

# EVOLUCIÓN DE LOS CRITERIOS DE CONFORMABILIDAD DE CHAPAS METÁLICAS PARA ESTAMPADO

**Palabras clave:** conformado, embutido, estirado, doblado, conformabilidad.  
**Key words:** Forming, Stamping, Deep drawing, Stretching, Bending, Formability.

Las operaciones de estampado de chapas metálicas son muy comunes en la industria productora de artículos electrodomésticos y en la automotriz. La conformabilidad de estas chapas es un factor decisivo en el éxito o fracaso de las operaciones mencionadas. En el presente trabajo se analizan las sollicitaciones mecánicas a las que están sometidas las chapas durante su conformado y las propiedades que debe tener el material para soportarlas sin llegar a la fractura. Se describen además los ensayos más relevantes para cuantificar esas propiedades y la evolución histórica de los criterios de aceptación de chapas para estampado.

Se reseñan, por último, las actividades desarrolladas en este campo en el Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica de la Universidad Nacional del Sur.

■ **Lucio Iurman,  
Alberto O. Lucaioli,  
Luis Guillermo Bergé y  
Jorge W. Insausti**

Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.

Sheet-metal working processes are very common in domestic and automotive industries. The formability of these sheets is a decisive factor for the success or failure of the above mentioned processes. In the present paper the mechanical stresses on the sheets during their forming and the properties the material needs to have to support those stresses without reaching the failure are analyzed. The most relevant tests to quantify those properties and the historical evolution of the acceptability criteria for stamping sheets are described.

At the end, the activities developed in this area at the Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica de la Universidad Nacional del Sur are briefed.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los laminadores continuos modernos producen grandes cantidades de hojas metálicas delgadas a bajo costo. Una parte sustancial de todas las aleaciones metálicas, fundamentalmente aceros, aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre, son producidas como chapas laminadas en caliente o en frío.

Este material está destinado a procesos secundarios de conformado mediante los cuales se convierte

una chapa plana en una pieza de forma deseada, sin que se produzca la fractura de la misma ni un adelgazamiento localizado excesivo.

Estos procesos son ampliamente utilizados en la industria productora de artículos electrodomésticos, componentes de máquinas y equipos y en gran escala, en la producción de autopartes y componentes de carrocería.

En la figura 1 se muestran fotografías del resultado de las operacio-

nes de un tipo particular de conformado que es el estampado.

A fines de la década de 1960 varios integrantes del Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica de la Universidad Nacional del Sur habían iniciado investigaciones en el comportamiento mecánico de los metales, con fuerte impronta hacia la transferencia de tecnología. Su desarrollo dependía de dos elementos imprescindibles: antecedentes para conocer el estado del arte y elementos para realizar



**Figura 1:** Piezas de chapas metálicas estampadas.

las necesarias experiencias de laboratorio. Afortunadamente hemos podido contar con ambas cosas y por eso hemos logrado continuar trabajando por más de 40 años construyendo, investigando, enseñando y prestando servicios, contribuyendo así a la evolución de los criterios de conformabilidad de chapas metálicas. Por eso nos pareció apropiado que en este trabajo también describiéramos esa labor la que se puede encontrar resumida en el anexo.

Para que una operación de estampado se realice con éxito, es necesario controlar los siguientes aspectos:

- Disponer de un herramienta apropiado.
- Operar en condiciones adecuadas de lubricación.
- No superar los límites de conformabilidad del material que se estampa.

A continuación se analiza el efecto de este último parámetro en las operaciones industriales de estampado.

## 2. OPERACIONES DE ESTAMPADO

Las operaciones de estampado que se realizan en la industria son

muy complejas de analizar desde del punto de vista de la teoría de la plasticidad por cuanto el estado de tensiones a que está sometida la chapa no es estacionario. Puntos distintos sufren deformaciones diferentes durante el transcurso de la operación y pueden variar si se alteran algunas condiciones como por ejemplo la lubricación.

En los últimos setenta años numerosos investigadores se abocaron a dilucidar este aspecto y actualmente se ha reducido mucho el estado de confusión e incertidumbre acerca de la relación entre las propiedades del material a ser estampado y los diferentes tipos de operaciones industriales, ampliando y asegurando las posibilidades de éxito de las mismas

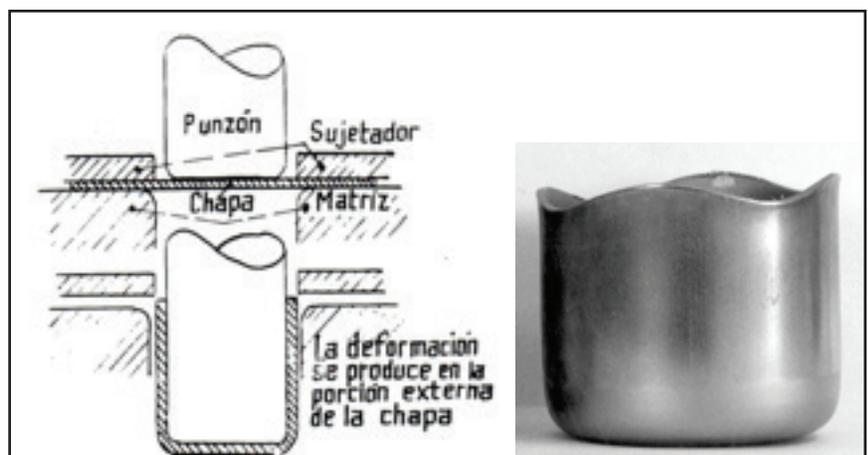
(Wright, 1961).

Los tipos principales de deformación involucrados en el estampado de chapas metálicas son (Duckworth et al., 1969):

- Embutido
- Estirado
- Doblado

### **2.1. Embutido.**

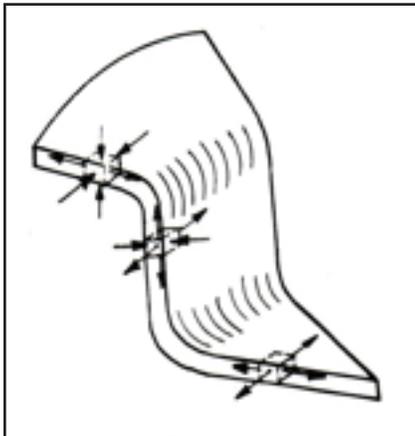
En el embutido, una chapa metálica es transformada en un recipiente o forma tridimensional sin cambio apreciable de espesor. En la figura 2 se esquematiza dicha operación en su forma más simple que consiste en



**Figura 2:** Operación de embutido puro.

el embutido de una copa circular.

A medida que el punzón avanza, la parte exterior de la chapa es obligada a introducirse en la matriz. Se crea así un estado de tensiones propio de esta operación que se muestra en la figura 3 y que pone de manifiesto la dificultad del estudio del proceso de embutido. El fondo y la pared de la copa están sometidos a un estado de tracción biaxial mientras que el ala del recipiente que se va formando, que es el material que debe deformarse, lo hace bajo esfuerzos combinados de tracción y de compresión. Al pasar el material por el radio del punzón y sucesivamente por el de la matriz sufre flexiones y deflexiones (Honeyman, 1957).

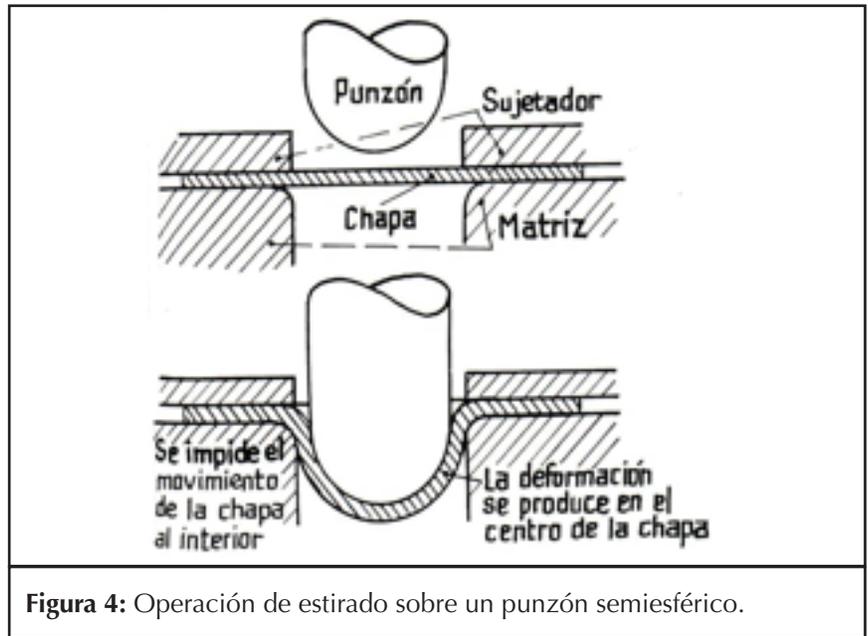


**Figura 3:** Tensiones actuantes en un proceso de embutido puro.

Se desprende del análisis anterior que para que la operación se lleve a cabo en forma exitosa, la pared del recipiente a formarse debe ser capaz de transmitir, sin romperse, la fuerza necesaria para que la porción exterior de la chapa se introduzca en la matriz.

## 2.2. Estirado.

En este caso la chapa es sometida a un estado de tensiones que puede consistir en tracción uni o biaxial. La figura 4 ilustra un ejemplo de esta operación.



