

# 1 Introducción

Los procesos de conformado de chapa se usan extensivamente en la industria para fabricar carrocerías de automóviles, fuselaje de aeronaves, revestimientos de electrodomésticos, etc...Concretamente, el estirado de chapa es un proceso de conformado por deformación plástica consistente en la sujeción de la chapa por sus extremos mediante unas herramientas denominadas prensa-chapas y una posterior aplicación de presión mediante un punzón de forma a fin de reproducir la geometría deseada. El movimiento del punzón hasta su posición final suele ser vertical hacia arriba y puede venir acompañado de un movimiento simultáneo horizontal de separación de los prensa-chapas entre sí. Cuando las herramientas alcanzan su posición final la chapa ha sido deformada plásticamente con la forma del punzón. La posición final del punzón se debe determinar cuidadosamente a fin de no alcanzar en ningún punto de la chapa las deformaciones límite del fallo. Para establecer la geometría de una pieza que se desea fabricar de forma satisfactoria a partir de una chapa de un determinado material, resulta esencial conocer el límite hasta el cual el material puede ser conformado sin que se produzca ningún tipo de fallo. Este límite de conformado depende, además del cambio en la geometría de la pieza y de las condiciones del proceso, de la capacidad que tiene el material para ser deformado. Dicha capacidad es lo que se conoce como conformabilidad.

Los mecanismos de fallo más habituales en estos procesos son la aparición de estricción localizada y/o fractura dúctil en el material, generalmente iniciados en zonas de pequeños radios y con fuerte gradiente de deformaciones en el espesor. La aparición de uno u otro mecanismo de fallo depende del estado de deformaciones en la chapa y de la ductilidad del material. De hecho, en materiales muy dúctiles el fallo ocurre habitualmente con la aparición de estricción localizada, instante a partir del cual el material comienza a reducir inestablemente su espesor bajo condiciones cercanas a deformación plana, culminando el proceso con la fractura dúctil. Lógicamente, en este tipo de materiales, el comienzo de la inestabilidad plástica es el instante en que el material falla pues a partir de ese instante se desarrolla un proceso inestable y pasa a ser inadecuado funcionalmente. En cambio, en materiales poco dúctiles, como es el caso de algunas aleaciones de aluminio con tratamientos térmicos típicas de la industria aeronáutica,

la fractura puede preceder al proceso de estricción. En estos casos la capacidad de conformado de la chapa viene controlada por mecanismos de fractura dúctil.

El análisis y predicción del conformado de chapa es fundamental para la optimización de los procesos de estirado y para evitar problemas de producción. Las mejoras de productividad en los procesos de conformado de chapa se consiguen mediante una correcta especificación en la fase de diseño de la geometría de la pieza, los parámetros del proceso, el diseño de las herramientas y las propiedades del material. Hace décadas, en la práctica se utilizaban las experiencias anteriores y métodos de ensayo y error para obtener los procedimientos adecuados para la fabricación de productos de chapa y para determinar los límites de conformado de diferentes materiales en distintos procesos de conformado. Estos métodos son claramente ineficientes, especialmente cuando los lotes son pequeños y se realizan cambios constantes de la geometría de la pieza o de las propiedades del material. En la actualidad, se han comenzado a emplear modelos analíticos y/o experimentales capaces de predecir el fallo de la chapa.

## 1.1 Antecedentes

A fin de caracterizar la capacidad de conformado ó conformabilidad de una chapa metálica, se emplea una herramienta conocida como el diagrama límite de conformado (DLC). Dicho DLC consiste en un gráfico donde se representa la deformación principal mayor en el plano frente a la menor, y una curva, conocida como curva límite de conformado (CLC), que define la frontera entre zonas en las cuales el proceso puede desarrollarse de forma segura, esto es, sin aparición de ningún mecanismo de fallo, y zonas inseguras en las que se produce el fallo de la chapa. En la práctica convencional se modifica el diseño de la matriz o punzón o el proceso de conformado hasta que las deformaciones en todos los puntos de la chapa estén dentro del margen de seguridad que proporciona la CLC. En la práctica existen dos curvas límite bien diferenciadas, aquella relacionada con el comienzo de la estricción (CLCE) y la referente al fallo por fractura (CLCF). Por ello, la correcta caracterización de la conformabilidad de un material requiere la determinación precisa del inicio de la estricción (CLCE) y por otro lado la obtención de las deformaciones en fractura (CLCF). Obviamente, se entiende que es bastante más compleja la detección del instante en que las deformaciones se localizan y comienza la estricción.

El efecto e influencia de la flexión en el conformado de chapas fue puesto de manifiesto por Ghosh y Hecker (1974). Estos autores señalaron que la CLC obtenida de procesos de estirado en el plano queda por debajo de la correspondiente a procesos de estirado con punzones de forma, lo cual puso de manifiesto una dependencia de la CLC con la curvatura de la chapa. Por

otro lado, Charpentier llegó a conclusiones similares. Sin embargo, históricamente los modelos analíticos de fallo en chapas se han formulado suponiendo un estado de deformaciones uniforme en la misma. La existencia de un gradiente de deformaciones se tiene usualmente en cuenta tomando tensiones/deformaciones medias en el espesor de la chapa. Esta corrección tan simplista, a veces denominada Regla del Plano Medio (Mid-Plane Rule), proporciona en general resultados muy conservadores [Tharrett & Stoughton, 2003].

