Figura 1.12: Efecto del endurecimiento en el FLD

- Velocidad de deformación

No influye en el comportamiento global del material. Pero si influye en el desarrollo de la estricción localizada. Un coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación, m , elevado hace que se retrase el desarrollo de la estricción, permitiendo que se alcance una mayor deformación en la lámina antes de producirse el desgarro.

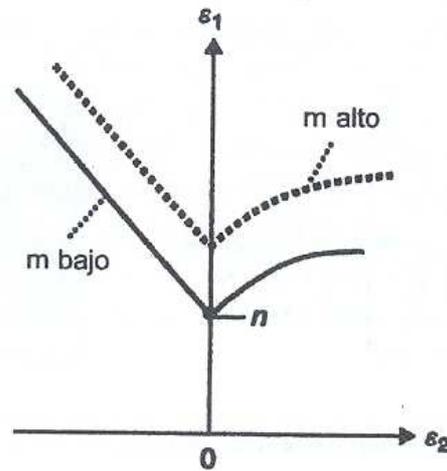


Figura 1.13: Efecto de la velocidad en el FLD

- Fractura dúctil.

La fractura dúctil produce una intensa concentración de la deformación según los planos de deformación principal máxima, hasta producirse la rotura del material. Para materiales con baja ductilidad, como son las aleaciones de aluminio, la fractura dúctil puede llegar a ocurrir en la zona de la estricción antes que se inicie la inestabilidad. Esto ocurre con mayor facilidad para estados próximos a los biaxiales de tracción, i.e. $\beta \approx 1$.

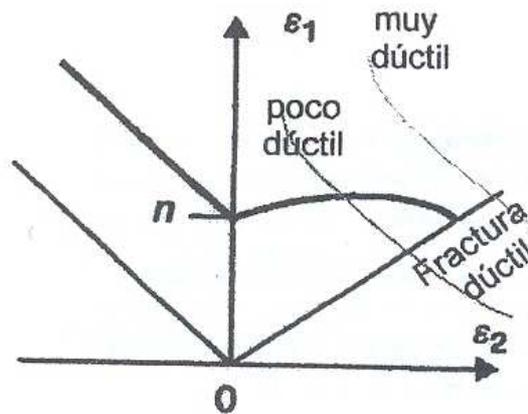


Figura 1.14: Efecto de la fractura dúctil en el DLC

- Imperfecciones

Dado que la estricción localizada se inicia con más facilidad en los defectos del material, cuanto mayor sea el número y/o tamaño de estas imperfecciones más baja se situará la curva del FLD.

