

## Capítulo 2

# Bases teóricas de la embutición de chapa

### 2.1 Procesos de conformado de chapa

#### 2.1.1 Introducción

Dentro de los numerosos procesos de fabricación que actualmente son usados en la industria, el conformado por deformación plástica es uno de los más importantes dado su intensivo uso para la fabricación de multitud de productos. Consiste en la obtención de formas finales de configuración más o menos compleja a partir de geometrías poco elaboradas bajo la acción de fuerzas externas capaces de superar el límite elástico del material. Existen dos tipologías en las que pueden clasificarse los procesos de conformado:

1. En función de la temperatura.
2. En función de la deformación producida.

**En función de la temperatura** a la que se realizan, el conformado puede llevarse a cabo en frío (no se alcanza la temperatura de recristalización y existe un endurecimiento por deformación plástica) y en caliente (se alcanza la temperatura de recristalización y el endurecimiento es eliminado). La elección de uno u otro depende de las propiedades

buscadas en la forma final (Tabla 2.1). **En función de la deformación producida** durante el proceso, pueden dividirse en volumétricos y de chapa: en el conformado volumétrico el cambio de forma es aproximadamente del mismo orden en las tres direcciones espaciales. La geometría original tiene un carácter tridimensional (barras, bloques, cilindros). Sin embargo, en el conformado de chapa el cambio de forma de mayor magnitud se produce en las dos dimensiones del plano de la chapa. La geometría original tiene una naturaleza bidimensional: láminas delgadas de metal donde 2 de sus dimensiones son mayores que la tercera, denominada espesor. Los procesos de conformado más usados en la actualidad son:

- Conformado volumétrico,
  - Laminado.
  - Forjado.
  - Extrusión.
  - Estirado.
- Conformado de chapa.
  - Estirado, estampación y embutición.
  - Doblado.

Deformación en frío	Deformación en caliente
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor precisión.</li> <li>• Mejor acabado superficial.</li> <li>• Aumento de la resistencia.</li> <li>• Ahorro energético.</li> <li>• Direccionalidad de las propiedades mecánicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayores deformaciones.</li> <li>• Menor riesgo de fractura.</li> <li>• No existe endurecimiento.</li> <li>• Menor trabajo (máquinas más pequeñas).</li> <li>• Mayor isotropía.</li> </ul>

Tabla 2.1: Ventajas de la deformación en frío y de la deformación en caliente.

### 2.1.2 Propiedades del conformado de chapa

El proceso de conformado de chapa elemental consiste en sujetar la chapa mediante algún mecanismo (matriz) y someterla a una deformación plástica a través de la fuerza aplicada por una herramienta (punzón), pudiendo ser dicha fuerza de compresión, de tracción, de cizalladura o una combinación de ellas (Figura 2.1). La importancia del conformado de chapa dentro de los procesos de deformación plástica radica en el amplio espectro de uso del mismo en la industria actual: automoción, aeronáutica, electrodomésticos, construcción, envases, etc. Las principales ventajas que hacen tan atractivo a este proceso son:

- No hay eliminación de material (conservación de volumen).
- La resistencia mecánica es elevada.
- La relación resistencia-peso es excelente.

Las chapas son en general metálicas y se obtienen por laminación (en caliente o en frío), proceso volumétrico donde el metal fluye de modo continuo y en una dirección preferente (dirección de laminación) reduciendo su espesor mediante fuerzas de compresión (Figura 2.2). Los materiales más frecuentes usados en el conformado de chapa son:

- Aluminio: En aeronáutica y automoción.
- Aceros al carbono: Automoción y electrodomésticos.
- Acero inoxidable: Envases y menaje.
- Otros (cobre, estaño...).

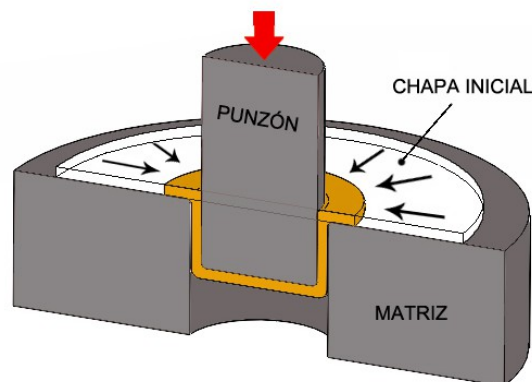


Figura 2.1: Elementos de conformado: punzón, matriz y chapa inicial. La fuerza se aplica sobre el punzón y el material fluye hacia el hueco de la matriz, adquiriendo la forma final.

