

Capítulo 1

Introducción

1.1.- Procesos de conformado de chapa.

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, debido al bajo coste del mismo. 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].



Fig 1.1. Componentes 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 el 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. 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. En este proceso el material se encuentra sometido a un estado fundamental 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.

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.

Actualmente, la normativa no tiene en cuenta el efecto de la flexión a la hora de obtener los diagramas de conformado plástico, por lo que adicionalmente compararemos los resultados obtenidos con diferentes radios de curvatura y poner de manifiesto la importancia de este efecto.

1.2.- 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. 1.2.

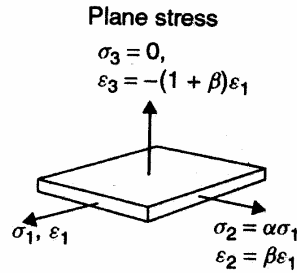


Fig 1.2. Ejes de referencia en una chapa bajo condiciones de Tensión Plana (TP)

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

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:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \sqrt[m]{\frac{1}{2}(a + a(h\alpha)^m + (\frac{1-h\alpha}{2})^m)} \quad (1.7)$$

$$d\varepsilon_{eq} = d\varepsilon_1 \frac{1 + \alpha\beta}{\sqrt[m]{\frac{1}{2}(a + a(h\alpha)^m + (\frac{1-h\alpha}{2})^m)}} \quad (1.8)$$

Aplicando la regla de flujo, dada por:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{eq} \frac{df(\sigma)}{d\sigma_{ij}} \quad (1.9)$$

donde $df(\sigma)$ es la expresión (1.7), y particularizándola para $i = j = 2$, se obtiene una expresión que relaciona α y β

$$\beta = \frac{(1 + \alpha\beta)(amh^m \alpha^{m-1} - \frac{mh}{2} (\frac{1-h\alpha}{2})^{m-1})}{m(a + a(h\alpha)^m + (\frac{1-h\alpha}{2})^m)} \quad (1.10)$$

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 deformación en el espesor ε_3 :

$$t = t_0 e^{\varepsilon_3} = t_0 e^{(1+\beta)\varepsilon_1} \quad (1.13)$$

donde t_0 es el espesor inicial de la chapa.

1.2.1.- 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 de 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).

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (1.14)$$

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.

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

1.2.2.- 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. 1.3, en las cuales debido a esta anisotropía aparecen unos bordes ondulados característicos, denominados orejetas, Fig. 1.4. Este fenómeno se conoce como orejeteado.

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.

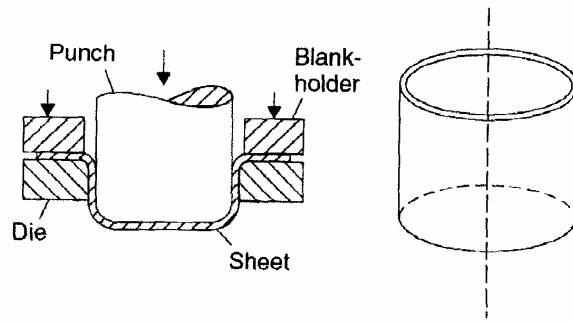


Figura 1.3. Embutición

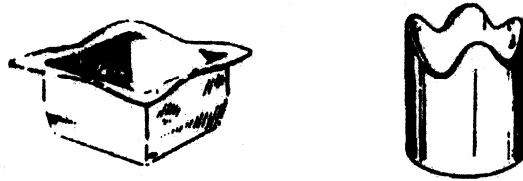


Figura 1.4. Defecto de orejeteado en dos piezas distintas debido a la anisotropía en el plano

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. 1.5. 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.

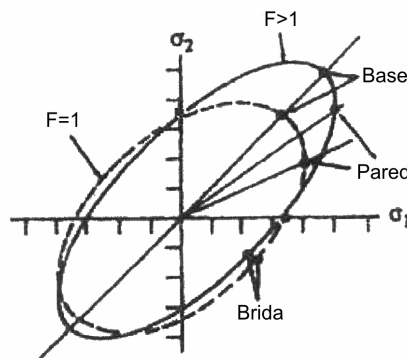


Figura 1.5. Efecto de la anisotropía normal

1.2.3.- Inestabilidad y fallo de la chapa.

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 maneras dúctil o 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 aun 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 ésta 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 máximo.
- En la zona de estricción, la deformación a lo largo de la misma es nula.

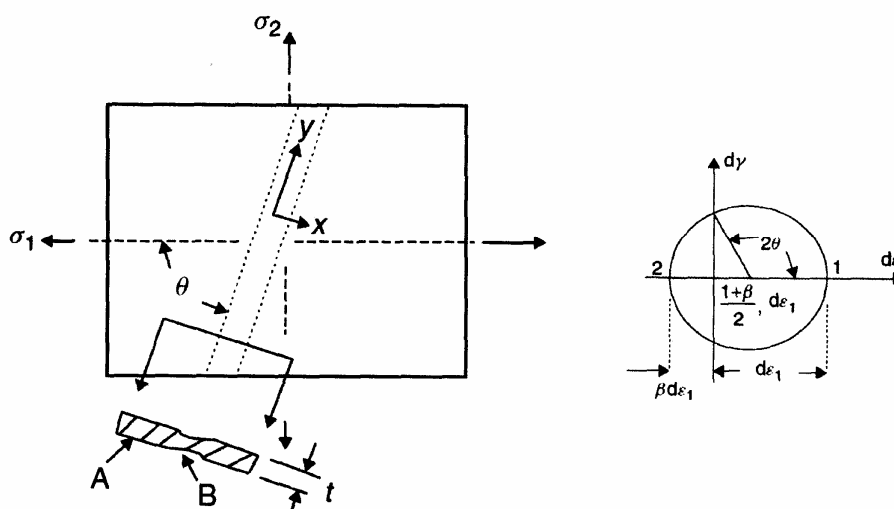


Figura 1.6. Estricción localizada y difusa en una chapa ensayada a tracción. La estricción se produce a un ángulo θ respecto a la dirección principal máxima