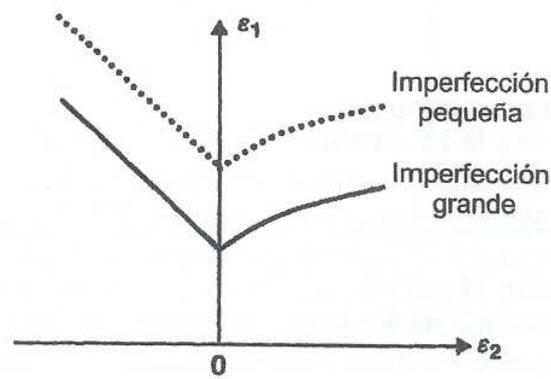


Figura 1.15: Efecto de las imperfecciones en el DLC

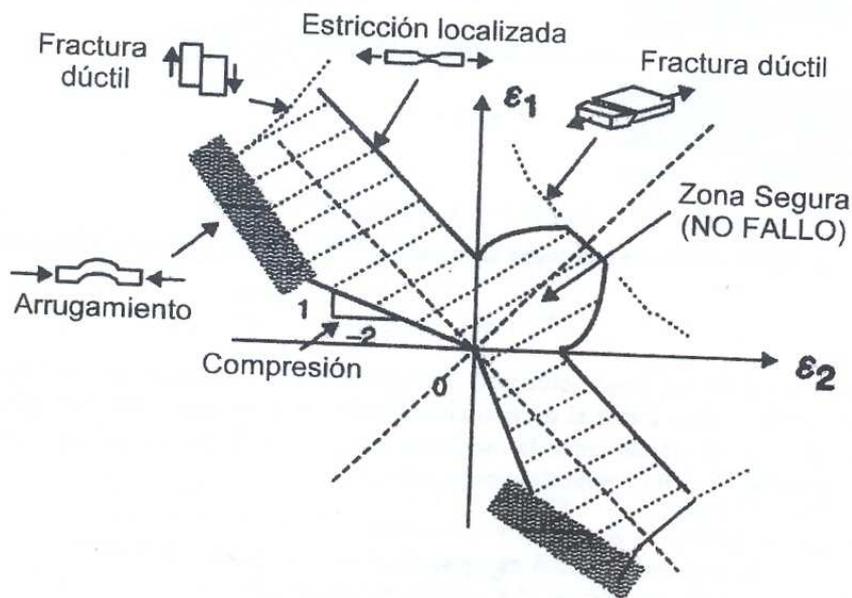


Figura 1.16: DLC completo incluyendo todos los posibles tipos de fallo

Finalmente, en la Fig. 1.16 se muestra un diagrama de conformado completo, el cual incluye los diferentes tipos de fallos comentados. Disponer de un diagrama de este tipo, bien de forma experimental o numérica es de gran interés para el análisis y optimización de los procesos de conformado de chapa.

1.2. Criterios de fractura dúctil

Una amplia gama de criterios de fractura dúctil están basados en el hecho de que el fallo es consecuencia de un proceso de acumulación de daño durante el proceso de deformación. Este daño se representa por una función que depende de la historia del proceso de deformación, quedando así el criterio expresado en términos de una integral

de dicha función, extendida sobre todo el proceso desde el comienzo de la deformación, hasta el instante en el que se alcanza la deformación de rotura. En general se establece que la fractura dúctil se produce cuando el máximo de dicha función supera un cierto valor crítico.

Los criterios considerados se pueden clasificar en dos grupos. El primer grupo lo forman aquellos criterios que están basados en reglas semi-empíricas, resultantes de la experimentación, como el criterio de Freudenthal o criterio del trabajo plástico (Eq. 1.22) que considera que la fractura se produce cuando el trabajo plástico acumulado a lo largo del proceso alcanza un determinado valor, Cockcroft y Latham, propusieron una modificación a dicho criterio, considerando que la fractura dúctil es producida por el trabajo plástico realizado por la tensión principal máxima (Eq. 1.23.) y el de Brozzo et al., en el que se introduce el efecto de la tensión hidrostática en el criterio como consecuencia de los resultados experimentales observados (Eq. 1.24).

El segundo tipo de criterios considerados tienen en cuenta el daño interno. Estos tratan de modelar el hecho experimental de que a nivel microscópico la fractura dúctil es causada por el proceso de nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos. Los huecos que aparecen, han sido nucleados en porosidades o inclusiones, que al producirse la deformación plástica del material provoca que dichos huecos crezcan uniéndose entre si formando grietas. Un ejemplo de esta categoría es el criterio de Oyane et al. (Eq. 1.25), los cuales desarrollan un modelo de fractura dúctil basado en la aplicación de la teoría de la plasticidad a materiales porosos, considerando que el material durante la fase de crecimiento de huecos se comporta como un material poroso, y el criterio de Chaouadi et. al. (Eq. 1.26) que argumentan que en el proceso de fractura dúctil se produce por combinación del efecto de la deformación plástica y del crecimiento de las cavidades del material.

$$\frac{1}{C_1} \int_0^{\varepsilon_f^p} \bar{\sigma} d\varepsilon^p = 1 \quad (1.22)$$

$$\frac{1}{C_2} \int_0^{\varepsilon_f^p} \bar{\sigma}_I d\varepsilon^p = 1 \quad (1.23)$$

$$\frac{1}{C_3} \int_0^{\varepsilon_f^p} \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\sigma_h}{\sigma_I}\right)^{-1} d\varepsilon^p = 1 \quad (1.24)$$

$$\frac{1}{C_5} \int_0^{\varepsilon_f^p} \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} + C_4\right)^{-1} d\varepsilon^p = 1 \quad (1.25)$$