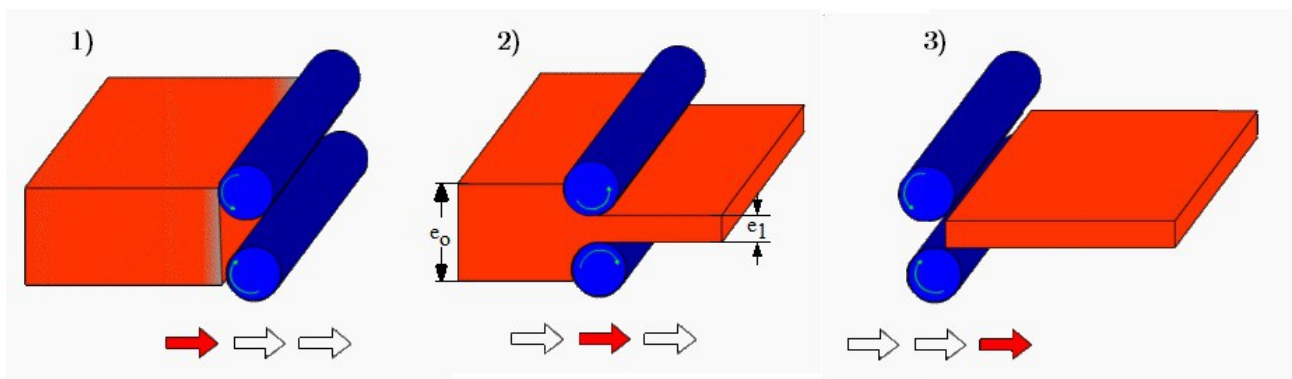


Figura 2.2: De izquierda a derecha, esquema de un proceso de laminación básico. Las flechas indican la dirección preferente de laminación. Obsérvese la reducción de espesor en la parte intermedia. Fuente:

Wikipedia.

### 2.1.3 Tipos de conformado de chapa

Dentro del conformado de chapa existen variedades según el tipo de esfuerzos a los que se encuentran sometidas las fibras de metal: conformado por tracción y conformado por flexión. En el primero el material se encuentra sometido a un estado fundamental de tracción, alargando todas las fibras y permitiendo que el *springback* (recuperación elástica) sea muy pequeño, obteniendo buenas precisiones en el proceso. En el segundo la deformación es por flexión no homogénea de las fibras (unas están traccionadas y otras comprimidas), produciendo un *springback* mayor que afecta a la forma final de la pieza. En resumen:

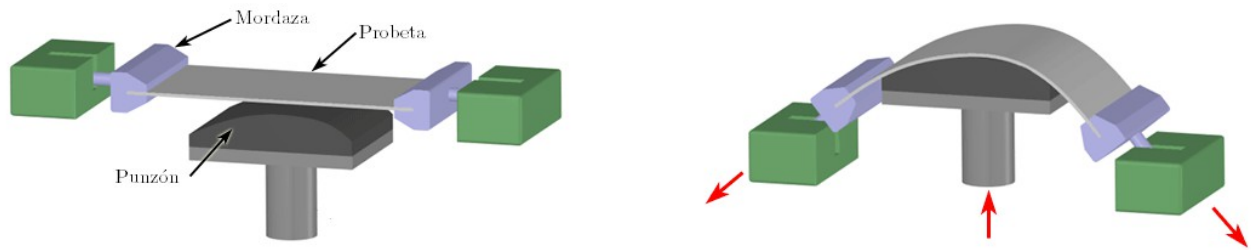
1. Conformado por tracción.
  - Estirado, estampación y embutición.
2. Conformado por flexión.
  - Plegado.

**Estirado** (*stretching*). El material base es deformado por un punzón con la forma “aproximada” que se quiere obtener en la chapa. Las mordazas deben sujetar la chapa con una fuerza tal que no permitan el flujo de material hacia la zona que está deformando el punzón (Figura 2.3). Se usa ampliamente en la industria aeronáutica para la fabricación de fuselajes o estructuras alares. El ensayo Erichsen se produce bajo estas condiciones.

**Estampación** (*stamping*). Se diferencia del estirado en que se permite que una cierta parte del material fluya al hueco de la matriz, introduciéndose hacia las zonas deformadas y permitiendo formas más complejas. Es misión del sistema de cogida (mordaza) regular dicho flujo. Es usado con frecuencia en la industria del automóvil.

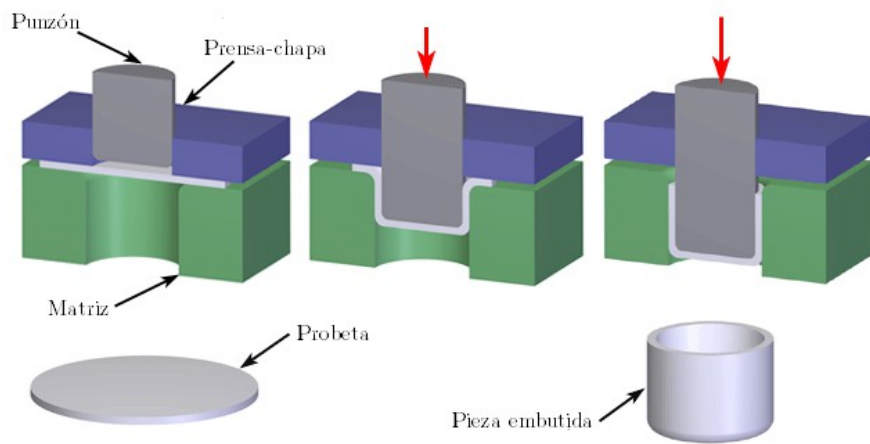
**Embutición** (*deep drawing*). El material material fluye aún más en el hueco de la matriz y por tanto se consiguen formas aún más complejas y profundas (Figura 2.4) pudiendo incluso repetirse el proceso en varias etapas (re-embutición). Al existir más flujo, el riesgo de que se produzca un arrugamiento o pando local aumenta debido a los esfuerzos circunferenciales de compresión que se generan. Sus aplicaciones principales son las industrias de menaje y envases.