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. $d\varepsilon_2 = 0$, donde la condición 2' está orientada a lo largo de la estricción. La ecuación anterior, en términos de deformaciones, se tiene:

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = -\frac{dt}{t} = -d\varepsilon_3 = (1 + \beta)d\varepsilon_1 \rightarrow \frac{1}{\sigma_1} \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = 1 + \beta \quad (1.18)$$

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

$$\varepsilon_1^* = \frac{n}{1 + \beta} \quad (1.19)$$

Teniendo en cuenta que $\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$, se tiene que la condición para la inestabilidad localizada queda de la forma:

$$\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* = n \quad (1.20)$$

1.2.4.- Criterio de plastificación. Barlat et Lian.

Para este estudio, se tomará como criterio de plastificación, el modelo propuesto por Barlat et Lian, usado para modelar chapas de aluminio bajo condiciones de tensión plana [12].

La función de plastificación, que describe la anisotropía plana para todos los estados de tensión plana, puede ser escrita de la siguiente forma:

$$f = a|K_1 + K_2|^M + a|K_1 - K_2|^M + c|2K_2|^M = 2\bar{\sigma}^M \quad (1.21)$$

donde:

$$K_1 = \frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2} \quad (1.22)$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - h\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{xy}^2} \quad (1.23)$$

donde a, c, h y p son constantes del material.

Un método para determinar dichas constantes, es a partir de los valores del coeficiente de anisotropía plástico (R) en las direcciones de 0°, 45° y 90° (R₀, R₄₅, R₉₀).

$$a = 2 - 2\sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}} \quad (1.24)$$

$$c = 2\sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}} \quad (1.25)$$

$$h = \sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{1+R_{90}}{R_{90}}} \quad (1.26)$$

p no se puede calcular analíticamente, por lo que se obtendrá gráficamente o numéricamente. Aunque p se puede calcular a partir de:

$$p = \frac{\bar{\sigma}}{\tau_{s1}} \left(\frac{2}{2a + 2^M c} \right)^{1/M} \quad (1.27)$$

1.3.- Procesos de conformado con efecto de la flexión.

La flexión a lo largo de una línea recta, es el caso más común en los procesos de conformado de chapa. Esto puede ser hecho de varias formas tales como el conformado a través de la matriz, o plegando en máquinas especiales, etc.

El fallo por separación (splitting) durante el proceso de flexión, está normalmente limitado por una alta resistencia, chapas menos dúctiles y una mayoría de casos de insatisfactoria flexión que producen una falta de control en términos de recuperación elástica (springback) y adelgazamiento de la chapa (thinning).

Si la línea de plegado es curva, la chapa suele deformarse en el proceso y es estirada, lo que puede conducir a la división, o comprimido, con la posibilidad de pandeo. Hay casos especiales en que se puede doblar la chapa a lo largo de líneas curvas sin estiramiento o disminución de las zonas adyacentes, pero estos requieren especial diseño geométrico.

Como se muestra en la Figura 1.7, se considera una unidad de longitud de una chapa, donde la región cilíndrica doblada tiene un radio de curvatura p. El ángulo de flexión es θ , un momento por unidad de longitud M, y una tensión (fuerza por unidad de longitud) T son aplicadas. Notamos que la tensión T se aplica en la mitad de superficie de la chapa. Las unidades son:

$$M \equiv [\text{fuerza}] \cdot [\text{longitud}] / [\text{longitud}]$$

$$T \equiv [\text{fuerza}] \cdot [\text{longitud}]$$

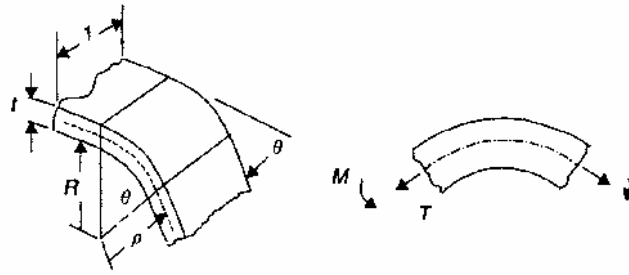


Figura 1.7. Una unidad de longitud de una tira doblada a lo largo de una línea.

En una chapa delgada sometida a flexión con un radio de curvatura de más de tres o cuatro veces el espesor, se puede suponer que una sección plana normal en la chapa permanecerá plana y normal y convergerá en el centro de curvatura, como se muestra en la Figura 1.8.