**Figura 4:** Operación de estirado sobre un punzón semiesférico.

Se ve en la figura que la parte exterior de la chapa no penetra hacia el interior de la matriz. La deformación tiene lugar casi con exclusividad sobre el punzón. Hay un importante adelgazamiento del espesor de la chapa. No aparecen aquí las tensiones de compresión propias del embutido.

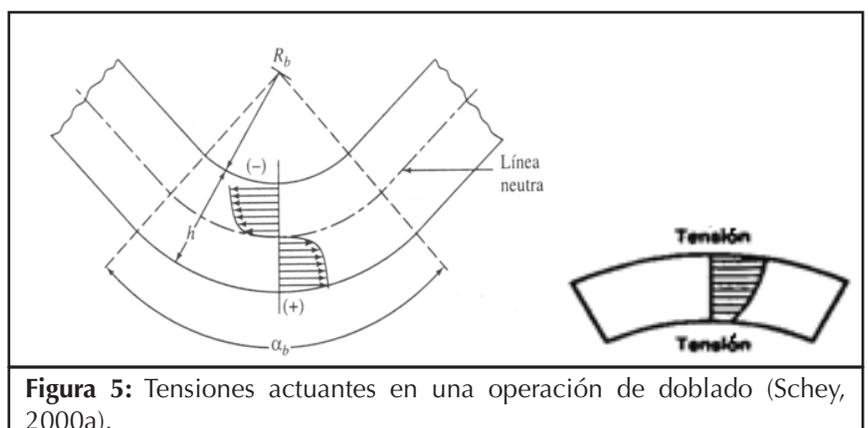
## 2.3. Doblado.

En esta operación se varía el radio de curvatura de una pieza. El estado de tensiones que se induce de este modo en una chapa varía desde tracción en la fibra externa a compresión en la interior. Existe una zona intermedia en que la tensión es nula. La distribución de tensiones

puede alterarse si se superpone al doblado un estado de tracción. En este caso las tensiones se suman pudiendo llegar a anularse las de compresión. Este estado de cosas es común en el conformado de chapas para eliminar el pandeo que puede corrugar la parte de material sometido a compresión.

## 2.4. Operaciones industriales de estampado.

En las operaciones industriales de estampado se hallan presentes en grado variable los tres procesos básicos descritos. Resulta difícil predecir con exactitud en qué proporción intervienen cada uno de ellos. A veces se introduce deliberadamente cierta



**Figura 5:** Tensiones actuantes en una operación de doblado (Schey, 2000a).

cantidad de estirado para asegurar la obtención de la forma del producto de manera más económica o con mejores características mecánicas. En otros casos, variaciones provocadas o accidentales en alguno de los parámetros del proceso hacen que predomine uno u otro tipo de tensiones. Así, por ejemplo, un aumento en la presión del sujetador (a los efectos de evitar el ondulado de la chapa provocado por los esfuerzos de compresión en el embutido) es causa de que el proceso se aproxime a condiciones típicas del estirado. Lo mismo ocurre si se disminuye el radio de la matriz, si aumenta el radio del punzón o si se mejora la lubricación entre chapa y punzón. Lo contrario sucede cuando la lubricación entre chapa y matriz es más efectiva (Lloyd, 1962).

Es importante la estimación de embutido, estirado y doblado que intervienen en la elaboración de una pieza por cuanto incide en el énfasis que se ha de poner sobre las propiedades mecánicas que se deben requerir a la chapa para que el proceso industrial sea exitoso.

### 3. ANÁLISIS DE LA CONFORMABILIDAD DE CHAPAS METÁLICAS

La conformabilidad es la propiedad que asegura el éxito de una operación de deformación plástica cualquiera, en este caso el estampado. Con este término se describe la capacidad de un material de ser deformado en una forma prefijada. Obviamente es, junto con el costo, la propiedad que más interesa a usuarios y fabricantes de chapa metálica para estampado. Los primeros tratan de especificar los niveles que deben alcanzarse para cada aplicación y han de poder efectuar los ensayos de recepción correspondientes. Los segundos deben adecuar sus procesos de fabricación para obtener los niveles especificados por los

usuarios de sus productos. Ambos están interesados en que la chapa metálica tenga el máximo de conformabilidad (Keeler, 1968).

Esta propiedad es, al menos "a priori", difícil de evaluar en el caso de procesos de estampado. Resulta evidente que distintos lotes de chapas, tienen un mejor o peor comportamiento para un determinado proceso. Se necesita entonces alguna guía capaz de predecir este comportamiento valiéndonos de un ensayo o una serie de ensayos que permitan distinguir entre un material de una buena conformabilidad para el proceso en cuestión de otro que no se adapte tanto al mismo.

En esta reseña se señalan algunas ideas básicas en las que los metalurgistas interesados en el tema han logrado un acuerdo razonable.

Para ello, empezaremos por analizar el tipo de conformabilidad que requiere cada una de las operaciones básicas de estampado indicadas en el punto anterior y se describirán algunos de los ensayos propuestos.

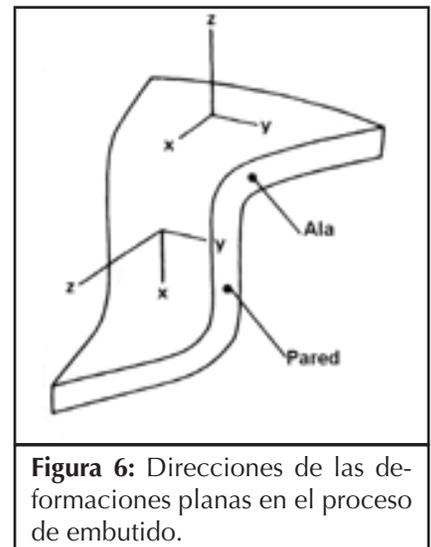
#### 3.1. Conformabilidad de chapas en embutido profundo.

Como se ha visto, durante el embutido de una copa metálica la pared de la misma debe soportar la tensión de tracción necesaria para que la parte externa del disco se introduzca en el interior de la matriz. Si la pared no es suficientemente resistente deforma por tracción, disminuye su espesor y puede llegar a la rotura.

Por otra parte, el material que se va acercando a la boca de la matriz debe deformarse en su propio plano, de manera que arcos de circunferencias trazados en el mismo disminuyen su longitud (comprimiéndose) a medida que procede el embutido.

Despreciando el pequeño efecto de aumento de espesor en la porción de material que aún no ha embutido, se está en presencia de dos procesos de deformación plana, entendiéndose por tal aquella en la cual no existe deformación en alguna de las tres direcciones posibles.

Una de estas deformaciones planas se produce en la región anular donde se puede considerar  $d\epsilon_z = 0$  (ver figura 6). Si bien en el campo plástico de deformación de los metales se trabaja con incrementos de deformación, cuando se mantiene la misma relación entre los incrementos durante todo el proceso se permite trabajar con deformaciones totales.



**Figura 6:** Direcciones de las deformaciones planas en el proceso de embutido.

En la pared de la copa, por otra parte, el punzón impide una disminución en la circunferencia de la misma. Hay por lo tanto, en este caso, deformación plana con  $d\epsilon_y = 0$  (Hosford et al., 1964). O sea, existen dos procesos de deformación plana simultáneos en dos regiones distintas del material que tienen lugar en planos diferentes. Conviene entonces que el primero de ellos, o sea el que se produce en la región anular, prosiga con mayor facilidad para que, a causa del segundo, la pared

de la copa no se adelgace tanto como para llegar al punto de rotura.

Por lo tanto, el hecho que un material embuta mejor que otro no depende simplemente de que tenga una mayor ductilidad (propiedad que le permitiría deformar en el plano y en el espesor hasta llegar eventualmente a la rotura en esta última parte) ni de que sea más duro o más blando. Un material embute mejor si su capacidad de deformarse en el plano de la chapa es mayor que la de deformarse según el espesor de la misma. O sea, si posee una determinada anisotropía. Éste es uno de los conceptos fundamentales para la comprensión, desde un punto de vista conceptual, de la conformabilidad que se debe requerir a las chapas para un embutido profundo (Lankford et al., 1950).

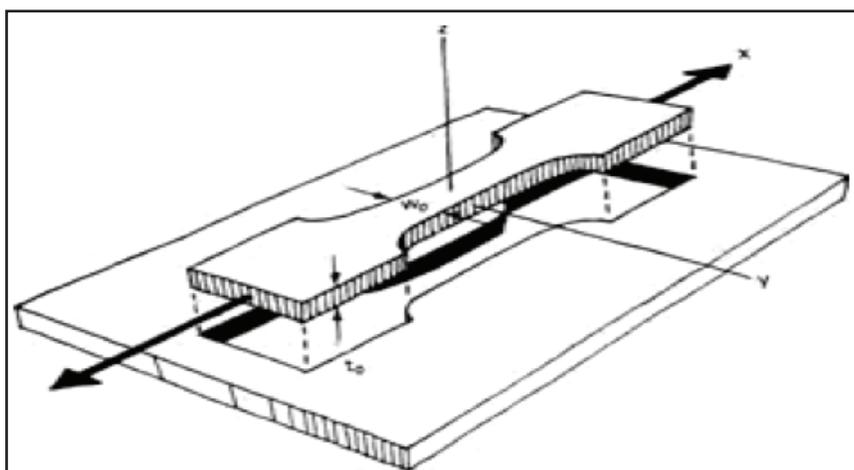
En un ensayo de tracción uniaxial se aplica una tensión en una sola dirección, por ejemplo: x. Habrá por lo tanto un alargamiento en esa dirección. En las otras dos direcciones perpendiculares: y y z las tensiones son iguales y nulas. Como la deformación plástica se caracteriza por mantener el volumen constante, si existe un alargamiento en una dirección deberá haber necesariamente acortamientos en otras. El incremento de volumen en una pieza que se deforma está dado por la relación

$$d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z \quad (1)$$

En un material isótropo, el incremento de deformación  $d\varepsilon_y$  será igual a  $d\varepsilon_z$  puesto que en ambas direcciones las tensiones son iguales cosa que no ocurrirá en un material anisótropo. Además, dado que el volumen de la pieza permanece constante el resultado de la expresión (1) debe ser necesariamente igual a cero y en un material isótropo ambas deformaciones perpendiculares a la tensión aplicada serán

$$d\varepsilon_y = d\varepsilon_z = -d\varepsilon_x/2 \quad (2)$$

Esta igualdad (2) no se cumplirá en un material anisótropo por lo que el ensayo de tracción resulta de suma utilidad para medir la anisotropía de una chapa por medio del análisis de la relación entre las deformaciones en las direcciones y y z o sea en el plano y en el espesor de la chapa como se muestra en la figura 7.