**Plegado** (*bending*). El punzón aplica presión sobre la chapa para doblarla según la forma de la matriz, proporcionando un radio de curvatura a lo largo de una directriz recta o curva. La recuperación elástica (*springback*) requiere de un estudio detallado del mismo para determinar la forma de la matriz para cada material (Figura 2.5). Los usos más conocidos son el plegado en voladizo o con matriz en V (directriz recta) o el plegado de bridas y perfiles (directriz curva).



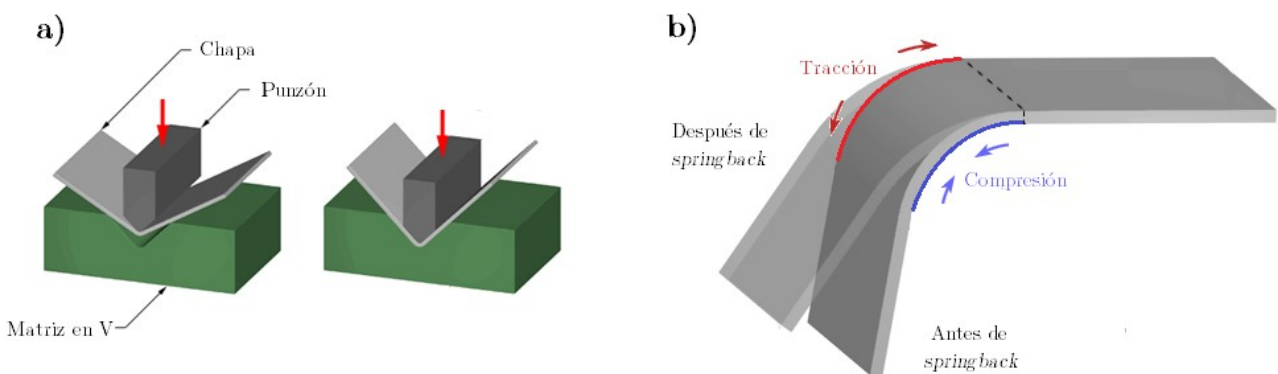
Copyright © 2009 CustomPartNet

Figura 2.3: Proceso de estirado. Las mordazas sujetan fuertemente el material y no permiten la fluencia del mismo, generando una reacción a la fuerza del punzón. Fuente: CustomPartNet.



Copyright © 2009 CustomPartNet

Figura 2.4: Proceso de embutición. El material fluye por el hueco de la matriz para adaptarse a la misma. Fuente: CustomPartNet.



Copyright © 2009 CustomPartNet

Figura 2.5: Plegado en V (a) y efecto de la recuperación elástica típico del proceso (b). Fuente: CustomPartNet.

## 2.2 Conformabilidad del material

### 2.2.1 Definición de fallo

En la práctica los procesos de deformación plástica están **limitados por el fallo** de la chapa durante el mismo: el material conformado debe satisfacer los requisitos que les serán solicitados durante toda la vida de uso y cualquier evento que inutilice la pieza para la función que fue diseñada se considerará como fallo. Se pueden clasificar como los más comunes:

- Estricción difusa o global: La fuerza sobre la pieza alcanza un máximo a partir del cual la chapa no puede transmitir más carga, deformándose globalmente y de forma inestable hasta la rotura. En esta carga de rotura se produce la estricción global del material. Es el modo de fallo típico de una probeta cilíndrica a tracción (Figura 2.6).
- Estricción localizada (*necking*): En este caso la estricción aparece en una banda muy estrecha, del orden del espesor de la chapa. A partir de entonces se concentra en esa pequeña área casi toda la deformación posterior del material, mientras que el resto de la chapa no se deforma significativamente, produciendo adelgazamiento progresivo e inestable del material hasta el desgarró. Es el modo de fallo típico de materiales dúctiles (Figura 2.6).
- Fractura dúctil (*tearing*): Existe una ruptura del material o separación como consecuencia de la aparición, crecimiento y coalescencia de huecos en los planos de máxima tensión tangencial.
- Fractura frágil: La ruptura o separación de material se produce por clivaje, (separación directa de planos cristalinos por ruptura de enlaces).
- Arrugamiento: Se produce, bajo un estado de compresión, un pandeo local en una zona de la chapa. Es muy fácil de advertir visualmente.
- Rugosidad superficial: Tras el proceso se observa una degradación superficial de la pieza (aspecto inadecuado). Generalmente se debe a una mala lubricación o a que el material no es apto para el conformado.
- Recuperación elástica (*springback*): Es más característico del conformado por plegado, ya que la deformación por flexión de las fibras (no homogénea) hace que unas estén traccionadas y otras comprimidas. Afecta a la forma final de la pieza.

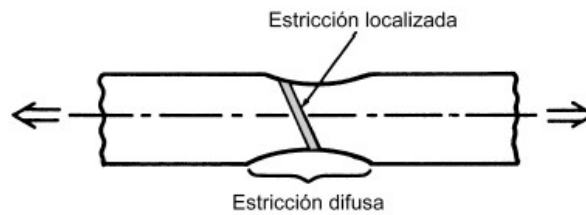


Figura 2.6: Ensayo de chapa a tracción diferenciando la estricción difusa y localizada.