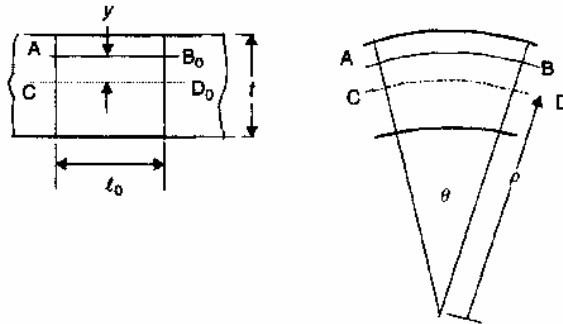


Figura 1.8. Deformación de fibras longitudinales en flexión y tensión.

En general, una línea de CD_0 en el centro de la superficie puede cambiar de longitud a CD ; por ejemplo, la chapa se estira durante la flexión; i.e. la longitud original se convierte en:

$$l_s = \rho\theta \quad (1.28)$$

Una línea AB_0 a una distancia y de la mitad de la superficie se deformará una longitud

$$l = \theta(\rho + y) = \rho\theta\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = l_s\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (1.29)$$

La deformación axial de la fibra AB es

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_s}{l_0} + \ln\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (1.30)$$

Donde ε_a es la deformación en la superficie media de la deformación de la membrana y ε_b es la deformación provocada por la flexión. Cuando el radio de curvatura es grande comparado con el espesor, la deformación provocada por la flexión puede ser aproximada por

$$\varepsilon_b = \ln\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \approx \frac{y}{\rho} \quad (1.3)$$

La distribución de la deformación es aproximadamente lineal, tal como se ilustra en la Figura 1.9.

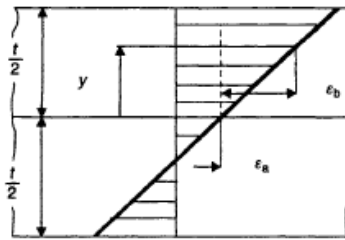


Figura 1.9. Distribución de la deformación asumida en flexión.

Suponiendo que sólo se aplicase un momento, se obtendría la distribución de σ_1 tal como aparece en la Figura 1.10, siendo la distribución de la forma:

$$\sigma_1 = K' \varepsilon_1 \approx K' \left(\frac{y}{\rho} \right)^n \quad (1.32)$$

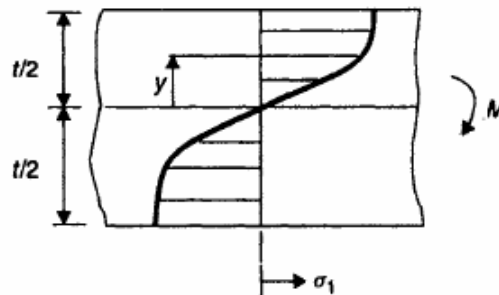


Figura 1.10. Distribución de la tensión asumida en flexión sin tracción.

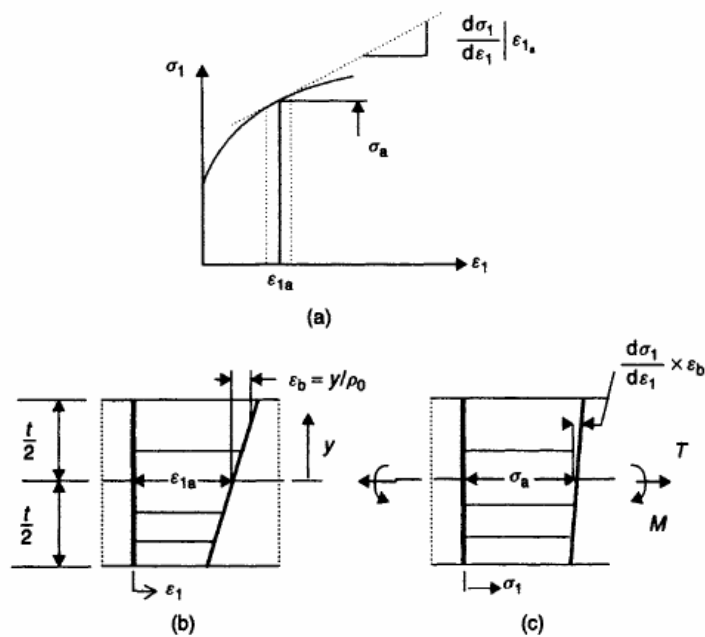


Figura 1.11. Distribución de la tensión asumida en flexión aplicando tracción.

Efecto de la fricción

Debido a que existen zonas de contacto entre los diferentes elementos, aparecerá una fuerza debida al rozamiento, tal como se puede observar en la Figura 1.12

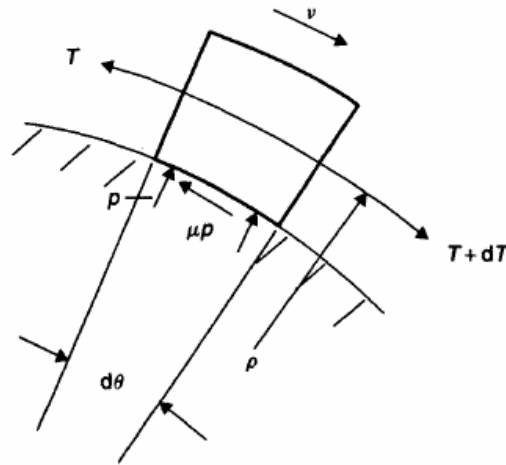


Figura 1.12. Incremento de la tensión en el contacto debido a la fricción

Efecto de la pisada (drawbead)

Para realizar los ensayos, se ha utilizado una pisada entre la matriz y el prensa-chapa con un elemento denominado drawbead, el cual deforma la chapa para garantizar una perfecta sujección y que no existan problemas de deslizamiento.