$$\frac{1}{C_7} \int_0^{\varepsilon_f^p} \left(\bar{\sigma} + C_6 \sigma_h e^{\frac{3}{2} \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}}}\right)^{-1} d\varepsilon^p = 1 \quad (1.26)$$

donde $\bar{\epsilon}^p$ es la deformación plástica equivalente, $\bar{\epsilon}_f^p$ es la deformación plástica equivalente en el instante de la fractura, como se verá posteriormente, el valor de esta deformación se obtendrá para el ensayo de tracción simple y un estado próximo al de deformación plana con el fine de obtener las constantes $C_i (i = 1, 2, 3...)$, s es la tensión equivalente, σ_h es la tensión hidrostática y σ_I es la tensión principal máxima.

Por otra parte, el trabajo realizado por Jain et al. [9] muestra, que los criterios de *Tresca* y *Bressan y Williams*, los cuales originalmente se habían desarrollado para la predicción de la estricción localizada, aproximan satisfactoriamente la rotura de la chapa en casi todo el rango del parámetro b . El criterio de *Tresca* establece que la fractura dúctil se produce cuando se alcanza un determinado valor de la tensión tangencial máxima (Eq. 1.27). Por su parte, *Bressan y Williams* argumentan que, en estados donde $b > 0$, el fallo se produce según un plano que atraviesa el espesor y orientado de tal forma que el material no experimente alargamiento. Para que se produzca la fractura el valor de la tensión tangencial local en dicho plano debe alcanzar un valor crítico (Eq.1.28).

$$\frac{\tau_{\text{máx}}}{C_8} = 1 \quad (1.27)$$

$$\frac{\tau_{(d\varepsilon=0)}}{C_9} = 1, \text{ donde } \tau_{(d\varepsilon=0)} = \left| \frac{\sqrt{1+\beta}}{2+\beta} \right| \sigma_I \quad (1.28)$$

Por los motivos expuestos anteriormente, será el criterio de *Tresca* el que emplearemos para nuestro estudio de predicción del fallo.

1.3. Motivación

El estudio actual nace de la necesidad de una teoría/criterio que aproxime de mejor manera el fallo de los metales durante su proceso de conformado.

Actualmente, muchos autores emplean distintos criterios para predecir el fallo muchos de ellos basados en la mera observación de los resultados experimentales. Así el fallo del material era a veces predicho por el estado de las fibras más tensionadas en la cara superior, y otras por el estado de la cara inferior. La predicción del fallo por el estado del plano central del material, suele ser una aproximación razonable del fallo del metal.

Autores como Jain et al.[9] proponen estudiar la historia de ϵ_1 , a lo largo de la sección donde se produzca el fallo del material. La Fig. 1.17 muestra estas ideas de forma esquematizada.

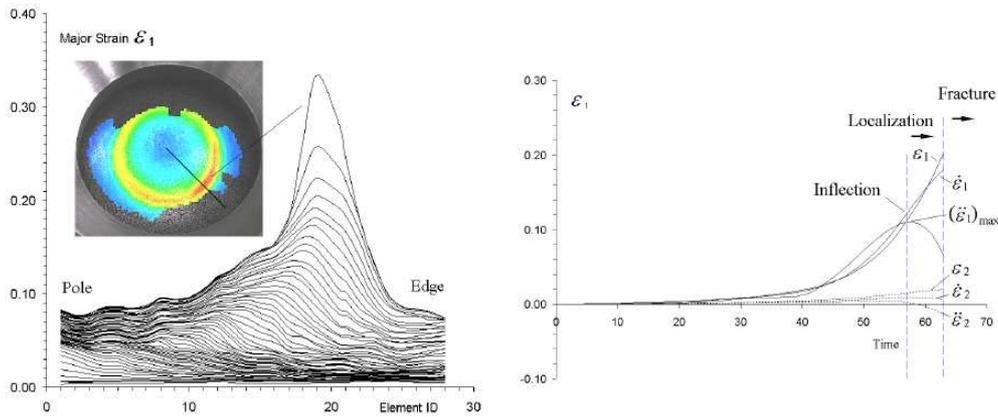


Figura 1.17: Fig. izqda: Mapa de deformación e historia de deformación a lo largo de una sección. Fig drcha: Análisis de la historia de deformación para deformaciones límites [Jain et al. 2007].

