

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se realiza una revisión de la importancia y los usos del conformado de chapa, se introducen el Diagrama Límite de Conformado (Forming Limit Diagram, FLD) y la Curva Límite de Conformado en Tensiones (Forming Limit Stress Curve, FLSC) para finalmente discutir el objetivo del presente PFC.

1. Conformabilidad de chapas metálicas

Tanto en la industria aeronáutica como en la automovilística se emplea intensamente la producción mediante conformado de piezas de aeronaves, chasis y carrocerías de automóviles, ya sea en aleaciones de aluminio en el primer caso como de aceros de alta resistencia en el segundo. Esto es debido a la obtención de piezas con una excelente relación resistencia - peso y unas buenas propiedades mecánicas.

En la industria se presentan un variado número de procesos para el conformado de piezas de chapa. Pese a ser diferentes desde el punto de vista técnico, comparten fundamentos comunes. Entre las técnicas y procesos básicos de conformado de chapa están la estampación (*stamping*), la embutición (*deep drawing*) o el estirado (*stretching*) entre los más representativos en los que predominan los esfuerzos de tracción frente a los de flexión en la chapa. En el caso contrario encontramos al doblado o plegado (*bending*) o al rebordeado (*hemming*) donde se genera un gradiente de tensiones y deformaciones en el espesor de la chapa debido a la flexión en la misma.

La **estampación** consiste en conformar la chapa de manera que el material esté sometido principalmente a deformaciones de alargamiento. Es muy similar al **estirado**. En ambos se usan mordazas para sujetar el material (llamados prensa-chapa) mientras se utiliza un punzón para que el material adopte la forma de este, también puede ser usada una matriz con la forma deseada. La diferencia estriba en que en el caso de la estampación se permite cierto resbalamiento del material en el prensa-chapa hacia el hueco de la matriz. Esto permite obtener piezas de mayor complejidad.

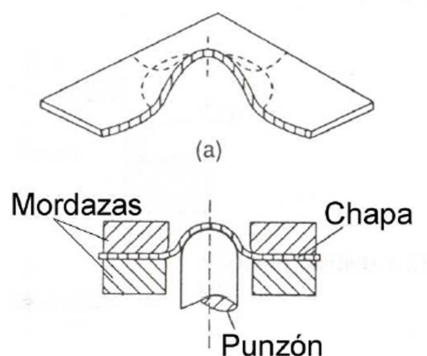


Fig. 1. Conformado de chapa por estirado (Marciniak, 2002)

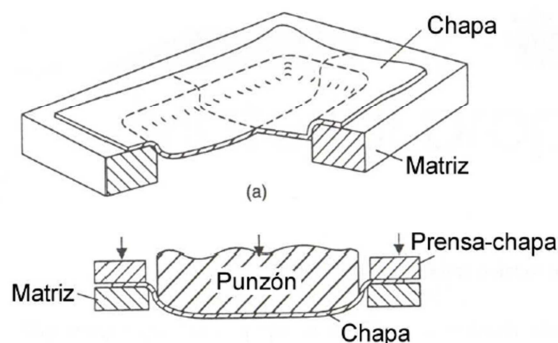


Fig. 2. Conformado de chapa por estampación (Marciniak, 2002)

Los procesos anteriores están limitados a piezas poco profundas. En el caso de necesitar conformar piezas más profundas se recurre a la **embutición**. Para evitar que se produzca el fallo de la chapa al hacer piezas más profundas, es necesario permitir y controlar el flujo de material al hueco de la matriz. Esto se hace regulando la fuerza de sujeción del prensa-chapa y la fricción con la chapa. Un fallo común de este proceso es el arrugamiento que se produce en la zona de la brida. Es debido a los esfuerzos de compresión que allí se producen dando lugar a fenómenos de pandeo local (arrugas). Para las piezas más profundas se emplea una embutición en varias etapas (re-embutición).

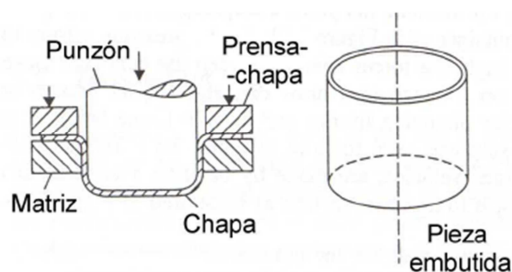


Fig. 3. Conformado de chapa por embutición (Marciniak, 2002)

El **plegado** es el proceso de conformado de chapa más común a flexión. Consiste en doblar la chapa a lo largo de una línea directriz (recta o curva). Es muy importante tener en cuenta la recuperación elástica al retirar la carga, especialmente para piezas con gran precisión geométrica. Existen diferentes procesos de plegado: con matriz en V, en voladizo, con rodillos,...

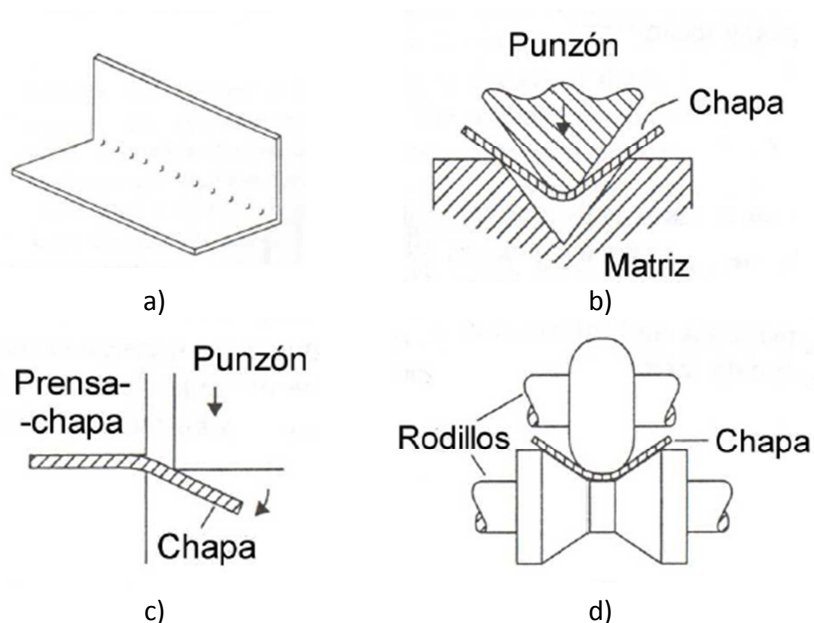


Fig. 4. Diferentes procesos de plegado: a) directriz recta, b) matriz en V, c) en voladizo y d) con rodillos. (Marciniak, 2002)