Al igual que la fricción, la pisada induce un cambio de tensiones en la chapa, tal como se puede observar en la figura 1.13, siendo la expresión:

$$T + \Delta T_f = T \exp(\mu\theta) \tag{1.33}$$

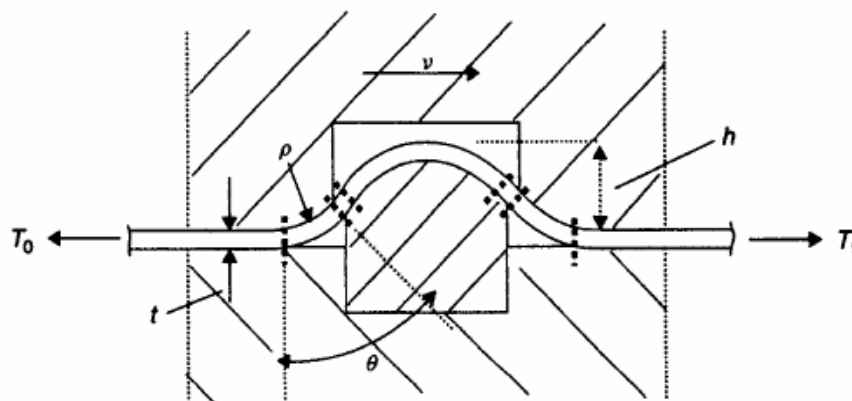


Figura 1.13. Efecto del drawbead en la tensión de la chapa

1.4.- Diagrama Límite de Conformado (FLD). Necking y fractura.

Si la condición de inestabilidad dada por la ecuación (1.20) 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 reproducirá, 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).

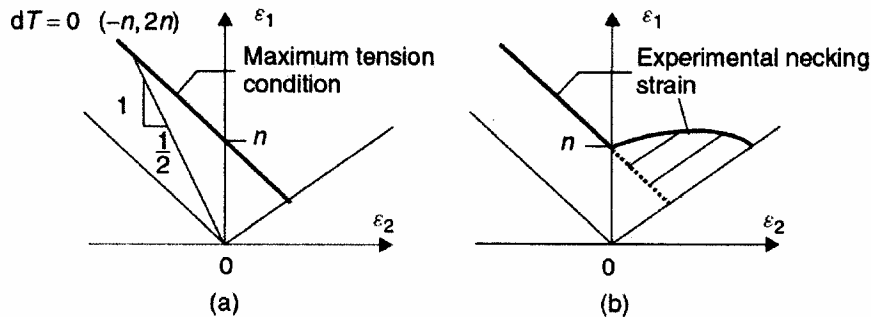


Figura 1.14. (a) FLD teórico. (b) FLD experimental.

La orientación de la estricción, respecto de la dirección de la deformación máxima, puede obtenerse fácilmente a partir de la condición de alargamiento nulo ($d\varepsilon_2' = 0$). 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:

$$\cos 2\theta = \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (1.34)$$

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 1.13.

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 en el material.

El FLD, desde que se introdujeron 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 1.16, o mediante un proceso de videometría.

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

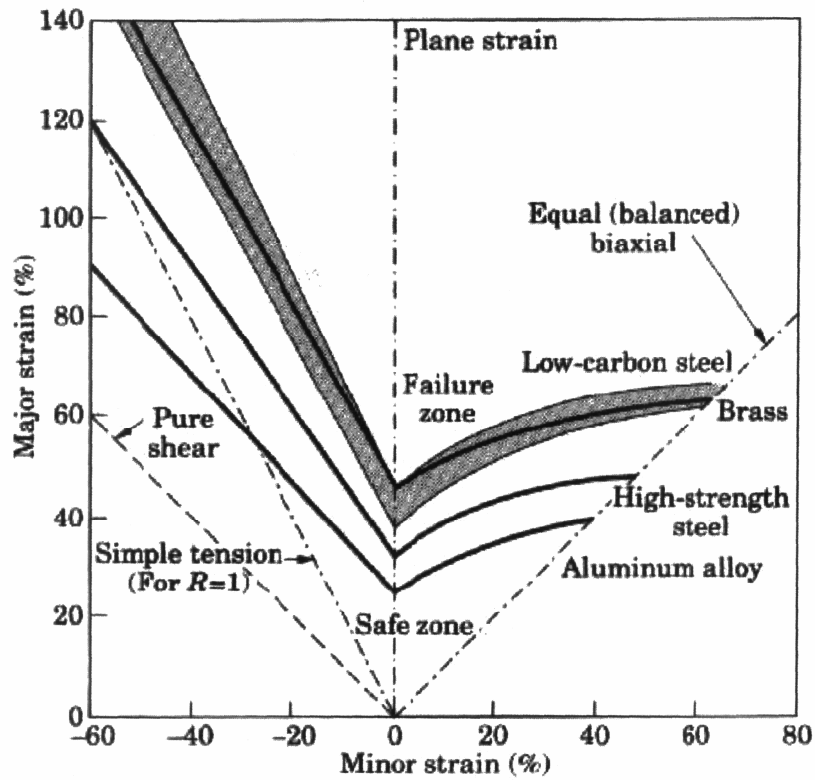


Figura 1.15. Evolución real del FLD para diferentes materiales en todo el rango de β