**Figura 7:** Extracción de una probeta para el análisis de la anisotropía (Hosford et al, 1993).

A la relación de la deformación en ancho sobre la deformación en espesor se la designa R ( $R = \varepsilon_y/\varepsilon_z$ ). Se indican las deformaciones totales dado que, como se verá más adelante, la relación entre las mismas se mantiene constante durante todo el proceso de tracción uniaxial hasta la estricción. Al parámetro R se lo conoce como factor de anisotropía o parámetro de Lankford. Para materiales isótropos su valor es la unidad y cualquier apartamiento de la misma nos indica la existencia de anisotropía (Thomsen et al., 1965; Hill, 1950).

En chapas metálicas conviene distinguir la anisotropía en la dirección normal al plano de la chapa de la anisotropía en el plano de la misma. La primera conocida como

“anisotropía normal” se mide con el coeficiente R. La segunda, “anisotropía planar”, es la que provoca una variación en las propiedades mecánicas de la chapa medidas en direcciones diferentes en su plano. Se pone de manifiesto extrayendo probetas que formen distintos ángulos respecto de la dirección de laminación. Esta direccionalidad planar no es en general conveniente.

De lo expuesto hasta aquí surge que las mejores condiciones para embutido puro con simetría axial la tendrá una chapa que tenga una fuerte anisotropía normal (alto valor de R) acompañada de isotropía planar.

### 3.2. Conformabilidad de chapas en operaciones de estirado.

En las operaciones que involucren solamente estirado de la chapa interesa que el material sea capaz de sufrir una deformación uniforme lo más elevada posible antes de que aparezca la inestabilidad plástica y la rotura.

En la tracción uniaxial se somete a la probeta (una barra cilíndrica de sección constante o bien una chapa

de ancho calibrado) a una fuerza de tracción unidireccional y se miden los alargamientos que se producen. Si se grafican las cargas y los desplazamientos del material se obtiene una curva como la indicada en la figura 8. Dividiendo la fuerza por la sección transversal original de la probeta y los alargamientos por la longitud original la curva se transforma en lo que se conoce como *curva ingenieril tensión-deformación*.

Al principio el material presenta un comportamiento elástico, sobreviene el punto de fluencia y empieza la deformación plástica con endurecimiento del material y por ello cargas crecientes para proseguir la deformación que es macroscópicamente homogénea.

O sea, la probeta se alarga y, por efecto Poisson en el rango elástico y por constancia de volumen en el plástico, disminuye su sección transversal. Una vez alcanzada la carga máxima se produce una estricción, la deformación se localiza y la sección disminuye rápidamente. Por ese motivo, la carga también disminuye y sobreviene la rotura de la probeta.

Cuando la deformación es apreciable ya no resulta conveniente trabajar con tensiones y deformaciones ingenieriles y es necesario hacerlo con tensiones y deformaciones reales lo que implica referir ambas a las condiciones instantáneas.

La aparición de la estricción, que se conoce también como inestabilidad plástica, da lugar a un cambio localizado de espesor que es indeseable en piezas finales.

La estricción generalmente empieza en la carga máxima durante la deformación por tracción de un metal dúctil. Un material plástico ideal en el que no se produjera endurecimiento por deformación se volvería

inestable en tracción y comenzaría a formar estricción en cuanto tuviera lugar la fluencia. Sin embargo, un metal real presenta endurecimiento por deformación que tiende a aumentar su capacidad de soportar cargas a medida que se incrementa la deformación. Este efecto se opone a la disminución gradual de la sección transversal de la probeta a medida que ésta se alarga. La estricción o deformación localizada (en realidad se trata de estricción difusa) empieza en la carga máxima donde el incremento en la tensión debido a la disminución de la sección transversal de la probeta se hace mayor que el aumento en la capacidad de soportar cargas provocado por el endurecimiento por deformación del metal. Esta condición de inestabilidad que conduce a la estricción se define mediante la relación  $dP=0$ .

$$P = \sigma A \tag{3}$$

$$dP = \sigma dA + A d\sigma = 0 \tag{4}$$

Los dos términos de la ecuación anterior expresan la contribución de

la sección transversal  $A$  y de la resistencia del material  $\sigma$  a soportar la carga aplicada. Por lo dicho precedentemente, la variación de sección  $dA$  es negativa y por lo tanto implica un ablandamiento geométrico mientras que  $d\sigma$  es un factor positivo dado por el endurecimiento del material al ser deformado plásticamente.

Por constancia de volumen:

$$\frac{dL}{L} = -\frac{dA}{A} = d\epsilon$$

y por las condiciones de inestabilidad:

$$-\frac{dA}{A} = \frac{d\sigma}{\sigma} \tag{5}$$

de modo que en el punto de inestabilidad por tracción:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \tag{6}$$

Se puede expresar la curva tensión-deformación de muchos metales en la región de deformación

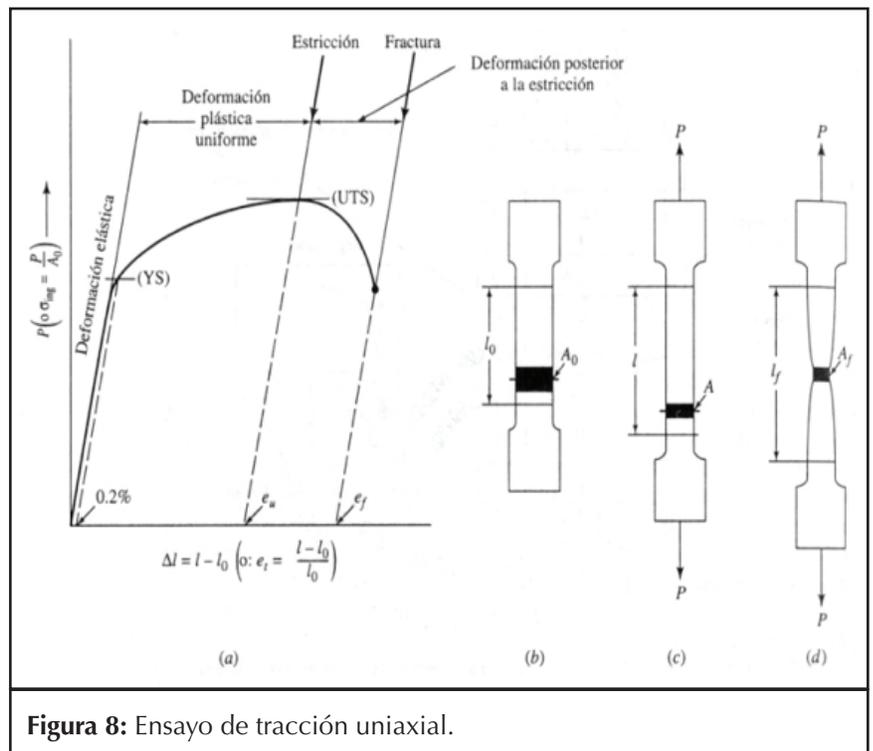


Figura 8: Ensayo de tracción uniaxial.

plástica uniforme mediante la relación simple debida a Hollomon (Yoshida et al., 1971):

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (7)$$

donde  $s$  y  $e$  son las tensiones y deformaciones reales o sea referidas a la sección transversal y a la longitud instantáneas. En la ecuación anterior:  $n$  es el *exponente de endurecimiento por deformación* y  $K$  el *coeficiente de resistencia*.

Si se reemplaza  $s$  de la expresión (7) en (6) se obtiene que la máxima deformación uniforme está dada por:

$$\varepsilon_u = n \quad (8)$$

Cuando el estirado es biaxial, como ocurre en la mayor parte de los procesos industriales, la relación que marca el paso de un estado de deformación uniforme a la inestabilidad es:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{Z}$$

Donde  $Z$  es un factor que depende de la relación de las tensiones de tracción aplicadas. En el caso extremo de una tracción biaxial equilibrada o sea aquella en que las dos tracciones aplicadas sean iguales  $Z$  toma el valor 2. Esto explica por qué en tracción biaxial se alcanzan valores de deformaciones uniformes mayores que en la uniaxial.

En este caso la máxima deformación uniforme es  $\varepsilon_u = 2n$ .

Es necesario aclarar que cuando existen tensiones aplicadas en diferentes direcciones, como es el caso de la tracción biaxial, la tensión real o efectiva se define mediante la relación debida a Von Mises que se indica a continuación (Dieter, 1986):

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma^2 \quad (9)$$

### 3.3. Conformabilidad de chapas en procesos de doblado.

Cuando se trata de una operación de doblado simple, el parámetro que más interesa desde el punto de vista de la conformabilidad es la máxima reducción en área o mejor dicho en espesor que la chapa puede soportar sin llegar a la fractura.