Fuente: Bases para el Análisis e los Procesos de Conformado de Chapa”.

Carpóforo Vallellano Martín y Francisco-Javier García-Lomas Jung

## 2.2.2 Características del fallo

En los procesos de conformado de chapa los mecanismos más comunes de fallo son la estricción localizada (*necking*) y la fractura dúctil (*tearing*). Que suceda uno u otro depende principalmente de la ductilidad del material y de las condiciones de deformación durante el proceso:

- Los materiales muy dúctiles (p.ej.: aceros suaves) tienden a fallar por estricción localizada, mientras que los materiales menos dúctiles (p.ej.: aluminios aleados) pueden fallar por fractura dúctil sin estar precedida de una estricción localizada.
- Las condiciones de deformación dependen principalmente del tipo de conformado: en los procesos por tracción (Sección 2.1.3) dichas condiciones varían entre sí en función de si el material está fluyendo o no por las paredes de la matriz (evolución del proceso plástico), y cambia por tanto la tipología de fallo de cada uno: el estirado es un proceso con menor variedad de defectos asociados que la embutición, ya que en esta última el flujo de material es elevado y la convierte en un proceso más exigido (Figura. 2.7).

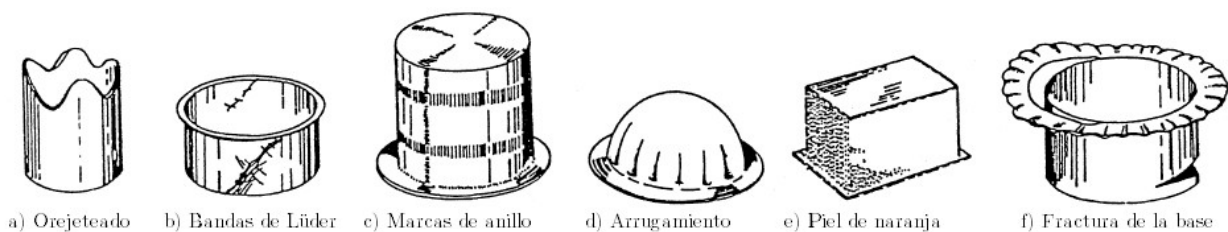


Figura 2.7: Algunos defectos típicos de la embutición. En un proceso de estirado no se obtienen los defectos a) b) ni c), Fuente: Sheet Metal Forming Processes, de Dorel Banabic.

## 2.3 Ensayos de conformado de chapa

La formabilidad (*formability*) es la capacidad de un material de soportar deformaciones plásticas hasta una geometría definida sin fallo. El conocimiento profundo tanto del material empleado como del proceso de conformado utilizado permite disminuir los costes de producción durante las etapas de diseño, desarrollo y fabricación de una geometría de uso industrial. Un estudio de formabilidad es una herramienta que permite optimizar el proceso mediante:

- **Previsión del fallo.** Conocer de antemano dónde y cómo se puede producir el fallo permite diseñar los elementos del proceso de manera que disminuya la probabilidad del mismo, que la seguridad de la solución sea adecuada y que no repercuta en gastos económicos correctivos durante el proceso de fabricación.
- **Corrección del fallo.** En los casos imprevistos de fallo hay que modificar el material, el espesor o cambiar las condiciones de deformación del proceso de conformado. Si el análisis de formabilidad previo es completo, el abanico de soluciones posibles se amplía, es más accesible y la metodología para decidir sobre la correcta se simplifica.

### 2.3.1 Tipos de ensayos

A finales del siglo XIX, debido al desarrollo de la tecnología del conformado de chapa, el estudio de la formabilidad se convirtió en objeto de investigación. La predicción del fallo permitiría hacer evolucionar las industrias y abaratar sus costes gracias a la optimización del proceso. Comenzaron por tanto a prosperar los diferentes métodos de evaluación de la formabilidad a través de ensayos experimentales. Actualmente se siguen utilizando versiones evolucionadas de los mismos, aunque dado su coste se tiende paulatinamente a métodos basados en la simulación numérica. Se resumen a continuación algunos de los ensayos más significativos que se han empleado o se emplean en la industria y la investigación:

A) Ensayos experimentales clásicos. Se trata de ensayos destructivos en los que simula un proceso de conformado estándar, y sus resultados se extrapolan a la geometría deseada. Se dividen en ensayos de estirado, ensayos de embutición y ensayos combinados de ambos métodos:



- Ensayos de estirado.
  - Ensayo Erichsen: Consiste en el estirado de una placa metálica circular mediante un punzón hemiesférico hasta la fractura. La formabilidad se mide como la altura de la copa (avance del punzón) hasta el momento de la fractura medida en milímetros, denominándose este parámetro *Erichsen Index* o Índice Erichsen (*IE*). [*Erichsen AM (1914) A new test for thin sheets. Stahl und Eisen 34:879–882*].
  - Otros ensayos: Diversos autores han tratado de mejorar el ensayo Erichsen modificando o añadiendo algunas variables del proceso: cambiando el tamaño de las herramientas, incorporando nuevos elementos como rebordes de sujeción en la matriz o realizando un taladro central en la probeta.
  