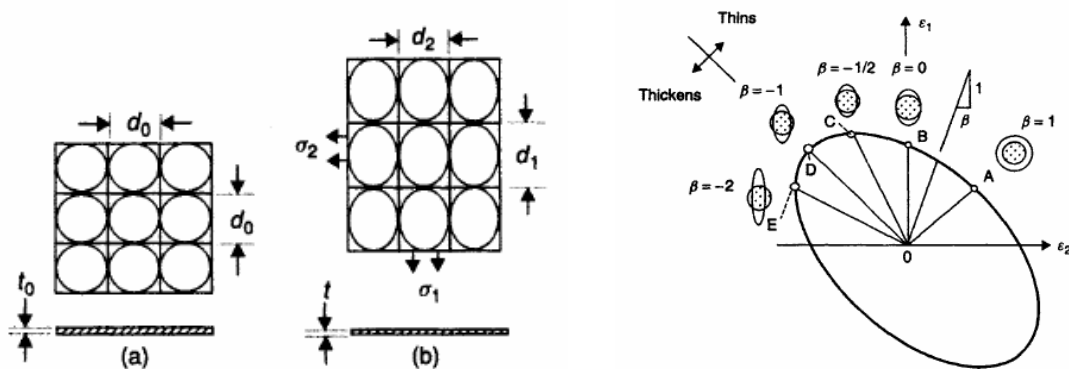


Figura 1.16. Deformación de la retícula de círculos

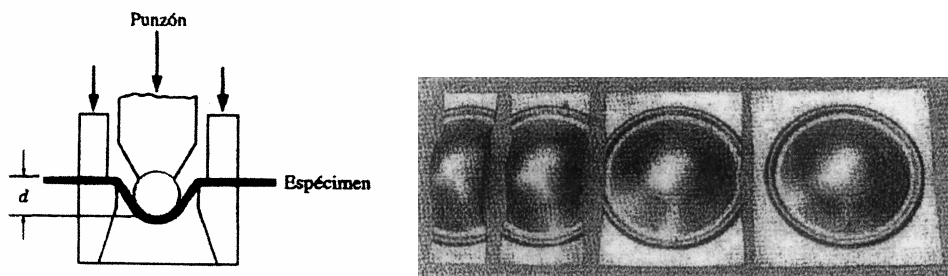


Figura 1.17. Esquema del ensayo y probetas para la determinación de los FLD

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

Como puede verse en la Fig. 1.18, el FLD corta al eje principal de deformación en un valor igual a n . Esto implica que un aumento de n supone reducir proporcionalmente las posibilidades de fallo.

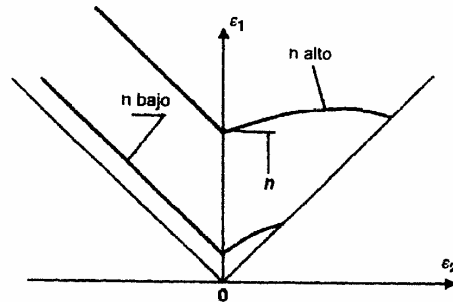


Figura 1.18. Efecto del endurecimiento en el FLD

- Velocidad de deformación

No influye en el comportamiento global del material. Pero sí 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.

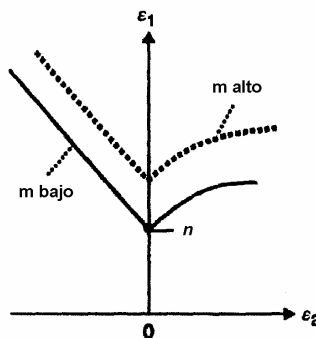


Figura 1.19. Efecto de la velocidad en el FLD

- 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. $\beta \approx 1$.

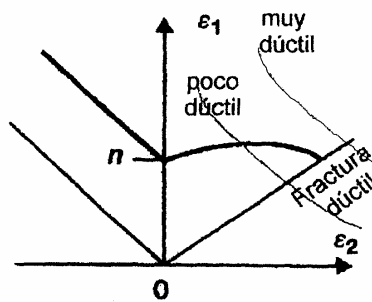


Figura 1.20. Efecto de la fractura dúctil en el FLD

- 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.

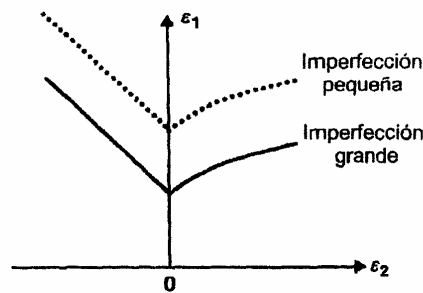


Figura 1.21. Efecto de las imperfecciones en el FLD

FLD necking o fractura.

En el modelo estudiado en este proyecto, se pueden distinguir dos tipos de fallo en la chapa, el primer caso es el fallo producido por necking o estricción localizada, y el segundo caso, es el producido por la fractura del material.

En este estudio, al someter a la chapa bajo un estado de flexión, el momento producido por el mismo inducirá que exista en la zona de flexión de la chapa un gradiente a lo largo del espesor de la misma, de tal forma que las deformaciones y tensiones en la parte superior e inferior de la chapa sean diferentes, y además que en la zona superior, dichas deformaciones y tensiones sean mayores que en la zona inferior.