El **rebordeado** es un tipo particular de plegado que se usa para aumentar la rigidez, mejorar el aspecto y eliminar los filos cortantes de las piezas de chapa.

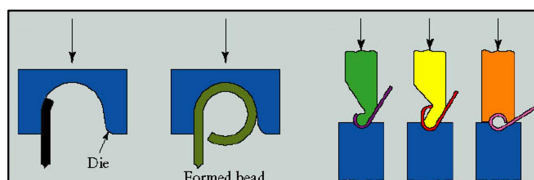


Fig. 5. Proceso de rebordeado (Apuntes Tecnología de Fabricación. Univ. de Sevilla)

En la práctica, los procesos de conformado están limitados por el fallo de la chapa. Los mecanismos más comunes de fallo son la estricción localizada (o desgarro) y la fractura dúctil. La aparición de uno u otro depende de la ductilidad del material y del estado de tensiones y deformaciones de la chapa. Se tiene que en el caso de materiales altamente dúctiles la chapa falla normalmente por estricción localizada, este proceso comienza con la concentración de las deformaciones en una estrecha banda de material que evoluciona hacia un cuello donde, finalmente, se produce el desgarro de la chapa. Por el contrario, en el caso de materiales poco dúctiles, es más frecuente la fractura dúctil sin que haya aparecido estricción alguna. Este es el caso de algunas aleaciones de aluminio endurecidas con tratamientos térmicos que se usan frecuentemente en aeronáutica.

Las zonas críticas donde se produce el fallo de la chapa están relacionadas con pequeños radios de curvatura de los elementos conformadores. Se puede inferir que el fallo está influenciado por el gradiente de deformaciones a través del espesor de la chapa. Por tanto, es

importante tener en consideración el gradiente de deformaciones (y tensiones) a la hora de analizar el mecanismo que desencadenará el fallo.

2. El Diagrama Límite de Conformado (FLD)

El diagrama límite de conformado (Forming Limit Diagram, FLD), propuesto inicialmente por Keeler y Backhofen (1963) y Goodwin (1968), se ha convertido en la herramienta más usada para caracterizar la capacidad de conformado de una chapa metálica a nivel industrial. El FLD consiste en una gráfica con la deformación principal mayor en el plano de la chapa (ε_1) frente a la menor (ε_2). En él se dibuja la curva límite de conformado (Forming Limit Curve, FLC), representa los valores límite de deformación principal máxima y mínima en el plano de la chapa necesarios para producir el fallo de la misma bajo distintas relaciones de deformación. Por tanto, la FLC representa una frontera entre los estados de deformación que provocan el fallo en el conformado y los que no.

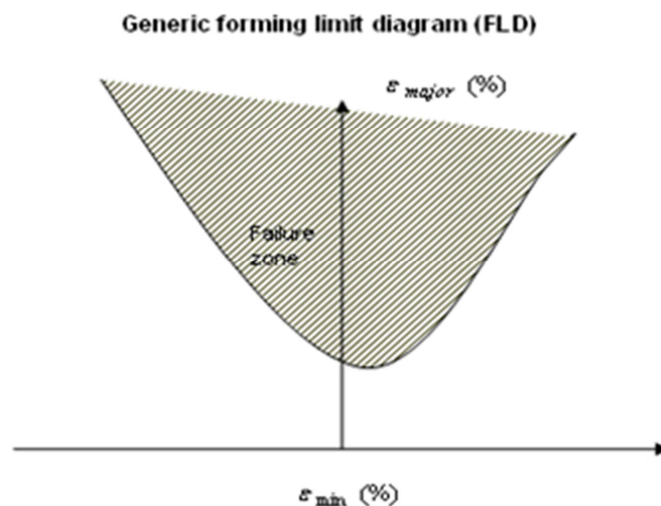


Fig. 6. Diagrama FLD genérico

La conformabilidad está relacionada con el estado de deformaciones (Marciniak 2002). El estado de deformaciones es la combinación de las deformaciones principales: ε_1 , ε_2 y ε_3 . Por conservación de volumen, su suma es nula. Por tanto, sólo se requieren dos de ellas para especificar el estado de deformaciones. La relación entre estas dos deformaciones es convencionalmente expresado como:

$$\varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1$$

Algunos valores de β describen situaciones que son de particular interés por ejemplo:

- $\beta = 1$, en este caso $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, la deformación es constante en todas las direcciones; este se refiere al estado **biaxial** (*equi-biaxial*).
- $\beta = 0$, en este caso no hay deformación en la segunda dirección principal $\varepsilon_2 = 0$ y es llamado **deformación plana** (*plane-strain*).
- $\beta = -0.5$, este es el estado de la prueba de tensión en un material isotrópico y se denomina **uniaxial** (*uniaxial*).
- $\beta = -1$, en este caso $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0$ y consecuentemente $\varepsilon_3 = 0$; no hay cambio en el espesor. Este estado se presenta en las bridas de la embutición profunda. Este caso se denomina **embutición profunda** (*deep-draw*).