La característica más importante es en este caso una buena capacidad de endurecimiento por deformación. De este modo, el material puede evitar que la deformación se localice en una zona muy pequeña—la más solicitada—dado que ésta deforma y aumenta su resistencia mecánica. Por este motivo, la deformación prosigue en la zona adyacente que, aunque menos solicitada, es menos resistente. Estas consideraciones son importantes también en el embutido por la flexión del material que se produce sobre el punzón y sobre la matriz.

La propiedad de endurecimiento se mide generalmente por la relación que existe entre la tensión de fluencia y la resistencia a tracción (carga máxima en el diagrama de la figura 8).

### 4. EVALUACIÓN DE LA CONFORMABILIDAD DE CHAPAS METÁLICAS

Por lo expresado en los puntos anteriores, resulta evidente que la evaluación de la conformabilidad de una chapa metálica para una operación determinada es materia difícil. Son muchas las propiedades que debe reunir el material en forma simultánea para asegurar el éxito del conformado. Esto requeriría la realización de varios ensayos lo que puede resultar engorroso y de alto costo. Por otra parte, el hecho de que en un proceso industrial puedan aparecer involucradas, con distintas intensi-

dades, las tres operaciones básicas analizadas en el Punto 2 complica el panorama dado que puede resultar difícil determinar con qué intensidad interviene cada una de esas operaciones y, por lo tanto, el mayor o menor peso que tendrá en el resultado final la presencia o ausencia de una propiedad dada.

Conviene recalcar que no es demasiado difícil obtener una buena correlación entre los datos del ensayo y los resultados de la operación industrial cuando ambos son solamente embutido, estirado o doblado. El problema se presenta cuando los tres aparecen combinados en una operación, en una proporción desconocida. No existe aún un ensayo que pueda incorporar en intensidades variables y controladas las tres operaciones básicas. Por ello hay una gran proliferación de ensayos propuestos. Por este motivo también frecuentemente se recurre a ensayos que no reproducen las condiciones de la operación industrial y que no pueden ayudar a distinguir, por lo tanto, un material adecuado de otro inservible para un proceso industrial determinado.

En general, se pueden distinguir cuatro grandes tipos de ensayos a los que se puede someter una chapa metálica para estampado:

- a) Ensayos de calidad metalúrgica tales como composición, estructura metalográfica, textura cristalina, etc.
- b) Ensayos no simulativos o fundamentales relacionados con las propiedades intrínsecas del material como por ejemplo: dureza, alargamiento a rotura y similares.
- c) Ensayos simulativos en los que se intenta reproducir

las condiciones del proceso. Son los ensayos de copa Swift, Erichsen u Olsen, Fukui, etc. (ver puntos siguientes).

- d) Análisis de distribución de deformaciones efectuados en las condiciones de trabajo. Son los que dan lugar a las llamadas Curvas Límite de Conformado.

En el caso de los ensayos fundamentales es necesario conocer la importancia de la propiedad ensayada en el proceso en cuestión y esto presupone una comprensión cabal de la mecánica de dicho proceso (Pomey, 1972). En este campo, se han hecho progresos considerables en los últimos setenta años mediante consideraciones del tipo de las descritas en los puntos precedentes.

A continuación se analizan algunos de los ensayos que se juzgan más representativos de esta manera de pensar. Se excluyen los involucrados en el inciso a) por cuanto ya están suficientemente descritos en la bibliografía.

No se debe perder de vista el hecho de que, entre las diversas propiedades señaladas como importantes para la conformabilidad de chapas metálicas en operaciones de estampado, las dos más significativas son una anisotropía adecuada y un elevado coeficiente de endurecimiento por deformación.

#### 4.1. Ensayo de tracción.

El ensayo de tracción constituye una herramienta muy importante, en manos de un metalurgista experto, para la evaluación de las propiedades requeridas en el estampado de chapas metálicas (Murray, 1958).

En efecto, mediante este ensayo

se puede determinar tanto el coeficiente de endurecimiento  $n$  como el factor de anisotropía  $R$ .

Los datos de carga y alargamiento obtenidos durante un ensayo de tracción convencional se pueden convertir en la descripción de las características mecánicas del material expresada por la curva tensión real-deformación natural. Esto se logra mediante las relaciones (ver figura 8):

$$\sigma = \frac{P}{A_0} (1 + e) \quad (10)$$

y

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln (1 + e) = \ln \frac{A_0}{A} \quad (11)$$

En los metales cuyo comportamiento se puede expresar mediante la ecuación de Hollomon ya vista  $\sigma = K\varepsilon^n$ , la misma resulta ser una recta en un diagrama logarítmico con una pendiente igual a  $n$ . Los datos de un ensayo de tracción permiten de este modo obtener el valor del coeficiente llamado de endurecimiento por deformación (en realidad no lo es pero la costumbre terminó por imponer este nombre). Afortunadamente, la mayor parte de los metales más comúnmente empleados en la confección de piezas estampadas permiten emplear la ecuación de Hollomon. Existen también otras expresiones que permiten mayores afinamientos.

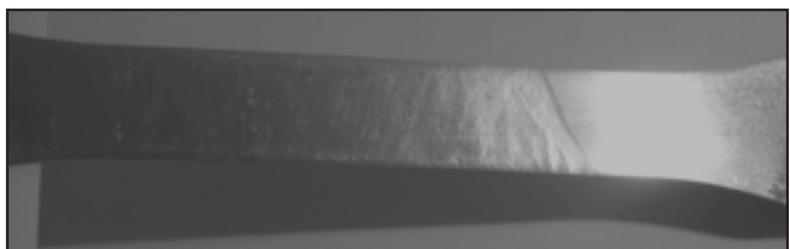
Desde este punto de vista, el ensayo de tracción resulta de gran utilidad como ensayo fundamental

para determinar la capacidad de alargamiento sin variaciones localizadas de espesor de un material. Ya se vio que esta propiedad es de gran importancia en las operaciones de estirado. Por otra parte, este ensayo permite obtener los valores de las tensiones de fluencia y de resistencia máxima a tracción, con lo que se puede establecer su relación, parámetro interesante para la determinación de la conformabilidad en operaciones de doblado.

Pero su importancia no radica sólo aquí. En efecto, el ensayo de tracción permite obtener otros datos de gran interés. Uno de ellos es el comportamiento del metal durante la fluencia en que se puede apreciar si el mismo presenta o no bandas de Lüders que es de suma importancia durante el proceso de estampado (Dieter, 1986). Estas bandas (conocidas como "piel de lagarto") afectarían el aspecto superficial de la pieza estampada hasta provocar su rechazo (ver figura 9).

El otro, no menos importante, es que con el ensayo de tracción se puede determinar el grado de anisotropía del material en estudio.

La anisotropía planar se mide extrayendo probetas a diferentes ángulos de la dirección de laminación de la chapa y evaluando sus características mecánicas. Es usual tomar probetas a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  respecto de la dirección de laminación (Hosford et al, 2007).



**Figura 9:** Bandas de Lüders en una probeta de tracción.

La anisotropía normal se determina calculando el parámetro  $R$ , que da la relación entre deformación en ancho y en espesor, a un cierto porcentaje de alargamiento. En los aceros de embutido usualmente se ubica alrededor del 20%.

Para cuantificar la anisotropía de una chapa se mide el valor de  $R$  en las tres direcciones vistas y se definen los siguientes valores:

Anisotropía normal:

$$\bar{R} = \frac{1}{4} (R_0 + 2R_{45} + R_{90}) \quad (12)$$

Anisotropía planar:

$$\Delta R = \frac{1}{2} (R_0 - 2R_{45} + R_{90}) \quad (13)$$

La determinación de los valores de  $\bar{R}$  y  $\Delta R$  fue normalizada por el *International Deep Drawing Research Group* (IDDRG).

El material ideal para un embutido simétrico es aquél que tiene un alto valor de  $\bar{R}$  (mayor que la unidad) y cuyo  $\Delta R$  sea cero. El valor de ambos parámetros depende de la composición del material y del proceso de fabricación de la chapa. Así, por ejemplo, en los aceros efervescentes procesados normalmente  $R$  puede tener valores comprendidos entre 1,0 y 1,2 mientras que en los aceros de embutido extra profundo se pueden alcanzar valores de 1,7 a 2. En el titanio 115,  $R$  puede llegar a valer 5 (Wilson, 1969).

#### 4.2. Ensayo Erichsen – Olsen.

Es llamado ensayo de copa, aunque debería especificarse que se trata de un ensayo de estirado para diferenciarlo de los de embutido como por ejemplo el Swift.

El ensayo consiste en obtener una copa por el avance de un punzón semiesférico que estira a la chapa que se encuentra sujeta con mayor o menor presión, según el tipo de ensayo, entre un sujetador y la matriz. La altura de la copa que se puede lograr antes de que aparezca una grieta se toma como valor representativo de la calidad de la chapa analizada.

Existen diversas versiones de este ensayo. Las más conocidas son las debidas a Erichsen (usada sobre todo en los países europeos) y a Olsen (común en los Estados Unidos de Norteamérica). Ambos ensayos sólo difieren en las dimensiones de punzones y de matrices. En la figura 10 se pueden ver esquemáticamente cada uno de ellos.