- Ensayos de embutición:
  - Ensayo Swift: Fue el primer modelo matemático coherente y corroborado sobre el conformado. Se basa en la embutición de placas circulares hasta geometrías cilíndricas, empleando diferentes diámetros de embutición. La formabilidad se expresa como el mayor radio de probeta que puede ser conformado con el punzón en un cilindro sin fallo [*Chung SY, Swift HW (1951) Cup-drawing from a flat blank. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 165:199–223*].
  - Otros ensayos: Diversos autores han tratado de mejorar el ensayo Swift modificando o añadiendo algunas variables del proceso: estudios sobre la lubricación y la velocidad de deformación, cambiando la geometría de la matriz o de las probetas.
  
- Ensayos combinados: Son ensayos en los que se abarca todo el rango de conformado posible tanto sin fluencia del material hacia la matriz como con fluencia máxima.

B) Diagrama Límite de Conformado o DLC (*Forming Limit Diagram, FLD*). Es una de las herramientas más útiles para diagnosticar el fallo en los procesos de conformado de chapa dada su sencillez. Reproduce los distintos estados tensionales presentes en un material mediante una **gráfica** donde se representan las deformaciones (Figura 2.8). Se desarrolla su concepto en la sección posterior.

- C) *Limit Dome Height Method (LDH)* o Método de la Altura Límite de la Copa: Este método fue el paso intermedio de la evolución del ensayo Erichsen clásico al DLC. Se emplean probetas rectangulares de ancho variable y se deforman por estirado con

punzones hemiesféricos hasta la fractura. Se mide la altura de la copa (avance del punzón) y se representa en función de la deformación menor en el plano de la chapa ( $\varepsilon_2$  %). La gráfica de los puntos genera una curva parecida al DLC que sirvió como inspiración para éste (Figura 2.9).

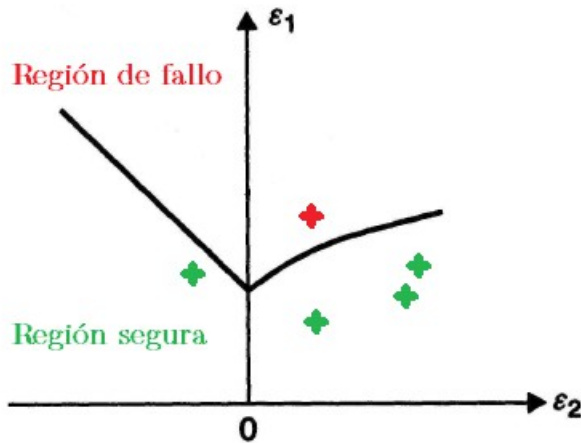


Fig. 2.8: Forma general del Diagrama Límite de Conformado, donde se diferencian las dos regiones que sirven como criterio: si los 5 puntos representados correspondieran al estado de deformación de una pieza, ésta fallará ya que uno de ellos se encuentra en la región inadmisibles.

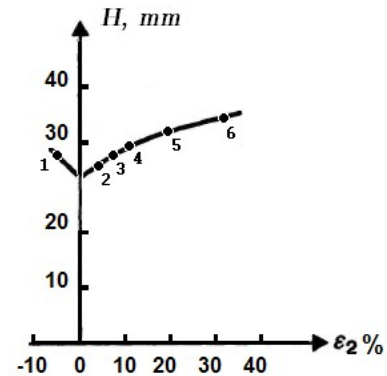


Fig. 2.9: Ejemplo de hipotético LDH. Se observa una similitud en la forma de la curva con el DLC.

### 2.3.2 Diagrama Límite de Conformado (DLC)

El DLC se introdujo en la década de los 60 con el objetivo de representar gráficamente el estado de deformaciones de cualquier material sometido a conformado. Se trata de una gráfica en la que se representan los estados tensionales en función de la deformación principal mayor en el plano de la chapa ( $\varepsilon_1$ ) frente a la deformación menor en el plano de la chapa ( $\varepsilon_2$ ), dividiendo a la gráfica en dos regiones: una región segura (zona inferior) y una región de fallo (zona superior). Éstas regiones están separadas por la curva denominada Curva Límite de Conformado o CLC. Solo hay que evaluar las deformaciones sobre la pieza final y dibujar el estado de deformación de los puntos más críticos en el DLC (Figura 2.8): dependiendo de la región donde se encuentren dichos puntos (por encima o por debajo de la CLC) se predice el fallo o no de la chapa, dando una idea de cuáles son las zonas más conflictivas de la pieza.