Según el criterio realizado por Jain et al. [9], el comienzo de la estricción tiene lugar cuando se produce un punto de inflexión en la $\dot{\epsilon}_1$ o lo que es lo mismo se llega a un máximo en la $\ddot{\epsilon}_1$. Los autores aseguran que el criterio seguido da lugar a buenos resultados y a un razonable acuerdo con los experimentos.

Es en este punto donde arranca nuestro estudio. El empleo de la deformación principal ϵ_1 carece, a nuestro parecer, de un claro sentido físico será por ello por lo que estudiaremos la aplicación de este criterio a la obtención de los diagramas límite de conformado por estricción de nuestro material.

1.4. Objetivos del proyecto

La predicción del diagrama límite de conformado por fractura, FLDF (*Forming Limit Diagram at Fracture*), y por estricción, FLDN (*Forming Limit Diagram at Necking*), durante un proceso de conformado de chapa es muy importante para indentificar las condiciones de fallo de la chapa. El diagrama límite de conformado por estricción ha sido usado como una herramienta bien conocida en el desarrollo de las operaciones de conformado. Este diagrama muestra, en deformaciones principales, la combinación de deformaciones que dan como comienzo la estricción local. Por otra parte, el diagrama límite de conformado a fractura se obtiene por la combinación de las deformaciones principales en la fractura.

Los objetivos del proyecto son varios:

- En primer lugar se busca caracterizar experimentalmente los FLD a fractura y a la estricción de la aleación de aluminio 2024-T3 con diferentes espesores.
- El segundo objetivo es la caracterización de la influencia del espesor en la determinación de los FLD a fractura y estricción.

- Por último, la puesta a punto y contrastación experimental de nuevas técnicas para la determinación de la aparición de la estricción localizada.

Para la obtención y el estudio de estos diagramas se ha empleado la máquina de embutición *Erichsen*, situada en los laboratorios del grupo de *Ingeniería de los Procesos de Fabricación* y el software de tratamiento de imágenes *ARAMIS*, asociado a dicha máquina. Para la simulación del proceso de estirado se ha utilizado un software comercial de elementos finitos, *ABAQUS*.

Para comprobar que los diagramas obtenidos son conformes con la realidad se compararán con el diagrama límite de conformado a fractura, FLDF (*Forming Limit Diagram at Fracture*), obtenido también experimentalmente. La Fig. 1.18 muestra una representación del FLDF y FLDN.

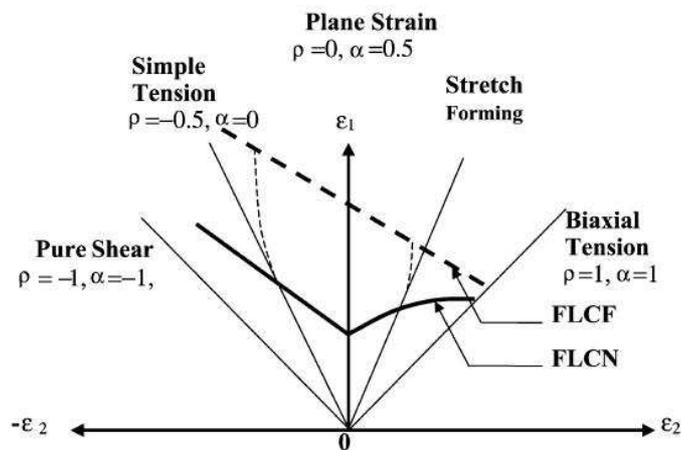


Figura 1.18: Representación esquemática de los FLDF y FLDN

Los resultados aquí obtenidos permitirán conocer mejor el proceso de estirado y podrán ser utilizados posteriormente para la programación por control numérico de las máquinas.

Con el desarrollo de este proyecto se puede iniciar una vía de investigación del proceso de conformado por estirado de aplicación aeronáutica, que podría ayudar a este sector de nuestra ciudad desde el punto de vista tecnológico.