La presión del sujetador impide el embutido del material haciendo de este ensayo una prueba de estirado biaxial lo más puro posible. Los valores obtenidos dependen en gran medida de dos factores: espesor de la chapa y condiciones de lubricación. Por esto, en las variantes modernas de este ensayo se sustituye

al punzón semiesférico por un fluido a presión con lo cual se elimina la fricción entre chapa y punzón (Shawki, 1965).

Además de la conformabilidad en el estirado, el ensayo de copa Erichsen-Olsen resulta útil para determinar el tamaño de grano de una chapa. A medida que progresa la deformación la rugosidad de la chapa va aumentando dado que la superficie que no está en contacto con el punzón es libre. Dicha rugosidad se debe a que cada grano del material de la chapa se deforma de manera distinta a la de los granos que lo rodean. Este efecto es tanto más marcado cuanto mayor es el tamaño de grano de la chapa. Se puede elaborar por lo tanto, y de hecho existen, una serie de patrones que indiquen el tamaño de grano en función de la apariencia superficial de una copa Erichsen. Es importante que el tamaño de grano no sea demasiado grande para no generar una rugosidad excesiva en la pieza estampada defecto que se conoce como "piel de naranja".

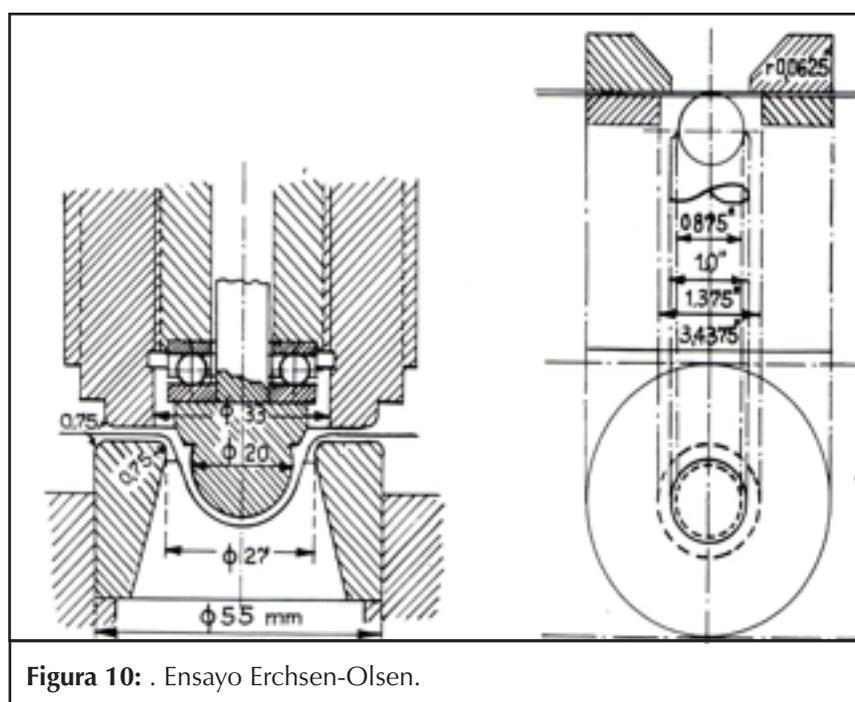


Figura 10: . Ensayo Erchsen-Olsen.

Cuando la operación de estampado sea predominantemente de estirado los valores obtenidos por el ensayo Erichsen-Olsen serán representativos de la calidad de un material.

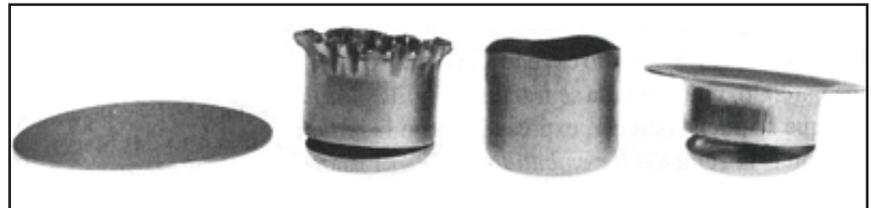
La gran difusión de este ensayo se debe, entre otras cosas, a la relativa facilidad y rapidez de su ejecución.

### 4.3. Ensayo Swift de embutición de copas.

Este ensayo está basado en los trabajos ya clásicos llevados a cabo en la Universidad de Sheffield por el profesor H. W. Swift. En este caso, un disco circular es embutido en una copa cilíndrica bajo condiciones controladas. La chapa durante el proceso está comprimida por un sujetador o prensachapa que permite su deslizamiento al interior de la matriz (figura 11).

Se pueden usar dos tipos de punzones, uno plano y otro semiesférico. Con el primero se tiene una operación de embutido puro mientras que el uso del punzón semiesférico agrega un cierto grado de estirado.

La primera normalización de este ensayo se debe a un trabajo del *British Iron and Steel Research*



**Figura 12:** De izquierda a derecha: disco original; copa fallada por ondulaciones debidas a presión insuficiente de sujetador; copa embutida en forma correcta; falla por exceso de presión de sujetador (Schey, 2000c).

*Association* (BISRA) recopilado por O.H. Kemmis (1957). Existe actualmente una posterior normalización llevada a cabo por el IDDRG (Hawtin, 1969).

El ensayo consiste en embutir discos de diámetros crecientes hasta que empiecen a producirse fallas. De esta manera se determina para el material en estudio la relación límite de embutido dada por la relación entre el diámetro del disco máximo que embute sin dificultad y el diámetro de la matriz.

Además de la relación de embutido, el ensayo Swift pone de manifiesto la anisotropía planar del material ensayado por la formación de orejas que aparecen en el borde de la copa embutida, figura 12 (Schey, 2000c).

Se trata de un ensayo que repro-

duce fielmente las condiciones de una operación de estampado que involucre únicamente embutido. Es por lo tanto muy útil en la selección de un material adecuado para este tipo de operaciones. Su mayor desventaja radica en lo largo y laborioso del ensayo (Mazini et al., 1974).

### 5. DIAGRAMAS LÍMITE DE CONFORMADO

Cada tipo de material del que están hechas las chapas metálicas (acero, aluminio, latón, etc.) puede ser deformado sólo hasta un cierto nivel antes de que aparezca un adelgazamiento y posterior fractura. Este nivel depende de la combinación de las deformaciones impuestas. En el caso del conformado de chapas metálicas, las deformaciones se suelen medir en el plano de la chapa dado que resulta muy difícil medir con precisión variaciones en el espesor. Por lo tanto, cuando se habla de la relación de las deformaciones se hace referencia a la mayor y menor que se producen en el plano de la chapa. El nivel más bajo de deformaciones sin que la pieza adelgace o rompa se presenta para un estado de deformación plana o sea cuando la menor de las deformaciones es cero.

S. P. Keeler fue el primero en cuantificar dicho concepto en 1965, construyendo un diagrama de conformado para una gran variedad de materiales recocidos sometidos a estirado biaxial con punzón semies-



**Figura 11:** Estampa para el ensayo Swift. Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica de la Universidad Nacional del Sur.

férico. Los valores de falla considerados fueron las combinaciones de deformaciones convencionales  $e_1$  y  $e_2$  que conducían a la formación de una estricción localizada (Mazini et al., 1974).

G. M. Goodwin completó la idea investigando la zona de deformaciones tracción –compresión aunque su criterio de falla fue la aparición de la fractura.

Combinando los trabajos de ambos, se tienen los llamados *Diagramas Límite de Conformado* (DLC) como se muestra en la figura 13 (Schey, 2000b).

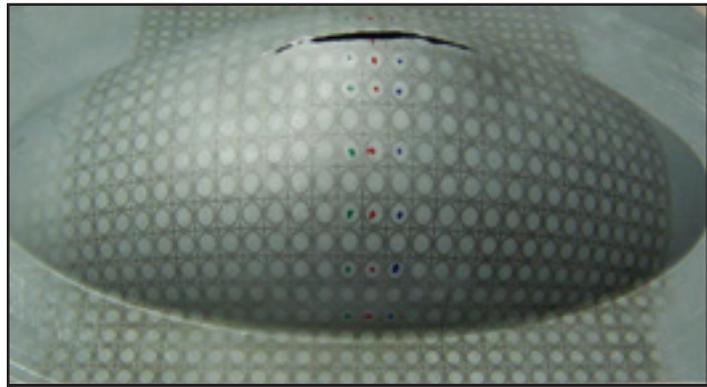
Estos diagramas se determinan y se usan con el auxilio del trazado de una grilla circular en la superficie de las probetas o de las chapas a conformar (figura 14).

La curva de Keeler-Goodwin fue trazada considerando las deformaciones convencionales, definidas como:

$$e_1 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad e_2 = \frac{d_2 - d_0}{d_0}$$

$$e_3 = \frac{t - t_0}{t_0} \quad (14)$$

donde  $d_0$  es el diámetro inicial de los círculos de la grilla,  $d_1$  y  $d_2$  son los ejes mayor y menor de la elipse posterior a la deformación,  $t$  y  $t_0$  son los espesores final e inicial de la chapa en el centro del círculo medido (Iurman, 2008).