El primero en exponer estas ideas fue Gensamer, que a través de experimentos sobre varios estados tensionales representó las deformaciones globales de ciertos materiales en la

fractura (Figura 2.10). Fueron Keeler y Backofen los que desarrollaron este concepto mediante ensayos para varios materiales en estados de alargamiento biaxial ( $\epsilon_1 > 0$ ,  $\epsilon_2 > 0$ ) (Figura 2.11). La excelente correlación de los resultados con la realidad estableció que el DLC era verdaderamente una herramienta con la que evaluar los límites de formabilidad. Para ello se emplearon rejillas de círculos en la superficie del material que tras el proceso de conformado se transformaban en elipses, posibilitándose así la representación de deformaciones locales en lugar de globales ( $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ ). Goodwin completó el diagrama explorando las zonas de compresión ( $\epsilon_1 > 0$ ,  $\epsilon_2 < 0$ ). [Gensamer M (1946) *Strength and ductility. Transactions of the American Society for Metals 36:30–60*] [Keeler SP, Backofen WA (1963) *Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. Transactions of the American Society for Metals 56:25–48*] [Goodwin GM (1968) *Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. Society of Automotive Engineers No. 680093, 380–387*].

En la actualidad la determinación del DLC sigue siendo en muchos casos **experimental**, aunque algunas veces se ve complementada o incluso sustituida por métodos de optimización numérica, empleando el *Método de los Elementos Finitos* en conjunción con el uso de criterios de fractura dúctil.

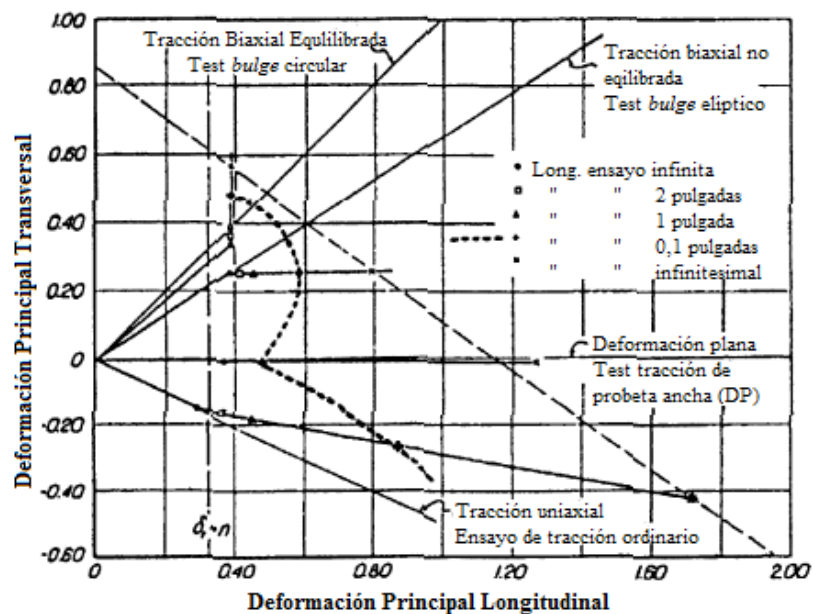


Fig. 2.10: Diagrama original definido por Gensamer, con el estado tensional y el tipo de ensayo empleado para alcanzarlo. Traducido de: *Sheet Metal Forming Processes*, de Dorel Banabic.

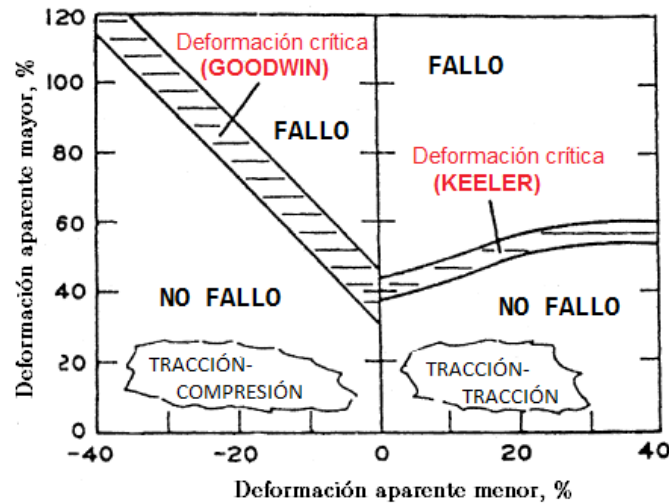


Fig. 2.11: DLC según Keeler (derecha) y Goodwin (Izquierda).  
Traducido de: Sheet Metal Forming Processes, de Dorel Banabic.

### 2.3.3 Obtención experimental del DLC

Los DLC originales pueden determinarse para la fractura del material (*tearing*) o para la estricción localizada (*necking*), ya que ambos son los modos de fallo principales que pueden afectar a una chapa durante un proceso de embutición (sección 2.2.2). Además, en general la fractura dúctil está precedida de una estricción localizada, convirtiéndose ésta en el fallo más limitante si existe y provocando que la región de fallo disminuya (Fig 2.12).

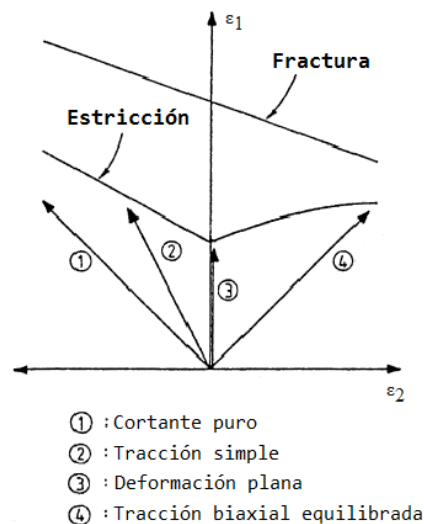


Fig. 2.12: Esquematación de un DLC real de fractura y de estricción. Nótese como la estricción, que en ocasiones precede a la fractura, es más limitante (baja la CLC).