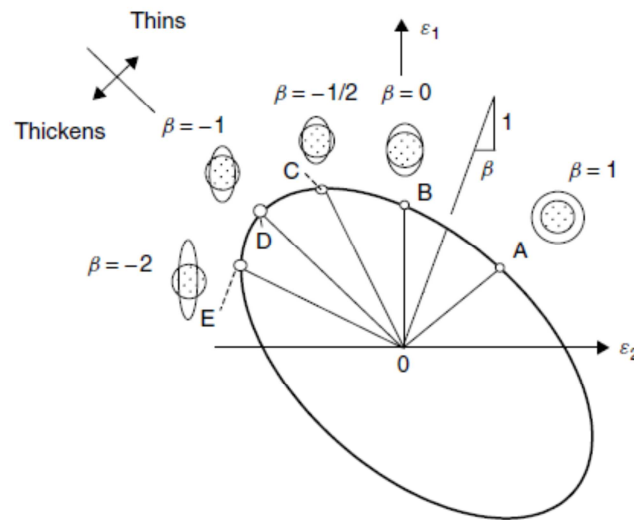


Fig. 7. Diferentes estados de las deformaciones principales

Desde los años 60 del pasado siglo el FLD es utilizado para diagnosticar el fallo en procesos de conformado de chapa. Se utiliza en todas las fases de la producción de un producto de chapa, por ejemplo, en la simulación con elementos finitos durante el diseño de un producto y para diseñar el proceso de conformado, en las pruebas con las herramientas conformadoras y en el control de la calidad durante el proceso de producción. La forma de obtener una curva límite de deformaciones completa implica ensayar probetas con diferentes geometrías (ancho variable y, por tanto, β variable) que son deformadas por un punzón hemisférico hasta que se produce la rotura (ver más adelante la descripción del ensayo Nakazima).

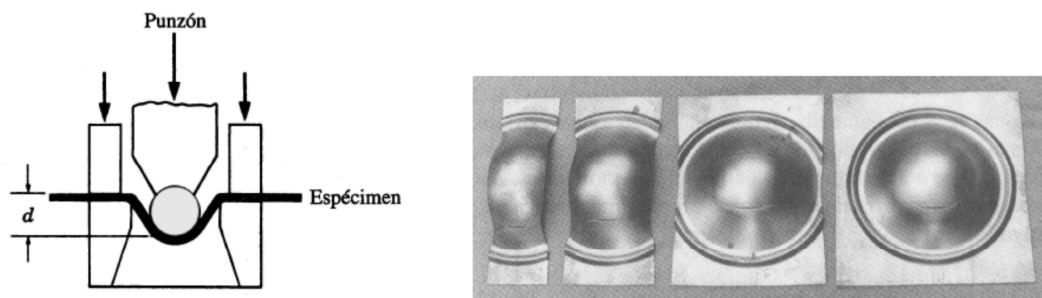


Fig. 8. Esquema del ensayo y probetas usadas en la determinación de los FLD

En la figura anterior puede verse como el esquema de ensayo para realizar la determinación experimental de la curva FLD consiste en deformar diferentes probetas sujetas en los extremos con un punzón hemisférico lubricado. Se usan probetas con diferentes anchos con idea de reproducir diferentes estados de deformación, así se usa la probeta de la derecha para conseguir un estado biaxial de alargamiento ($\beta = 1$) o la probeta de la izquierda (más alargada) para un estado uniaxial de tensión ($\beta = -1/2$).

Al realizar ensayos en estados diferentes de deformaciones o caminos se hace evidente que el fallo de la chapa ocurre siempre a niveles de deformaciones diferentes, creándose una curva de fallo (ver siguiente figura). En ella se ve que algunos caminos llegan antes a una curva llamada curva de estricción (*necking*). En el fallo por estricción existe un adelgazamiento localizado del espesor de la chapa. Sin embargo al tomar otros caminos se puede llegar a otra curva llamada de fractura dúctil (*fracture*). El que acontezca uno u otro mecanismo de fallo dependerá del material en estudio y del camino de deformaciones al que esté sometido el mismo.

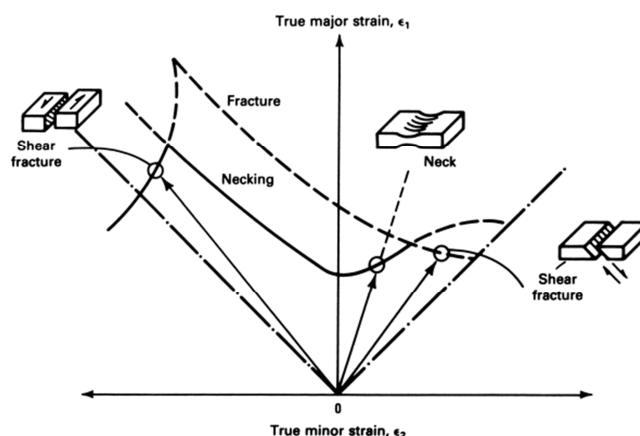


Fig. 9. Curva representativa de los diferentes mecanismos de fallo

Es importante mencionar que para el cálculo de las deformaciones se usa el método de la rejilla de círculo (ver siguientes figuras) o mediante un proceso de videometría (descrito en ISO 12004), con ello es posible obtener las deformaciones principales menor y mayor.