Dependiendo del grado de flexión que sometamos a la chapa, existirá un momento en el que las deformaciones y tensiones tengan signos contrarios a ambos lados de la chapa dentro de la zona de flexión; en este caso, la chapa fallará por *fractura*. Éste fenómeno tendrá a aparecer en los ensayos donde el radio del punzón sea pequeño. Para los demás casos, el fallo que aparecerá será,

normalmente, primero el de estricción y a continuación el de fractura, pudiéndose obtener ambos diagramas de fallo, es decir, FLDN (diagrama límite de conformado a necking) y FLDF (diagrama límite de conformado a fractura)

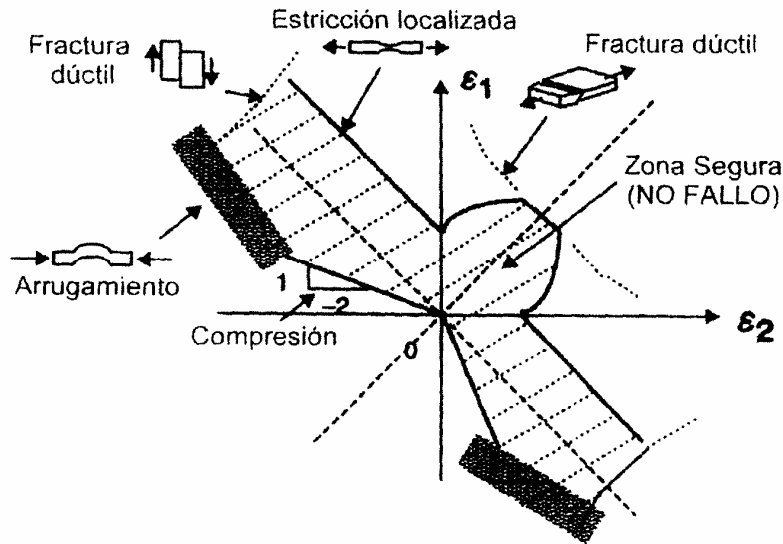


Figura 1.22. FLD completo, incluyendo todos los posibles tipos de fallos

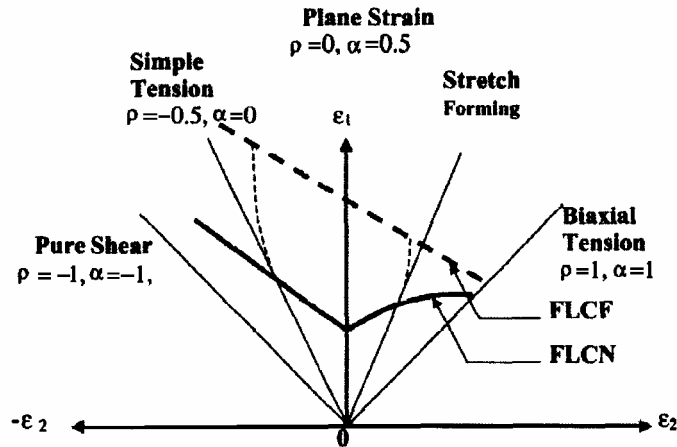


Figura 1.23. Representación esquemática de los FLDF y FLDN

El diagrama límite de conformado de una chapa metálica establece una frontera entre zonas en las cuales el proceso puede desarrollarse de forma segura, esto es, sin aparición de estricción, y zonas inseguras en las que la citada inestabilidad puede tener lugar. Por ello, para la correcta caracterización de la conformabilidad de un material, es necesario ser capaz de predecir el inicio y desarrollo de la estricción.

1.5.- Métodos para la detección del necking. Criterio de necking.

El diagrama límite de conformado de una chapa metálica establece una frontera entre zonas en las cuales el proceso puede desarrollarse de forma segura, esto es, sin aparición de estricción, y zonas inseguras en las que la citada inestabilidad puede tener lugar. Por ello, para la correcta caracterización de la “conformabilidad” de un material, es necesario ser capaz de predecir el inicio y desarrollo de la estricción.

Hasta el momento, una serie de métodos experimentales enfocados a tal objetivo han sido propuestos [13,15], los cuales se desarrollarán a continuación. A tal fin, se han comenzado a emplear métodos de correlación de imágenes digitales para obtener la evolución de las deformaciones durante los ensayos.

Las cuatro metodologías desarrolladas por Arrieux [13] se basan en: (1) la aparición de un defecto visible; (2) el análisis de la evolución de la ruta de deformación, asociando un cambio brusco de pendiente en la misma con el comienzo de la localización; (3) el ajuste de la curva de deformación mayor en una sección perpendicular a la fractura mediante un polinomio de grado 6; (4) el análisis de la evolución de los perfiles de deformaciones en una determinada sección, estableciendo el comienzo de la estricción cuando el ancho de la zona de crecimiento de la deformación se ha confinado.

En el primero de ellos, la idea es asociar el comienzo de la estricción a la aparición de un píxel blanco en el sistema de adquisición con imágenes, ya que la fuerte reducción de espesor local hace que la pintura se desprenda y se genere la citada reflexión. Obviamente es un método muy subjetivo y no depende tanto de la física de la estricción.

El segundo método está en consonancia con el hecho de que la evolución de la estricción se desarrolla únicamente bajo condiciones de deformación plana, si bien es cierto que Jain [14] puso de manifiesto que la localización no ocurre necesariamente bajo dicha condición.