Para obtener el DLC de una chapa en concreto, bien sea de estricción o de fractura, se requieren dos elementos básicos:

- Método para medir las deformaciones.
- Método para simular los estados tensionales.

1. **Método para medir las deformaciones.** Para medir una deformación se requiere la medida de dos longitudes de referencia. El método más empleado es el *Circle Grid Analysis* o “Análisis de la Rejilla de Círculos” (CGA): se cubre la superficie de la chapa, normalmente mediante ataque electroquímico, con una rejilla de círculos de diámetro “ $d_0$ ”. Cuando aparezcan deformaciones en los mismos (dado el proceso de conformado correspondiente), éstos cambiarán de forma y se convertirán generalmente en elipses; al ser la elipse una figura geométrica definida por 2 semiejes son éstos los que marcan las 2 direcciones principales de deformación que son perpendiculares entre sí. Y las medidas de longitud de dichos semiejes  $d_1$  y  $d_2$  definirán las deformaciones principales  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  a través de:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \qquad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right)$$

La elección del círculo como figura geométrica de referencia no es trivial: ante una solcitación externa en el plano de la chapa, todos los puntos de la circunferencia son perpendiculares a la misma, reflejando con su evolución lo que sucede en la chapa y ofreciendo además las direcciones principales de manera visual (Tabla 2.2). Ésto no sucede por ejemplo con un cuadrado si la carga exterior no es perpendicular a sus lados o vértices (Figura 2.13).

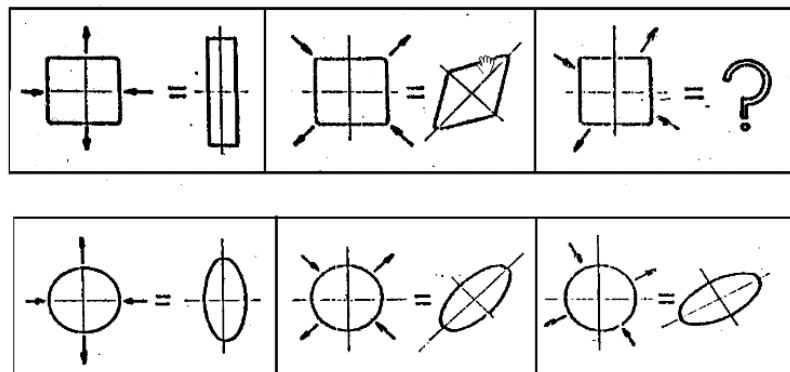


Figura 2.13: Diferencia de comportamiento de círculos y cuadrados ante la misma solcitación exterior.

El círculo se adapta a la misma, ofreciendo siempre una geometría susceptible de ser medida.






Estado tensional	Alargamiento Biaxial Equilibrado	Deformación Plana	Tracción Uniaxial	Cortante Puro	Compresión uniaxial
Representación CGA					
Relación de deformaciones	$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$	$\varepsilon_2 = 0$	$\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$	$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$	$\varepsilon_1 = -0,5\varepsilon_2$

Tabla 2.2: Hipotético círculo sometido a los principales estados tensionales que se representan en un DLC. El círculo original se encuentra sombreado.

La elección de una malla (y no de otra disposición) se debe a que así se asegura que las mediciones susceptibles de incluirse en el DLC (las elipses) se encuentran lo más cerca posible de la zona crítica, ya que durante un ensayo se desconoce generalmente el lugar donde se producirá la estricción/fractura (Figura 2.14). Una vez el ensayo llega a su fin y la malla se encuentra en su disposición final, se elige el método de obtención de la deformación crítica que delimita la CLC. El más común consiste en elegir las 3 elipses no abiertas más cercanas o dentro de la zona crítica y representar la media aritmética de sus deformaciones. Otro método muy completo consiste en tomar el área que rodea al defecto y medir 3 tipos de elipses: las que están atravesadas por la fractura (completamente abiertas), las que están afectadas por la fractura (parcialmente abiertas) y las inmunes a la misma. Algunos autores representan las 3 elipses y a continuación realizan una interpolación.