**Figura 14:** Probeta grillada de acopado biaxial elíptico.

En las investigaciones de laboratorio se prefiere trabajar con deformaciones naturales o verdaderas  $\epsilon_i = \ln(1 + e_i)$ . Esta definición de deformaciones tiene, entre otras, la ventaja de cumplir con la ley de constancia de volumen o sea

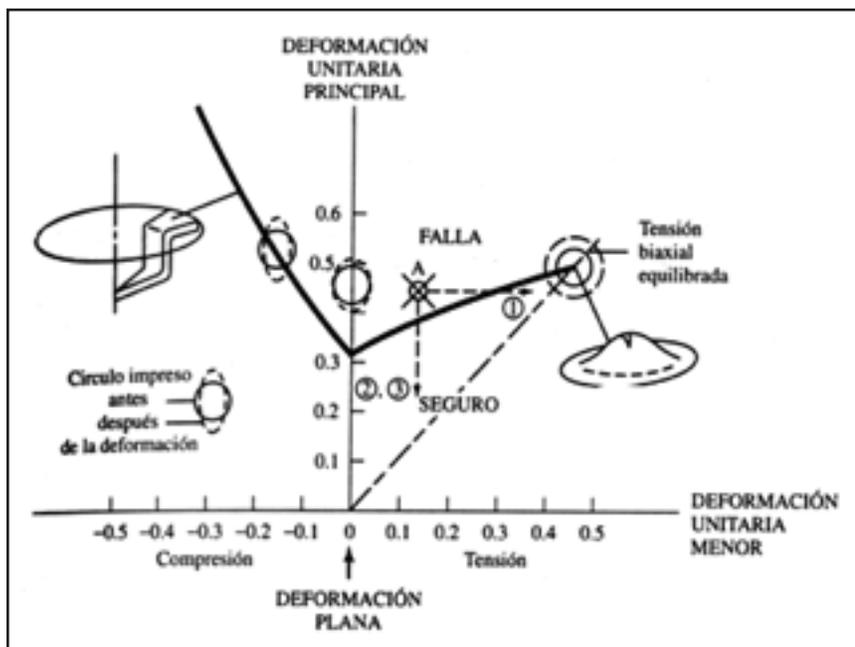
$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

En el diagrama límite de conformado se pueden apreciar las siguientes circunstancias:

- A mayor uniformidad en el estirado biaxial, o sea cuando la relación  $e_2 / e_1$  tiendo a uno, mayor es el nivel de deformaciones posibles antes de la falla.
- En la zona de tracción-compresión los esfuerzos de compresión ayudan a soportar una deformación mayor por tracción.

Para determinar los DLC se utilizan los ensayos ya vistos (tracción simple, tracción plana, embutido, estirado, embutido-estirado, etc.) con los cuales se logran las diferentes relaciones de deformaciones necesarias.

Las deformaciones se miden en y alrededor de las regiones de estricción visible y/o de fractura según el criterio de falla que se adopte. La curva límite de conformado se traza sobre las regiones medidas fuera de



**Figura 13:** Diagrama límite de conformado típico de un acero de bajo carbono (Schey, 2000b).

las regiones adelgazadas y por debajo de las medidas en las regiones adelgazadas y fracturadas.

Como se ha mencionado, el DLC se introdujo en la década de los 60 y se convirtió rápidamente en una herramienta importante para diagnosticar problemas de producción. Cuando se encuentran piezas que fallan en producción se colocan chapas grilladas en la matriz de conformado y se estampan. Una vez conformada la pieza se mide la distorsión de los círculos (figura 14). El círculo más cercano a la línea de fractura proporciona la relación de deformación en el punto crítico (por ejemplo *A* en la figura 13). Se pueden explorar entonces varias soluciones, no evidentes intuitivamente, para situar a las deformaciones dentro de límites permisibles:

- Incrementar la deformación menor sujetando más firmemente en esa dirección.
- Mejorar la lubricación para redistribuir las deformaciones si la fractura ocurre lejos del vértice.
- Cambiar, si es factible, la calidad del material. En el caso señalado debería tratarse de un material con un alargamiento mayor en tracción o sea con un factor *n* mayor. Si la falla se hubiese producido en el sector de tracción-compresión se debería buscar un material con un parámetro *R* mayor.
- Si las soluciones anteriores no bastan, habrá que rediseñar la pieza para reducir la deformación mayor o se deberá permitir que algo de material fluya hacia la matriz cambiando el proceso a uno de estirado-embutido.

Puede también ocurrir que la pieza se conforme bien y que un aná-

lisis como el descrito indique que:

1. El punto más crítico está muy próximo a la curva del DLC.
2. El punto más crítico está lejos de la curva.

En el primer caso se está en condiciones precarias de conformado. Esto implica que hay que tener sumo cuidado con la producción porque cualquier cambio en la lubricación o en los prensa chapas o un desgaste en el herramental puede hacer que las condiciones se vuelvan críticas y empiecen a aparecer fallas.

En el segundo, la operación de estampado no es crítica no será necesario tener tantas precauciones y, eventualmente, se podría utilizar un material con menores exigencias de conformabilidad y por ende abaratar costos si, desde el punto de vista de la pieza a conformar, esto no es un problema.

Resulta evidente por lo expuesto la gran utilidad que presta esta herramienta tanto para la selección del material adecuado para una operación de estampado como para actuar sobre parámetros del mismo a los efectos de que la operación se pueda llevar a cabo en forma exitosa. Por esta razón, su empleo se ha universalizado tanto en los ámbitos de la producción de las chapas metálicas fundamentalmente en aceros, aunque no en forma exclusiva-como entre los estampadores.

La obtención de las Curvas Límite de Conformado está regulada por la Norma ISO 12004-1:2008.

## **6. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO DE CHAPAS METÁLICAS PARA CONFORMADO**

Es una regla bastante generali-

zada en metalurgia dar por sentado que los metales blandos son más deformables. Por este motivo, las primeras especificaciones para aceptar una chapa a los efectos de elaborar con ella piezas estampadas se basaban en la dureza de la misma. Cuanto mayor eran las exigencias de conformabilidad menor debía ser la dureza de la chapa aunque con ello se resignara resistencia mecánica.

Un primer avance se dio con el ensayo Erichsen-Olsen en que la calidad de la chapa está dada por la altura de la copa que puede obtenerse hasta que aparezca la primera fisura. Su gran expansión se debió, entre otras cosas, a la sencillez del ensayo. Además, sobre todo para metales no ferrosos tales como los cobrizos (así se conocen a las aleaciones de cobre) permite visualizar el tamaño de grano metálico y rechazar así chapas con grano muy grueso que, una vez estampadas, presentarían el defecto superficial conocido como "piel de naranja".

Sin embargo, la fricción entre punzón y chapa en este ensayo hace que exista una cierta dispersión en los valores obtenidos. Además, se encontró que chapas con buenos valores de "Índice Erichsen" no respondían bien a determinadas operaciones de estampado. Con los estudios de Swift, y a la luz de los diferentes tipos de operaciones básicas analizadas en el Punto 2, se puede comprender la razón de semejante falta de correlación. El ensayo Erichsen representa perfectamente operaciones de estirado no así a aquellas que involucran embutido donde las tensiones y las deformaciones inducidas son diferentes al caso de un estirado puro.

Aparece así en escena el ensayo de acopado Swift y el énfasis puesto en una adecuada anisotropía del material. Una combinación de en-

sayos Erichsen-Olsen y Swift se presenta, entonces, como garante de una adecuada selección de chapas para los estampadores.

En Japón incluso se desarrolló un nuevo ensayo, Fukui, no tratado aquí por razones de brevedad, que combina embutido con estirado representando de este modo operaciones industriales que presentan esta característica.

Dada la complejidad de la ejecución del ensayo Swift de acopado y en menor medida del Erichsen en las relaciones comerciales entre proveedores y usuarios se impuso la valorización de los parámetros n y R como criterios de aceptación. Los productores de chapas, especialmente de acero, garantizan cuando se trata de estampados de cierta exigencia valores mínimos de uno y de otro. Todo esto renovó el uso extendido del ensayo de tracción uniaxial mediante el cual se pueden determinar ambos parámetros.

A los efectos de extender el campo de deformaciones y poder ver así la posible influencia de inclusiones no metálicas en la microestructura de las chapas se incursionó también en la tracción biaxial. Ésta se practica más en laboratorios que en la industria.

La gran herramienta que revolucionó y completó todo lo anterior fue el análisis de las trayectorias de deformación mediante las curvas límite de conformado. Las mismas posibilitaron el estudio en escala natural de diferentes procesos de estampado mediante el grillado de las chapas. Se pudieron detectar así eventuales puntos críticos y, según que los mismos se hallasen en la zona tracción-tracción o tracción-compresión, tomar las acciones correctivas. Estas últimas pueden consistir tanto en la necesidad de variar

algunos parámetros del proceso tales como la geometría del herramienta, la lubricación, etc. o seleccionar un material de mejor calidad.

Este análisis está al alcance tanto del proveedor de chapas como del usuario. Por este motivo, se impuso en su momento una relación basada en la cantidad de rechazo o falla tolerados en un proceso de estampado. Ante una nueva pieza a estampar, el proveedor de chapa debía proveer material que no tuviera más de un determinado porcentaje convenido de piezas falladas. Para ello la fábrica siderúrgica enviaba a sus expertos al taller del usuario con sus chapas grilladas las estampaba y verificaba la naturaleza y gravedad del proceso. En base a este estudio ofrecía un material apropiado.

Esta situación cambió con la crisis energética que obligó a fabricar automóviles cada vez más livianos. En este contexto, la conformabilidad pasó a un segundo plano priorizándose aligerar el peso del vehículo manteniendo la resistencia mecánica y la capacidad de absorber choques (o sea la tenacidad). El estampador debió entonces aprender a solucionar las posibles limitaciones que presentaba el nuevo material.

Esta situación es el estado actual de las cosas.