En el tercer método, basado en el criterio de Bragard, se considera la sección en el instante antes de la fractura pero no se definen los puntos a incluir para el ajuste polinómico. El método es muy automatizable, a diferencia de los anteriores, pero presenta una indefinición en sí. El método de Arrieux tampoco presenta ningún criterio objetivo claro para la detección experimental del inicio de la estricción, quedando en manos de quien analiza los datos la bondad del resultado.

Por otro lado, Jain [14] en sus dos publicaciones en congresos, analiza tres métodos para determinar las deformaciones límite y detectar el comienzo de la estricción, siendo el último de los tres, basado en el criterio de la inflexión en la velocidad de deformación, el de más significado físico y numérico. La primera de las propuestas está relacionada con el criterio de Bragard, ampliamente extendido para estimar la deformación límite. El segundo se basa en la existencia de monotonía en la distribución de deformaciones, sólo antes de la estricción, en una sección perpendicular a la zona de fractura en un ensayo Nakazima, siendo menores a medida que nos alejamos del centro hacia cada extremo. Comparando el crecimiento de la deformación mayor de un elemento con su adyacente, el instante cuando éstas se hacen iguales o se excede, se puede considerar como comienzo de la localización. El inconveniente de ambos métodos radica en que el resultado depende del tamaño de la malla y de la subjetividad a la hora de comparar cuándo las deformaciones de uno y su vecino se consideran iguales. En el último de todos, la historia de deformación de un punto cercano a la zona de fractura se representa frente al tiempo, procesando posteriormente la velocidad y aceleración de deformación mediante diferenciación. El comienzo de la localización se relaciona con el instante donde aparece una inflexión en la velocidad de deformación, ó lo que es equivalente,

un máximo en la aceleración. Se señala además que el proceso desemboca en la fractura, instante en el cual se alcanza un máximo en la velocidad y un cero en la aceleración. Para Jain, el máximo en la aceleración y posterior caída a cero representa el desarrollo del fenómeno de estricción. En cualquier caso, la reducción de la aceleración durante la fase de desarrollo de la inestabilidad debería estar conectada de alguna forma con la existencia de alguna barrera o fuerza que frene el proceso inestable, cuya existencia, a priori, no tiene excesiva justificación física.

Por último, muy recientemente se ha publicado una revisión de la norma ISO 12004-2, en la cual se estandarizan las condiciones para la ejecución de los ensayos Nakazima y Marciniak. Se propone además un método fiable para la determinación de las deformaciones límite y consecuentemente los FLD.

El método se basa en el análisis de la distribución de deformaciones medidas a lo largo de una sección perpendicular a la zona de fractura (position-dependent method) justo en el instante anterior a la aparición de la fractura. Mediante eliminación de los puntos que están dentro de la estricción, la distribución de deformaciones que existía en esa zona un instante antes del inicio de la localización se reconstruye mediante el ajuste de una parábola inversa con el resto de puntos considerados fuera de la estricción. La detección del ancho de la zona donde se ha desarrollado la inestabilidad se estima buscando el máximo en la segunda derivada espacial (filtrada y sin filtrar) a cada lado de la fractura. Esta metodología trata de reproducir el fenómeno físico de la estricción, consistente en una reducción inestable del espesor. La elección de los puntos a usar para la reconstrucción de la zona central se establece a partir de las deformaciones mayores y menores existentes en los puntos estimados anteriormente.

El método de la norma es fácilmente aplicable, automatizable, objetivo y propone una metodología local adecuada, si bien es cierto que está orientada a ensayos de caracterización en los cuales no hay gradiente de deformación en el espesor del material, esto es, no hay prácticamente influencia de la flexión. Ha de notarse que en la totalidad de los procesos de conformado, los efectos de la flexión son muy notables y por ello deberían ser considerados. De igual forma, las metodologías propuestas con anterioridad, Arrieux y Jain, están basadas en procesos en los que la influencia de la flexión es despreciable.

Se tomará como criterio de necking para este estudio, el descrito abajo:

$$\varepsilon_{I\text{máx,inf erior}} = FLD_{0\text{inf erior}} \quad (1.35)$$

donde, $\varepsilon_{I\text{máx,inf erior}}$ es la deformada principal primera en la cara inferior y $FLD_{0\text{inf erior}}$ es el valor que toma el FLD sin efecto de la flexión y próximo a deformación plana calculada en la cara inferior a través de la ecuación 1.31:

$$FLD_{0\text{inf erior}} = FLD_0 - \ln\left(1 + \frac{t}{R}\right) \quad (1.36)$$

donde, FLD_0 corresponde con el valor que toma el FLD sin efecto de la flexión (ensayo Nakazima) y próximo a deformación plana; t es el espesor de la chapa y R es el radio del punzón ($R = 0,05m$, en el ensayo Nakazima).

También se puede tomar el valor de la deformada principal primera en la superficie inferior, una vez realizado el análisis con el punzón esférico y con condiciones cercanas a la deformación plana

en ANSYS LS-DYNA, y habiendo obtenido en la cara superior el valor de $\varepsilon_f = FLD_0$, aunque este valor y el obtenido en la ec. 1.36 deben ser muy parecidos.