No obstante, actualmente el número de trabajos dedicados a caracterizar la influencia de la flexión en el fallo de chapas metálicas es insignificante en comparación con el número de artículos en el campo del conformado de chapa. De hecho, es el terreno intermedio, esto es, donde se mezclan flexión y tracción a un mismo nivel, donde el conocimiento es más disperso. En estos casos, los mecanismos de estricción localizada y de fractura dúctil actúan a la par lo que hace necesario definir claramente el acoplamiento entre ambos y distinguir bajo que condiciones domina uno sobre el otro. Los avances actuales apuntan claramente a la necesidad de distinguir entre dos tipos de fallo, en función de la severidad del gradiente de deformaciones: un Fallo controlado por Estricción y un Fallo controlado por Fractura. Ambos están controlados por fibras o volúmenes de material diferentes en el espesor de la chapa. En efecto, el primero parece estar gobernado por la estricción de las fibras menos alargadas de la sección. En cambio, el segundo está claramente controlado por la fractura dúctil del volumen de material situado en la cara más externa de la zona de plegado. Estos conceptos han sido recientemente discutidos por diferentes autores [Stoughton, 2008; Huang et al., 2008; Kitting et al. 2008; Vallellano et al., 2008], estableciendo un adecuado marco de trabajo para la caracterización del efecto combinado tracción-flexión en los procesos de conformado de chapa metálica. Los modelos de predicción de fallo en estas condiciones son escasos y en general se restringen a estirados con flexión en condiciones de deformación plana, esto es, con una sola curvatura en la chapa.

Este panorama se traslada también a los métodos experimentales para la detección del inicio de la estricción, aspecto que como se ha indicado anteriormente es bastante complejo. En esta línea es cierto que desde la aparición del conocido método de Bragad et al. (1972) se han puesto a punto un cierto número de técnicas experimentales para este fin, algunas de las cuales serán aquí discutidas. Además, recientemente se ha hecho un gran esfuerzo en normalizar la determinación de la estricción localizada para la obtención de los DLC en casos con radios de curvatura grandes y con poca influencia de la flexión (ISO12004-2:2008). Dicha normativa establece un método para estimar el inicio de la estricción basado en el análisis de la distribución de deformaciones en una sección perpendicular a la zona de fractura justo en el instante anterior a la aparición de la misma. Sin embargo, la principal carencia del método de la norma y de los anteriores existentes es que no son directamente aplicables a casos con radios pequeños, en los que la zona de deformación se reduce a medida que disminuye el radio del

punzón y se hace más severo el gradiente de deformación a través del espesor de la chapa. Dichas metodologías están concebidas y optimizadas únicamente para casos sin gradiente o gradientes muy suaves, p.e. ensayos tipo Marciniak o Nakajima. En cualquier caso, se puede resaltar un trabajo reciente presentado por Kitting et al. (2009) en un congreso, el cual propone una metodología experimental para la determinación de las deformaciones límite para el comienzo de la estricción. Sin embargo, dicho trabajo no está aun consolidado y presenta algunas deficiencias en la física del criterio que establece.

Por otro lado, con el uso cada vez más generalizado de las técnicas de correlación de imágenes digitales (DIC) es posible plantear métodos experimentales alternativos adecuados para casos con flexión, que estimen el instante de la estricción y su deformación analizando la evolución temporal de las deformaciones en la zona de fallo. La norma ISO 12004-2:2008 se refiere a estos métodos como métodos dependientes del tiempo (time-dependent method), aunque no propone ninguno. De hecho, el artículo de Martínez A.J. et al. (2008), propone una metodología robusta y fiable para detectar el inicio de la estricción localizada en situaciones de fuerte gradiente de deformación a través de espesor, mediante el análisis temporal de las deformaciones, empleando la citada técnica de correlación de imágenes digitales. Dicho artículo presenta parte del trabajo desarrollado en esta memoria.

Estas carencias detectadas en el plano de la predicción analítica del fallo y sobre todo en la parte experimental de la misma, son la hipótesis de partida y la motivación para el desarrollo del presente trabajo.

## 1.2 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo general contribuir a mejorar el conocimiento experimental sobre el efecto combinado tracción-flexión en el fallo de chapas metálicas, a fin de optimizar los procesos de fabricación empleados en el conformado de las mismas a través de una determinación precisa de las curvas límites de conformado CLCE. Dicho objetivo se materializa en las siguientes partes:

- 🔍 Revisión y análisis de las metodologías existentes en la literatura para la detección del inicio de la estricción tanto para procesos con un suave gradiente de deformación a través del espesor (orientado a ensayos Nakajima y Marciniak) como para aquellos con severos efectos de la flexión en zonas localizadas. Dichas metodologías engloban métodos dependientes del espacio y del tiempo.

- ✚ Propuesta de una metodología robusta y fiable para la detección del inicio de la estricción localizada y estimación de las deformaciones límite en condiciones con fuertes y leves gradientes de deformación. Dicha metodología tiene una base física apropiada, a diferencia de los métodos existentes, y estará basada en el análisis de la evolución temporal de las deformaciones en la cara exterior del espécimen (time-dependent method).
- ✚ Puesta a punto de un sistema de imágenes comercial, ARAMIS<sup>®</sup>, basado en las técnicas de correlación, para la evaluación de la historia de deformaciones en tiempo y espacio en la zona de proceso.
- ✚ Generación de un nutrido número de experimentos bajo diversas condiciones controladas de tracción-flexión (stretching and stretch-bending tests) que permitan caracterizar el proceso de fallo, la validación de la metodología temporal propuesta en todos los casos y la demostración de la incapacidad de los métodos existentes hasta el momento para predecir, con validez general, el inicio de la inestabilidad plástica.
- ✚ Propuesta de otra metodología alternativa, denominada método del Valle, basada en la materialización física del proceso de estricción. Dicha metodología se encuadra dentro de los métodos “time-position-dependent method”.