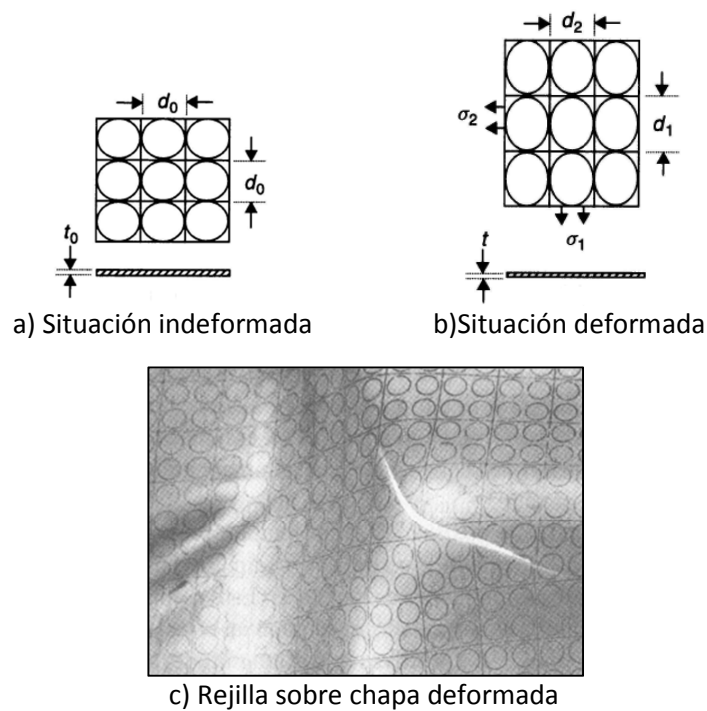


Fig. 10. Método de la rejilla de círculos para medir deformaciones

De todo lo anterior se extrae que el diagrama FLD depende del material y del espesor de chapa que se esté usando. El FLC normalmente presenta una curva en forma de V, decreciente en el lado de la izquierda $\beta = d\epsilon_2/d\epsilon_1 < 0$ y creciente en el lado de la derecha $\beta \geq 0$ (o región de estirado biaxial). Existen además otros factores de influencia:

- *Endurecimiento por deformación.*

Consiste en un desplazamiento en el eje vertical (deformación principal) de la curva, puede apreciarse en la figura que un valor de n (exponente de endurecimiento) alto reduce la posibilidad de fallo.

Esto se puede deducir de la condición de inestabilidad localizada:

$$\epsilon_1^* + \epsilon_2^* = n$$

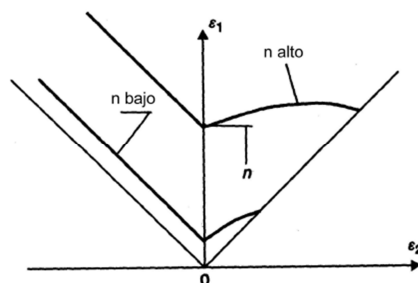


Fig. 11. Efecto del endurecimiento (n)

- *Velocidad de deformación.*

Un coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación (m) alto implica que la propagación de la estricción se retrasa en el tiempo, por tanto es posible alcanzar un mayor nivel de deformación sin que se produzca el desgarro.

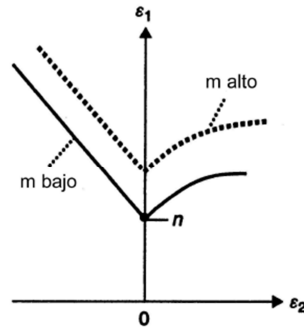


Fig. 12. Efecto de la velocidad de deformación (m)

- *Fractura dúctil.*

En una fractura dúctil se produce una intensa concentración de deformaciones según los planos de deformación principal máxima hasta que se produce la rotura del material. En materiales suficientemente dúctiles, este tipo de fractura no aparece hasta después de que se inicie la estricción localizada, de modo que la curva FLD no se ve afectada. Sin embargo, en materiales con baja ductilidad, como es nuestro caso, la fractura dúctil puede llegar a ocurrir en la zona de estricción antes de que se inicie la inestabilidad. Por tanto, al verse la deformación máxima admisible reducida, la curva FLD queda truncada, ver figura:

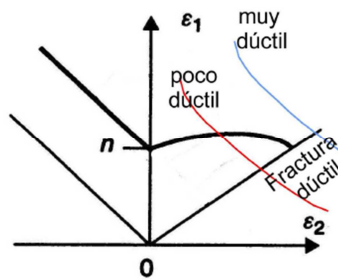


Fig. 13. Efecto de la fractura dúctil

- *Imperfecciones.*

Se entienden como imperfecciones a las reducciones de espesor de la chapa, inclusiones en el material, reducciones locales de la resistencia por defectos en la microestructura e incluso a la propia rugosidad superficial. La estricción localizada se inicia con mayor facilidad en los defectos del material, cuanto mayor sea la cantidad y/o el tamaño de estas imperfecciones, más baja estará situada la curva FLD.

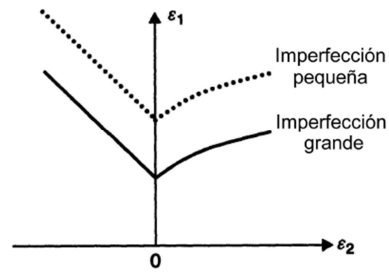


Fig. 14. Efecto de las imperfecciones

A continuación se muestra un diagrama de conformado donde se representa la influencia de los factores comentados así como los diferentes tipos de fallo que pueden aparecer en función del estado tensional que se alcance:

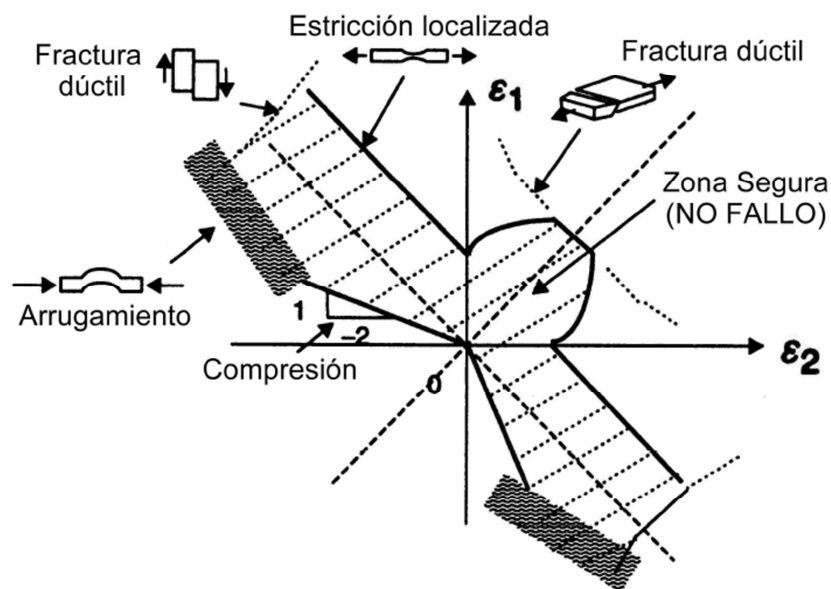


Fig. 15. DLC completo, incluyendo todos los posibles tipos de fallo

3. Ensayo de estirado tipo Nakazima

El ensayo de estirado tipo Nakazima es un conocido método de determinar la curva límite de conformado. Consiste en tomar una probeta previamente preparada y colocarla entre el prensa-chapa y la matriz. Una vez la probeta está correctamente sujeta, se hace subir un punzón hemisférico de $\varnothing 100$ mm, previamente lubricado. La velocidad de desplazamiento está controlada y es constante. Se deforma la probeta hasta el fallo de la misma.

En la siguiente figura se puede observar un montaje de este tipo, donde se representa adicionalmente un cordón de estirado (*draw-bead*) en el prensa-chapa. Este elemento se utiliza para incrementar la sujeción de la chapa:

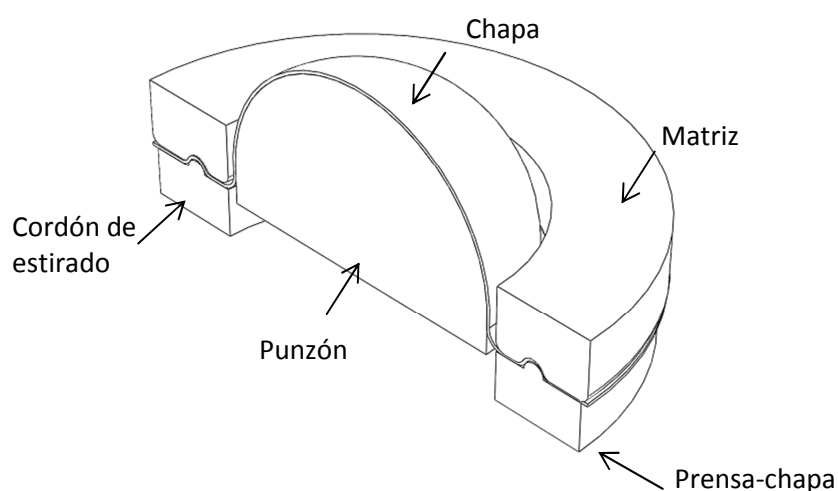


Fig. 16. Esquema de un ensayo tipo Nakazima

El ensayo tipo Nakazima es el ensayo de estirado más utilizado. De hecho se toma como referente en la norma ISO 12004-2:2008 para la 'determinación de las curvas límite de conformado'. Dicha norma estandariza la obtención de las curvas límites de conformado en laboratorios, tanto en los parámetros del ensayo como en la metodología para detectar el inicio de la estricción localizada. Se especifican las condiciones de ensayo que se han de utilizar cuando se determina la curva del límite de conformado a temperatura ambiente y utilizando trayectorias de deformación lineal.

El material que se considera es plano, metálico y de espesor comprendido entre 0.3 mm y 4 mm, siendo para el acero un valor aconsejado de 2.5 mm. También se estandariza el resto de condiciones de ensayo, como pueden ser el tipo de lubricación, la velocidad del punzón, direcciones de los ensayos o geometrías de las probetas. Para el caso de la geometría, se recomienda probetas entalladas (ver siguiente figura) con una parte central calibrada, de longitud superior al 25% del diámetro del punzón (para un punzón de 100 mm con longitud del eje preferentemente entre 25 y 50 mm; el radio de acuerdo entre 20 y 30 mm).