Se ha adoptado este criterio, ya que nuestros ensayos comprende una zona muy próxima a la de deformación plana. En estudios posteriores, donde se quiera analizar la curva en todo el intervalo de β , se deberá de tomar como criterio:

$$FLD_{\text{inferior},\beta} = FLD_{\text{Nakazima},\beta} - \ln\left(1 + \frac{t}{R}\right) \quad (1.37)$$

donde, $FLD_{\text{Nakazima},\beta}$ corresponde con la curva FLD sin efecto de la flexión (ensayo Nakazima) y con un valor de β correspondiente al mismo valor que el que determina el fallo en el $FLD_{\text{inferior},\beta}$.

1.6.- 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. 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 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. 1.38) 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. 1.39); 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. 1.40).

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. 1.41), los cuales desarrollan un modelo de fractura dúctil basado en la aplicación de la teoría de las 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. 1.42) 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.

$$\frac{1}{C_1} \int_0^{\varepsilon_f^p} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}^p = 1 \quad (1.38)$$

$$\frac{1}{C_2} \int_0^{\varepsilon_f^p} \bar{\sigma}_I d\bar{\varepsilon}^p = 1 \quad (1.39)$$

$$\frac{1}{C_3} \int_0^{\varepsilon_f^p} \frac{2}{3} \left(1 - \frac{\sigma_h}{\sigma_I}\right)^{-1} d\bar{\varepsilon}^p = 1 \quad (1.40)$$

$$\frac{1}{C_5} \int_0^{\varepsilon_f^p} \left(\frac{\sigma_h}{\sigma} + C_4\right)^{-1} d\bar{\varepsilon}^p = 1 \quad (1.41)$$

$$\frac{1}{C_7} \int_0^{\varepsilon_f^p} \left(\bar{\sigma} + C_6 \sigma_h e^{\frac{3\sigma_h}{2\sigma}}\right)^{-1} d\bar{\varepsilon}^p = 1 \quad (1.42)$$

Donde $\bar{\varepsilon}^p$ es la deformación plástica equivalente, $\bar{\varepsilon}_f^p$ es la deformación plástica equivalente en el instante de la fractura; el valor de esta deformación se obtiene para el ensayo de tracción simple y un estado próximo al de deformación plana con el fin de obtener las constantes $C_i (i = 1, 2, 3, \dots)$; $\bar{\sigma}$ 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. [7] 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. 1.43). 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. 1.44).

$$\frac{\tau_{m\acute{a}x}}{C_8} = 1 \quad (1.43)$$

$$\frac{\tau_{(d\varepsilon=0)}}{C_9} = 1, \text{ donde } \tau_{(d\varepsilon=0)} = \left| \frac{\sqrt{1+\beta}}{2+\beta} \right| \sigma_I \quad (1.44)$$

El criterio de Tresca sería el más adecuado para nuestro modelo, pero no nos centraremos en él, ya que nuestro estudio se limitará en la detección del necking.

1.7.- Motivación.

Actualmente, la normativa [15], la cual describe el proceso de obtención de los diagramas límite de conformado (FLD), marca unas pautas para la realización de los ensayos de los que se obtendrán dichos diagramas, en los que no se tienen en cuenta el efecto de la flexión para la obtención de los mismos.

En la industria actual, en la inmensa mayoría de los procesos de conformado de chapa existe flexión, tal como se puede observar en la industria de la automoción, entre otras.

En estudios realizados hoy día, se han caracterizado materiales a través de ensayos en los cuales se obtiene un diagrama a partir del fallo para diferentes estados de flexión, utilizando punzones cilíndricos de diferentes diámetros, donde la geometría de las probetas induce a que el fallo se localice en una zona próxima a deformación plana; teniendo en el eje de coordenadas las deformaciones principales primeras y en el eje de abcisas una relación entre el espesor y el radio del punzón, para cuantificar así, de alguna manera, el efecto de la flexión.

Con este estudio, se quiere enfatizar la importancia del efecto de la flexión en el conformado de chapas, haciendo un estudio comparativo para los diferentes grados de flexión que se someterán a la chapa. Además, se aportará este estudio a los diferentes proyectos que se realizan en el Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales.

1.8.- Objetivos.

El diagrama límite de conformado de una chapa metálica establece una frontera entre zonas en las cuales el proceso puede desarrollarse de forma segura, esto es, sin aparición de estricción, y zonas inseguras en las que la citada inestabilidad puede tener lugar. Por ello, para la correcta caracterización de la “conformabilidad” de un material, es necesario ser capaz de predecir el inicio y desarrollo de la estricción.

Los objetivos del proyecto son:

- Puesta a punto de un programa de elementos finitos para simular diferentes ensayos de tracción-flexión combinadas usando, para este caso concreto como material, una aleación de aluminio 7075-O de espesor 1.6 mm. Dichos ensayos se realizarán posteriormente en el laboratorio.
- Como segundo objetivo, se busca caracterizar la influencia de los diferentes estados de flexión sometidos a la chapa, obteniendo así, una curva límite de conformado próximo a deformación plana.

Para este estudio se ha empleado el software comercial de elementos finitos ANSYS LS-DYNA.

A partir de los resultados obtenidos, se podrá conocer mejor el proceso de estirado bajo flexión para posteriormente, una vez realizados los ensayos en el laboratorio, para poder ser utilizados en la industria y de esta forma darle un punto de vista práctico a este estudio.

Se dispondrá de los resultados experimentales obtenidos para los punzones de diámetro 100, 20 y 10, para así poder comparar con los resultados obtenidos mediante el MEF.