## **7. ROL DE LA METALURGIA EN EL DESARROLLO DE CHAPAS METÁLICAS PARA ESTAMPADO**

Nos referiremos principalmente al campo de las chapas de acero. Pero para comprender la magnitud del problema conviene destacar que en las principales aleaciones metálicas de uso industrial las del hierro (los aceros), del cobre (bronces y latones) y del aluminio aproximadamente la mitad corresponde a productos planos, chapas y placas que

deben ser posteriormente conformadas de alguna manera o sea son productos semiterminados.

En el número recordatorio del centésimo aniversario de la creación del *Iron and Steel Institute* de Gran Bretaña, W. E. Duckworth y J. D. Baird escribían: "...Uno de los hechos sorprendentes de los aceros blandos es la extensión en que su desarrollo ha sido ignorado por los metalurgistas físicos hasta años recientes. Cuando se recuerda que los productos de hierro y acero forman el 94% de todo el metal usado en el mundo y que el acero blando probablemente forme el 85% de todo el acero manufacturado, esta negligencia del acero blando por parte de los metalurgistas físicos es muy destacada..." Y agregan más adelante: "Dado que fue sólo a partir de 1960 que los metalurgistas físicos han tomado un interés activo y general en el desarrollo del acero blando... este artículo se concentrará en los desarrollos desde 1960 en los campos de aceros estructurales y de empaquetado".

Enumeran en su artículo esos desarrollos, una buena parte de ellos dedicados a la comprensión de los problemas de estampado tal como se han reseñado aquí y concluyen en la parte final entre otros aspectos: "En el campo de las chapas de acero, el uso del desgaso en vacío hará practicable la manufactura de aceros de embutido extra profundo de bajo carbono y bajo oxígeno. Tales aceros deberían tener un alargamiento uniforme y total mejorado, y si se pueden producir mediante colada continua y desarrollarse a una etapa en la cual puedan ser satisfactoriamente recocidos en una planta continua y aún usarse para aplicaciones de embutido extra profundo, pueden presentar un serio desafío a los aceros producidos en forma convencional para un amplio

rango de aplicaciones. El desgasa-  
do en vacío permitirá también la  
adición de pequeñas cantidades de  
elementos aleantes para incrementar  
el valor de  $R$  y controlar el envejeci-  
miento por deformación. ...”

Estos desarrollos y otros han te-  
nido lugar desde entonces. Tan es  
así que en la actualidad un acero de  
bajo y ultra bajo carbono para elabo-  
rar piezas estampadas puede ser  
considerado una obra maestra del  
arte de la metalurgia física aplicada  
a procesos industriales. Y las plan-  
tas elaboradoras de estos productos  
tienen equipos técnicos de profesio-  
nales para los cuales la metalurgia  
física dejó de ser una disciplina de  
laboratorio y entró a la planta side-  
rúrgica para quedarse. Lo mismo se  
puede decir de lo que ha pasado  
con otros metales.

En la era actual, todo empieza  
a pasar por la modelización de los  
procesos y su simulación a los efec-  
tos de avanzar en forma más rápida  
y menos costosa. El estampado de  
piezas metálicas no escapa a esta  
tendencia general. Y es así como la  
comprensión de los mecanismos es-  
tructurales en la respuesta mecánica  
de los metales se está empleando en  
la modelización de las curvas límite  
de conformado a partir del conoci-  
miento de la microestructura y de  
sus defectos.

## **8. CONSIDERACIONES FINALES**

Este trabajo ha tratado de pre-  
sentar el largo camino recorrido en  
el estudio de las operaciones de es-  
tampado desde que, antes de 1930,  
Otto S. Beyer las describiera como  
“Ingeniería por la gracia de Dios”  
(Lloyd, 1962) a la fecha.

Esto no debe llevar a olvidar que  
muchas operaciones siguen siendo  
posibles debido a la experiencia y  
sensibilidad del operador de taller,

del artesano que ha desarrollado un  
instinto, un sexto sentido acerca de  
cuál trayectoria de deformaciones  
seguir, de cómo debe hacer fluir a la  
chapa para convertirla en un objeto  
tridimensional, de la conveniencia  
de embutir primero y estirar después  
o hacerlo al revés. Es justo reconocer  
que este artesano sabe *cómo hacer-  
lo* mientras que en muchos aspectos  
los metalurgistas nos ocupamos por  
saber *por qué sucede*.

La aceleración de los progresos  
en los procesos productivos hace  
que el artesano ya no disponga del  
tiempo que supo tener antaño frente  
a una pieza o a un material nuevo.  
Es necesario el concurso del inge-  
niero, del metalurgista, del matemá-  
tico que elaboren un modelo para  
simular el proceso de estampado y  
permitan acortar el tiempo que va  
de la concepción de la pieza a su  
fabricación en serie.

Pero como dijo S. P. Keeler  
(Keeler, 1978) al inaugurar un sim-  
posio sobre la tecnología del es-  
tampado de chapas metálicas en  
1977, “no debemos olvidar que la  
experiencia y la técnica usadas por  
los artesanos para crear los violines  
*Stradivarius* continúan desafiando  
las mejores capacidades analíticas  
de la ciencia de la era espacial”.

## **9. REFERENCIAS**

Dieter G.E. (1986). Mechanical  
Metallurgy. 3<sup>rd</sup> Ed. McGraw-Hill.

Duckworth W.E, Baird J.D. (1969)  
Mild Steels. Journal of the I.S.I.  
207 6, 854.

Hawtin R.T. (1969) Recommended  
Procedure for Performing the  
Swift Cupping Test. Sheet Metal  
Industries 46, 418.

Hill R. (1950) The Mathematical  
Theory of Plasticity. Oxford

Clarendon Press.

Honeyman A.J.K. (1957) The  
Metallurgy of Steels for Deep  
Drawing. Sheet Metal Industries  
34 357, 51.

Hosford W.F., Caddell R.M. (2007).  
Metal Forming–Mechanics and  
Metallurgy. Cambridge University  
Press, 208.

Hosford W.F. Jr., Backofen W.A.  
(1964) Strength and Plasticity of  
Textured Metals. Fundamentals  
of Deformation Processing.  
Proceeding of the Ninth  
Sagamore Army Materials  
Research Conference, Syracuse  
University Press.

Hosford W.F., Caddell R.M. (1993).  
Metal Forming. Mechanics and  
metallurgy. Second Edition.  
Prentice Hall, 272.

Iurman L. (2008) Conformabilidad  
de Chapas Metálicas. Curso  
de Conformado de Chapas  
Metálicas, Capítulo 6, 21.  
Instituto Argentino de Siderurgia.

Keeler S.P. (1968) Circular Grid  
System. A Valuable Aid  
for Evaluating Sheet Metal  
Formability. Sheet Metal  
Industries 45 497, 633.

Keeler S.P. (1978). Mechanics of  
Sheet Metal Forming, Sheet Metal  
Stamping Technology–Need for  
Fundamental Understanding.  
Edited by D. P. Koistinen and  
Neng-Ming Wang, Plenum Press,  
7.

Kemmis O.H. (1957) The Assessment  
of the Drawing and Forming  
Qualities of Sheet Metal by the  
Swift Cup Forming Test. Sheet  
Metal Industries 34 359, 203.

Lankford W.T., Snyder S.C.,

- Bauscher J.A. (1950) New Criteria for Predicting the Press Performance of Deep Drawing Sheets. *Transactions of the ASM*, 42, 1197.
- Lloyd D.H. (1962) Metallurgical Engineering in the Pressed Metal Industry. *Sheet Metal Industries* 39 417, 6.
- Mazini N.E., Iurman L., Sáenz López A.R., Lucaioli A.O., Blanco J. M. (1974) Parámetros mecánicos que inciden en la estampabilidad de chapas metálicas. *Calidad de Productos Laminados en América Latina. Instituto Latinoamericano del Hierro y del Acero*, 125.
- Murray G. (1958) Research into Deep Drawing. A Metallurgist's View. *Sheet Metal Industries* 35 377, 657.
- Pomey G. (1972) Le Formage des Tôles. *Revue de Métallurgie*, 69 4, 251.
- Schey J.A. (2000a) Procesos de manufactura. Tercera Edición. McGraw-Hill, 410.
- Schey J.A. (2000b). Procesos de manufactura Tercera Edición. McGraw-Hill, 421.
- Schey J.A. (2000c). Procesos de manufactura. Tercera Edición. McGraw-Hill, 425.
- Shawki G.S.A. (1965) Assessing Deep-Drawing Qualities of Sheet. *Sheet Metal Industries* 42 457, 363.
- Thomsen E.G., Yang Ch. T., Kobayashi S. (1965) *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing*. The Macmillan Company, New York.
- Wilson D.V. (1969) Controlled Directionality of Mechanical Properties in Sheet Metals. *Metals and Materials* 3 12, 175.
- Wright J.C. (1961) Quantitative Assessment of Deep Drawing and Stretch-forming Qualities. *Sheet Metal Industries* 38 413, 649.
- Yoshida K., Komorida H., Usuda M., Watanabe H. (1971) Significance of the X Value and the Work-hardening exponent (n) under equibiaxial tension in the Assessment of Sheet Metal Formability. *Sheet Metal Industries* 48 534, 772.

#### ■ ANEXO

#### ACTUACIÓN DEL LABORATORIO DE METALURGIA Y TECNOLOGÍA MECÁNICA DE LA UNS EN EL CAMPO DEL CONFORMADO DE CHAPAS METÁLICAS.

Esta línea de investigación se inició a fines de la década de 1960. Para entonces, varios integrantes del Laboratorio habían hecho una iniciación en la investigación trabajando durante un período en el entonces Departamento de Metalurgia del Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica. En el mismo, fueron guiados por el Ing. Carlos Martínez Vidal. Este factor fue decisivo para que, dentro del amplio espectro de la Metalurgia, se orientaran hacia el comportamiento mecánico de los metales y con una fuerte impronta hacia la transferencia de tecnología.