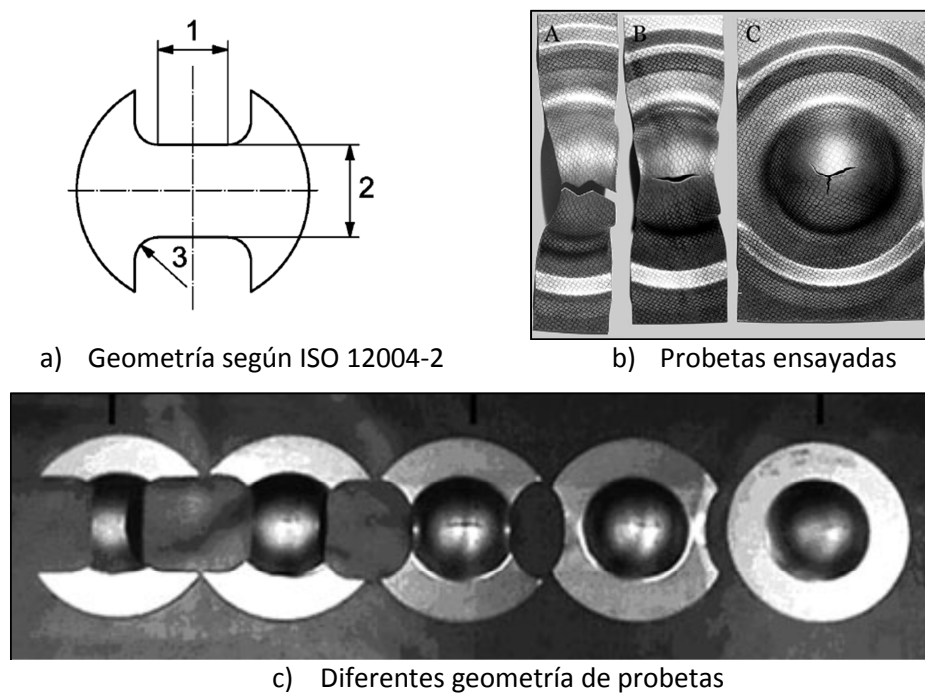


Fig. 17. Probetas entalladas para ensayos tipo Nakazima

4. Curva Límite de Conformado en Tensiones (FLSC)

La curva límite de conformado (FLC) presenta ciertas limitaciones respecto a su aplicabilidad. Anteriormente se ha comentado el proceso de elaboración del FLC, en él se hace uso de resultados de ensayos normalizados donde predominan esfuerzos en el plano de la chapa y el proceso evoluciona bajo condiciones de carga proporcional. Ocurre, sin embargo, que la condición de carga proporcional no es válida en procesos complejos típicos del conformado de chapa. En dichos procesos aparecen caminos de deformación no lineales, cambios bruscos en la relación local de deformaciones (β) o cambios en la dirección por la que evoluciona el proceso. Como ejemplo pueden citarse los procesos de conformado en varias etapas, los procesos con cargas y descargas sucesivas o los procesos con esfuerzo combinados de tracción y flexión.

Está demostrado experimentalmente (Graf y Hosford, 1993) que el cálculo del FLC con probetas con historias de carga previas, es decir, usando caminos de deformación no lineales, implica cambios en la forma y localización de la curva en deformaciones.

Por otro lado, es posible obtener mejoras en la conformabilidad a través de la selección de una secuencia adecuada de caminos de deformación en operaciones de conformado multietapa.

En la siguiente figura se muestra sensible variación que sufre el FLC cuando se usan chapas sujetas a predeformaciones diferentes: tracción uniaxial, biaxial y caminos próximos a la deformación plana.

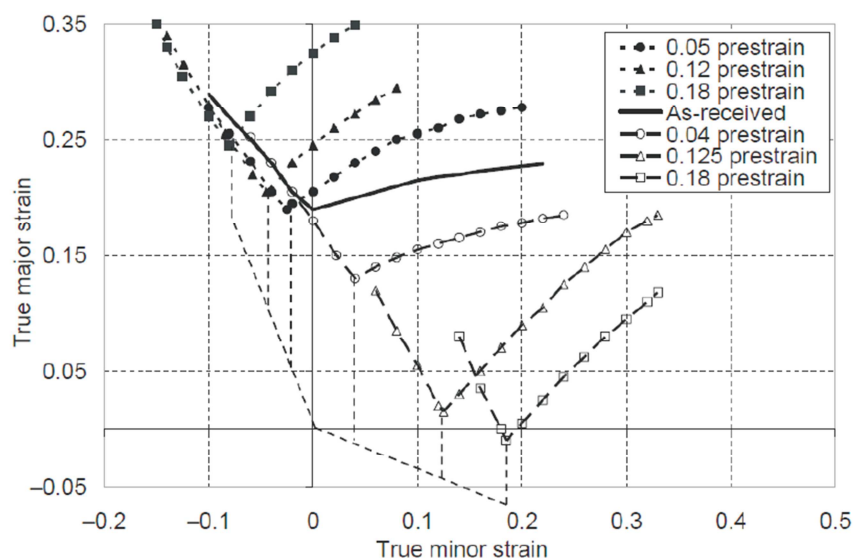


Fig. 18. Curvas límite de conformado en chapas de aluminio 2008-T4 sujetas a deformaciones bajo tracción uniaxial (Graf y Hosford)

En resumen, dependiendo de la historia de carga, el FLC en deformaciones puede ser muy diferente de uno a otro caso. Por tanto, el FLC calculado con los ensayos normalizados debe ceñirse a aquellos procesos en los que la carga sea proporcional y lineal en el espacio de las deformaciones durante todo el conformado. Su uso fuera de dichas condiciones puede llevar a predicciones de inicio de la estricción erróneas.

Lo anterior no sería un problema si la mayoría de los procesos industriales se ciñeran a las condiciones indicadas. Pero la mayoría de operaciones industriales de conformado implican que diferentes puntos de la chapa experimenten diferentes modos de deformación y diferentes no linealidades. Para analizar semejante procesos sería necesario conocer curvas límites de conformado específicas para cada situación e historial de carga. Se pone de manifiesto que el tradicional FLC basado en deformaciones no es adecuado para predecir la conformabilidad de procesos complejos.

Esto ha llevado a que actualmente se trabaje en la búsqueda de un método más sencillo de evaluar la conformabilidad de chapas metálicas ante diferentes procesos de carga (de mayor o menor complejidad). Se ha trabajado sobre la premisa de que los estados límite de conformado dependen, no sólo de los estados de deformación, sino también de los estados tensionales existentes durante el conformado. En base a lo anterior, Stoughton propuso una

alternativa para describir la conformabilidad de chapas metálicas basada en la denominada curva límite de conformado en tensiones (FLSC).

La propuesta de Stoughton (2000) consiste en transformar la tradicional curva límite de conformado en deformaciones al espacio de las tensiones principales (σ_1 y σ_2). Para ello, y dado que las tensiones no son directamente medibles, es necesario hacer uso de la teoría de la plasticidad. Se necesita definir un criterio de plastificación del material y un modelo de endurecimiento para transformar biunívocamente de un estado de deformaciones a uno de tensiones. Si se hace lo anterior para una serie de puntos de la curva límite de conformado en deformaciones, se puede dibujar una curva en el espacio de las tensiones principales, a esta curva es la que se conoce como curva límite de conformado en tensiones (FLSC).