Una vez interesados en el tema, la posibilidad de desarrollarlo dependía de dos elementos imprescindibles: Antecedentes para conocer el estado del arte y elementos para realizar las expe-

riencias de laboratorio necesarias.

Lo primero provino nuevamente del Centro Atómico Constituyentes que poseía a la sazón una excelente biblioteca con las últimas revistas metalúrgicas. Lo segundo era una prensa manual del tipo de las que se utilizaban para desarmar los cojinetes de los ejes de motores, una cierta capacidad para fundir metales hasta los bronce y, sobre todo, una preciosa mano de obra dada por un técnico de primer nivel de los que las escuelas de artes y oficios formaban en aquellos tiempos y que fueron parte del personal anónimo que contribuyó en forma significativa al desarrollo tecnológico del país. Algún día habrá que rendirles el merecido homenaje.

Poco tiempo después, mediante un préstamo que consiguieron las universidades, se pudo adquirir una prensa hidráulica industrial como la que se ilustra en la figura 15, se diseñó y construyó la primera matriz Swift (figura 11) y se hicieron ensayos con diversos metales para adquirir experiencia y comprobar lo leído



**Figura 15:** Máquina de ensayo, ensayando probeta en deformación plana.

en las revistas de conformado de chapas. La cercanía de nuestro laboratorio con el de Estudio y Ensayo de Materiales de la Universidad, del cual algunos de nosotros habíamos estado a cargo en períodos anteriores, permitió completar la realización de los ensayos de tracción, tan relevantes en el tema de la conformabilidad de chapas metálicas.

De este modo llegamos a las Jornadas de la SAM (Sociedad Argentina de Metales) de 1970 en la ciudad de Córdoba en las cuales presentamos nuestro primer trabajo, en el que reseñábamos los conceptos en boga en los centros de desarrollo e investigación mundiales hasta entonces, corroborados por el comportamiento que habíamos logrado experimentar con tres materiales metálicos a saber: un acero común, uno especial de embutido profundo y un acero inoxidable. Todas chapas compradas en las ferreterías de la ciudad.

En esas Jornadas de Córdoba quedó en evidencia que había solamente otro grupo que trabajaba en este tema en el país, justamente en Córdoba, centro industrial muy importante en aquel tiempo y siempre. Y tuvo nuestra presentación dos consecuencias importantes: Por un lado, un funcionario de ILAFA (Instituto Latinoamericano del Fierro y del Acero) nos pidió que participáramos en un encuentro que ese Instituto estaba programando para el año siguiente en Santiago de Chile sobre la calidad de los productos laminados. Eso nos permitió trascender las fronteras del país y vincularnos con otros grupos que desarrollaban tareas afines en el continente.

Por otro lado, profesionales y ejecutivos de una empresa siderúrgica nacional presentes en las Jornadas interesados en el trabajo presentado y en las posibilidades experimenta-

les que el mismo ponía en evidencia ofrecieron su apoyo para continuar los desarrollos en este campo. De esta manera, comenzó una vinculación con la industria siderúrgica nacional que se mantuvo inalterable y sin solución de continuidad en todos estos cuarenta y tres años, continúa y marcó, además, a nuestro laboratorio, embarcándolo en el tratamiento preferencial, si no exclusivo, en el estudio de la conformabilidad de chapas de acero. Reforzaba este vínculo, por otra parte, la lamentable falta de requerimientos de servicios por parte de la industria local puesto que Bahía Blanca había empezado un declive muy pronunciado en su actividad industrial, que recién repuntaría años más tarde, al instalarse en sus proximidades un polo industrial de envergadura.

La actividad en la década de los años setenta en nuestra área se tradujo en la prosecución de caracterización de chapas de acero mediante los ensayos descritos en el trabajo, la fabricación de nuevas matrices, el análisis de otros parámetros tales como la fricción y la rugosidad superficial de las chapas, etc. Un equipo muy importante se diseñó y construyó en ese período en el laboratorio. Se trata de la máquina de acopado hidráulico, única entonces en el país. De este modo se pudo llegar por tracción a valores más altos de deformación antes de que se produjera la rotura.

Institucionalmente, en el seno de la SAM se formó el Comité de Chapas. En el mismo se organizaron reuniones mensuales a las que asistían investigadores del sector académico junto con profesionales y ejecutivos de plantas siderúrgicas del país y de empresas usuarias de chapas metálicas. Esas reuniones cimentaron el conocimiento personal y aprecio mutuo de quienes fabricaban las chapas, de los que

las utilizaban y de quienes las estudiábamos y prestábamos servicios a los anteriores. Era usual que esas reuniones se llevaran a cabo en las mismas empresas. Fueron un medio muy importante para vencer la estéril separación que había entre el sector productivo y el académico. En ese período se formó otro centro universitario importante destinado a estos temas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. En ese centro, se logró montar un excelente laboratorio de ensayos de conformado.

A mediados de los años setenta se consolidó la formación del Instituto Argentino de Siderurgia (IAS) que agrupaba a las empresas productoras de artículos de acero en el país. Poco a poco las actividades del Comité de Chapas de la SAM fueron pasando al ámbito de este Instituto. De todos modos, trascendieron algunas de las realizaciones de este Comité como fue la elaboración de una norma, luego aprobada por IRAM, sobre la nomenclatura de las operaciones de conformado en la que había bastante confusión. Afianzado el IAS como representante de las empresas siderúrgicas en el país, las actividades de servicio de nuestro laboratorio en el área del estudio del conformado de chapas se canalizaron a través del mismo. Además de los servicios, se llevaron a cabo actividades de formación profesional dictándose varios cursos sobre el tema organizados por el IAS.

En las operaciones de conformado de chapas un parámetro muy importante es la fricción entre el material y la estampa. Ese tema había sido abordado pero se trata de un fenómeno muy complejo que requiere una aproximación interdisciplinaria. La misma se logró recién en la década del noventa con la incorporación al laboratorio de investigadores con



**Figura 16:** Equipo de fricción de chapas.

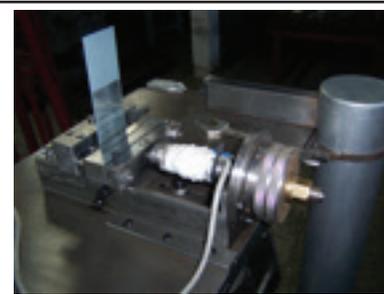
formación física y química. Hay que destacar que la lubricación de procesos de trabajado de metales es un fenómeno muy diferente de la lubricación de motores y elementos de máquinas en general. Se construyó entonces un equipo de fricción figura 16, 17 y 18 que permite realizar ensayos como los recomendados para caracterizar lubricantes usados en el estampado. Uno de estos lubricantes es en realidad un aceite protector que los fabricantes de chapas utilizan para proteger a las mismas entre su terminación en la planta siderúrgica y su estampado, un período que puede durar meses. Existen diferentes proveedores de este tipo de lubricantes. Con nuestro equipo y experiencias hemos colaborado con plantas siderúrgicas en la selección de los más convenientes.

Nos faltaba en el laboratorio ingresar en las experiencias de grilla-do de chapas, figura 14. Un oportuno intercambio con un centro de

investigación de España nos permitió hacerlo. Aprendimos esa técnica y les brindamos nuestra concepción de la máquina de acopado hidráulico. Fue un intercambio mutuamente beneficioso que se completó con el dictado de varios cursos en una Universidad de Barcelona sobre conformado de chapas por parte de un miembro de nuestro laboratorio. No fue la única experiencia internacional. Se repitió en Colombia con una presenta-

ción en una Jornada, un curso y asesoramiento a un centro de desarrollo tecnológico de ese país.

La última etapa en las actividades del laboratorio tiene que ver con el estudio de las curvas límite de conformado. Puestos a punto va-



**Figura 17:** Detalle del equipo de fricción de chapas con probeta.



**Figura 18:** Detalle del equipo de fricción de chapas.

rios de los ensayos necesarios para determinarlas es motivo de los desarrollos encarados en los últimos años. Se han diseñado y construido nuevas matrices, como la Marciniak



**Figura 19:** Matriz de ensayo Marciniak.

figura 19, se llevan a cabo experiencias con variadas geometrías de probetas, etc. En cuanto a servicios, se determinan curvas de este tipo para chapas fabricadas en el país o las que utilicen empresas productoras de autopartes provenientes del exterior. Y hay un par de jóvenes profesionales haciendo sus estudios de posgrado en el tema.

Ha pasado mucho tiempo desde el momento en que, al presentar nuestro primer desarrollo en Córdoba, nos preguntaban los profesionales de planta por qué estába-

mos en contra del Ensayo Erichsen. Costó trabajo explicar que no era así. Que sólo pretendíamos comprender un poco más acerca de la relación entre la deformación a la que era sometido el material y el ensayo que la representaba. Todos aprendimos en el camino. Valió la pena.

#### ■ GLOSARIO

**Conformado:** conjunto de procesos mediante los cuales una chapa se convierte en una pieza de forma deseada.

**Conformabilidad:** capacidad de un material de ser deformado para llegar a una forma prefijada.

**Estampado:** proceso de fabricación por el cual se somete un metal a una carga de compresión dentro de un molde o matriz.

**Tensión de fluencia:** La fuerza por unidad de área que es necesario aplicar a un material para que comience a deformarse plásticamente.