De igual manera que la FLC, la FLSC divide el espacio de tensiones en dos zonas: una segura y otra de fallo; es decir el FLSC separa los estados de tensiones que darían lugar al fallo de la chapa de los que no. La principal ventaja del FLSC frente al FLC es que parece ser menos sensible al camino de deformación con el que se llega a un estado tensional en concreto, así lo indican los estudios de Stoughton (2011) con chapas predeformadas. Puede apreciarse en las siguientes gráficas como la FLC de la chapa sin predeformar (en rojo) difiere de aquella predeformada (en azul); sin embargo para el caso de FLSC ambas prácticamente coinciden:

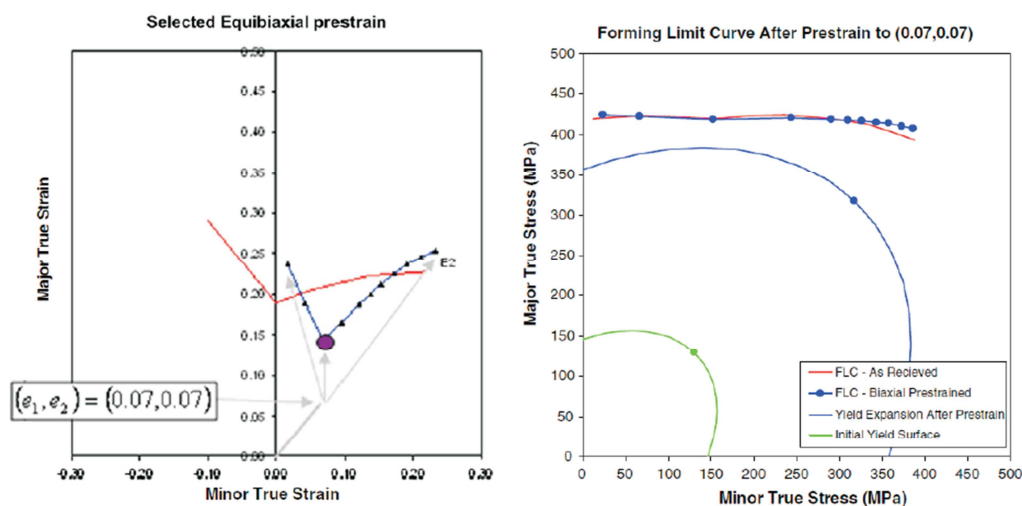


Fig. 19. Curvas límite de conformado en deformaciones (izquierda) y en tensiones (derecha) en chapas de aluminio 2008-T4 sin predeformar y predeformadas (Stoughton y Yoon, 2011)

Es importante hacer notar que el proceso de transformar la FLC a FLSC, es decir, pasar de un espacio de deformaciones a uno de tensiones; dependen del criterio de plastificación y el modelo de endurecimiento considerados para el material en estudio.

Inicialmente las curvas FLSC se representaban en un espacio de tensiones principales σ_1 y σ_2 . Esto puede resultar representativo en el caso de que se cumpla la hipótesis de tensión plana, es decir, que los valores de σ_3 sean secundarios o despreciables respecto a σ_1 y σ_2 . Sin

embargo, la mayoría de los procesos presentan estados tridimensionales de tensiones donde las tensiones σ_3 son relevantes. Un ejemplo de ello son las presiones de contacto elevadas que se producen al usar punzones de radio pequeño. Por ello se considera que en los casos mencionados deben tenerse en cuenta las tensiones transversales a la chapa. De este modo, se ha propuesto (Stoughton, 2008) representar la curva FLSC en el espacio definido por $\sigma_1 - \sigma_3$ y $\sigma_2 - \sigma_3$. Es esta última representación del FLSC la que se usará en el presente proyecto.

En estudios recientes como los de van den Boogaard (2010) o Emmens (2011) se pone de manifiesto que la existencia de una tensión transversal de compresión en el espesor favorece el aumento de la conformabilidad. El estudio teórico de Hashemi y Abrinia (2013) sobre chapas predeformadas y que verifican con resultados experimentales de estudios previos muestra como la curva FLC presenta un desplazamiento hacia arriba y ligeramente a la derecha al aumentar la presión. Este hecho se aprecia en la siguiente figura donde se muestran los resultados de un acero con bajo contenido de carbono ST12:

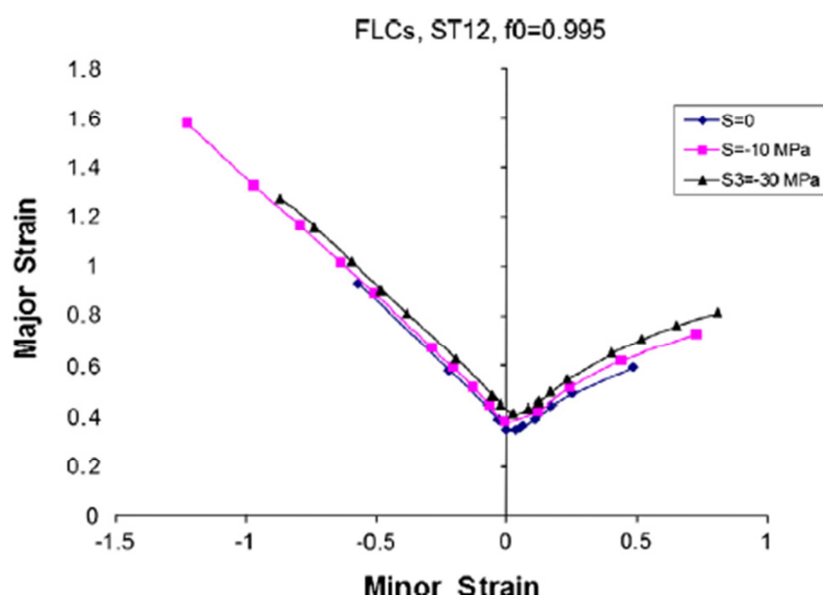


Fig. 7. The influence of the through-thickness compressive normal stress on prediction of the traditional FLCs.

Fig. 20. Influencia de la tensión normal en acero de bajo contenido en carbono ST12 (Hashemi, 2013)

Puede observarse como en la zona de deformación plana es donde las curvas se encuentran más cercanas. En ese caso tenemos una variación del orden de 5%.

En el caso del estudio de Liu (2011) sobre tubos con presión hidrostática por ambas caras, los resultados se orientan en la misma dirección. La aplicación de la presión aumenta la conformabilidad del aluminio AA6111-T4 estudiado, como se muestra en la siguiente gráfica extraída del artículo:

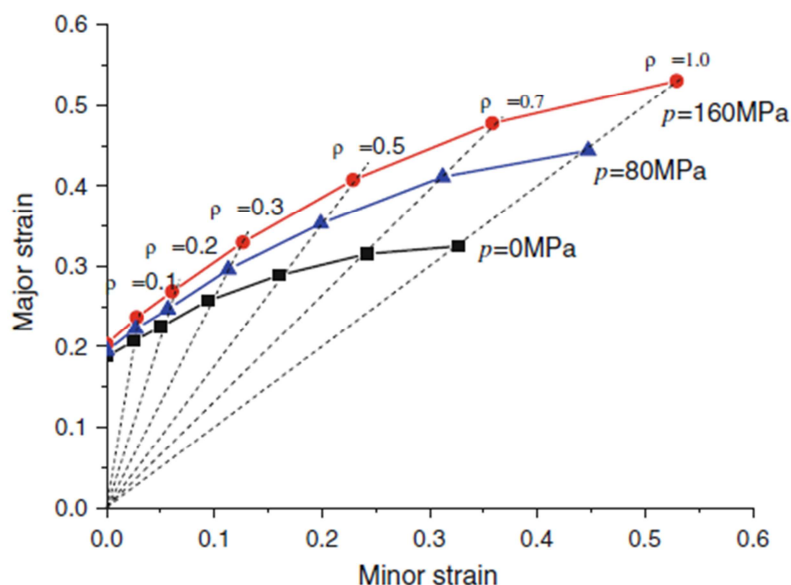


Fig. 7 Influence of double-sided pressure on FLDs

Fig. 21. Influencia de presión hidrostática por ambas caras en tubos de Aluminio AA6111-T4 (Liu, 2011)

Al igual que en el estudio de Hashemi, en la zona de deformación plana es donde menores variaciones se presentan.

Por su parte Emmens en 'Formability: A review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal' (2011) indica que la presencia de tensiones de contacto tiene dos efectos:

- 1) Por un lado reduce la tensión de plastificación, es decir, es necesario un menor nivel de tensiones para producir deformación plástica. Esto puede verse fácilmente si consideramos el criterio de plastificación de Tresca: $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_Y$, ya que por efecto del contacto tenemos una σ_3 negativa y la tensión σ_1 necesaria será menor.
- 2) Por otro lado, la conformabilidad, entendida como el nivel de deformaciones en el que se inicia la estricción, aumenta.

Emmens recapitula sobre el segundo efecto y finalmente concluye que es necesario un elevado nivel de tensiones a través del espesor para lograr un aumento significativo de la conformabilidad. Esto último puede ser difícil de alcanzar con contactos por una sola cara de la chapa. En el siguiente gráfico obtenido analíticamente suponiendo una tensión σ_3 constante en el espesor y proporcional a σ_1 según el parámetro $q = -\sigma_3/\sigma_1$, puede verse como, al igual que los estudios comentados anteriormente, la conformabilidad aumenta con la tensión transversal:

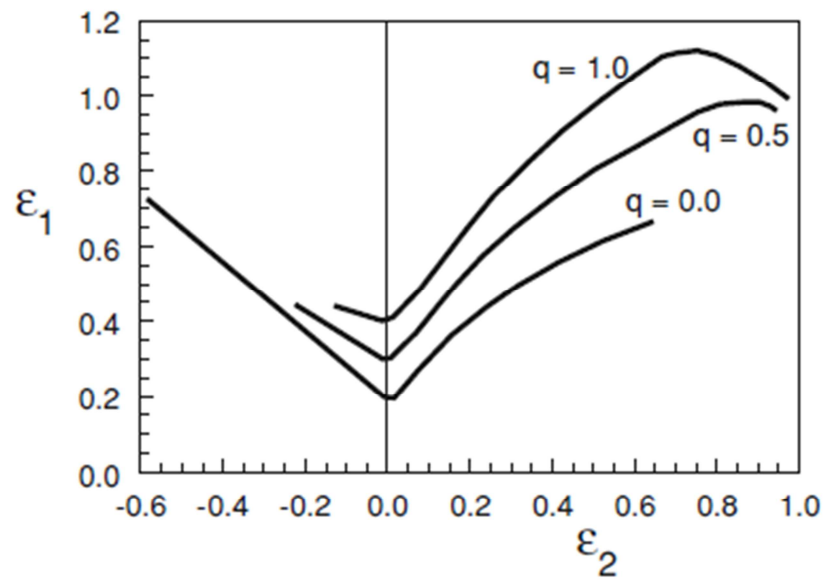


Fig. 22. Efecto de la tensión en el espesor en el diagrama FLD según el parámetro $q = -\sigma_3/\sigma_1$ (Emmens, 2011)

El objetivo del presente proyecto fin de carrera es comprobar si los anteriores estudios y sus predicciones se cumplen para una aleación de aluminio 7075-O que se va a ensayar mediante un modelo de elementos finitos y a la que se va a aplicar una presión en la cara exterior con objeto de generar un gradiente de tensiones en el espesor.