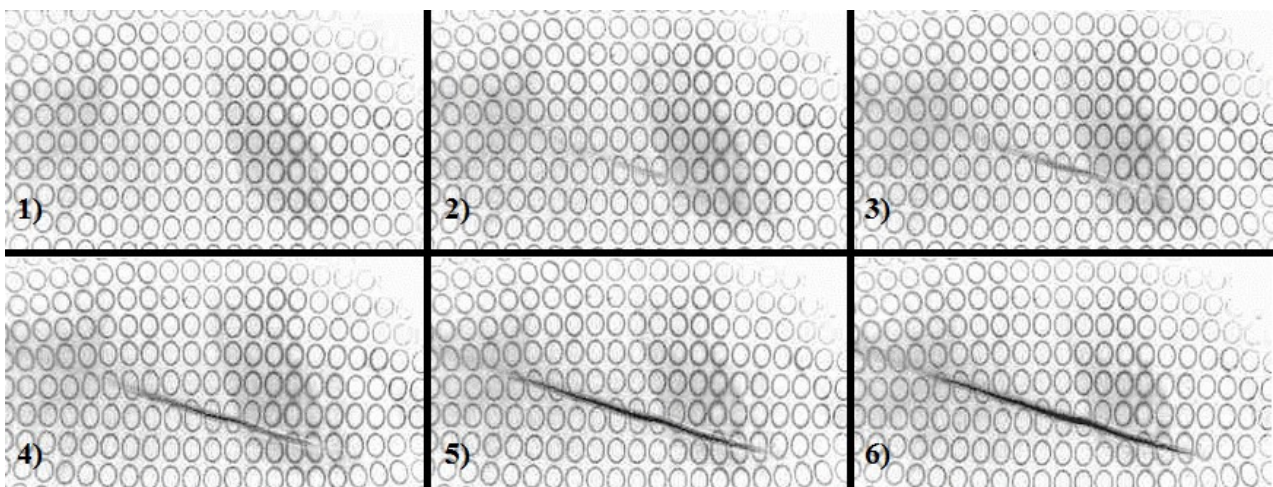


Figura 2.14: Secuencia fotográfica de un conformado de chapa donde se ha aplicado la rejilla de círculos: 1- Material previo a la estricción (no se puede determinar el lugar donde se producirá). 2- Aparición de la estricción. 3- Evolución de la estricción. 4- La estricción deriva en fractura. 5 y 6- Crecimiento de la fractura.

Fuente: www.IRDI.com

**2. Método para simular los estados tensionales.** En el caso experimental las simulaciones se llevan a cabo mediante ensayos. En ellos se miden pares de deformaciones ( $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$ ) bajo diferentes condiciones de carga para así cubrir la mayor parte del espectro deformacional que pueda alcanzar el material. En la práctica, suele abarcarse desde la tracción biaxial equilibrada ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ) hasta el cortante puro ( $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ ), aunque el estado intermedio de tracción uniaxial ( $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$ ) nunca se excede para materiales isotrópicos en el hueco de la matriz de conformado. En definitiva, los ensayos experimentales sirven para determinar sobre todo **la parte positiva del LDC**, mientras que la zona negativa (de compresión a tracción uniaxial) puede ser evaluada analítica y numéricamente con una buena precisión.

Los ensayos empleados en la industria pueden clasificarse en ensayos en el plano (*in-plane-tests*) y ensayos fuera del plano (*out-of-plane-tests*). De todos los existentes pueden destacarse algunos como el ensayo de tracción uniaxial (que permite obtener la parte negativa del DLC ( $\varepsilon_2 < 0$ ) con probetas rectangulares de entallas variables), el ensayo de abombamiento hidráulico (*bulge*, con el que se determina la parte positiva del DLC ( $\varepsilon_2 > 0$ ) mediante un sistema carente de fricción), el ensayo de estirado con punzón (con probetas circulares y punzón elíptico), el ensayo Keeler (que modifica los estados tensionales variando la forma del propio punzón), el ensayo Hecker (donde los caminos deformacionales varían solo con la lubricación), el ensayo Marciniak (con punzón plano) o el Nakazima, usado como método estándar en la norma ISO 12004 (con punzón hemisférico y probetas circulares con entallas).

### 2.3.4 Factores influyentes en el DLC

Los mecanismos de fallo dependen principalmente del material y del proceso de conformado (sección 2.2.2):

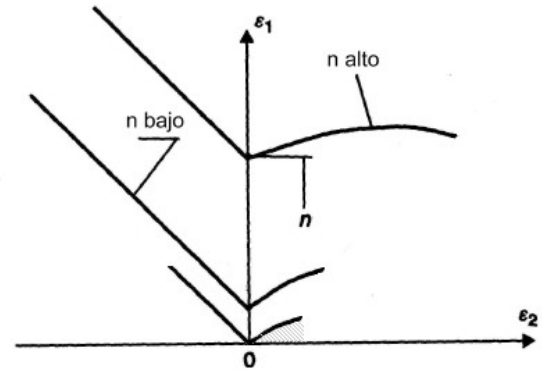
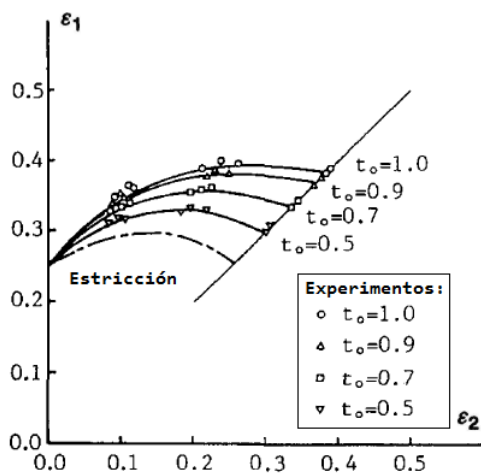
- a) **Material.** Dadas sus distintas propiedades metálicas y mecánicas, cada material tiene su propio DLC, si bien es cierto que materiales con propiedades similares tienen diagramas experimentales también similares.
  1. Espesor de la chapa “ $t$ ” (Figura 2.15). Cada espesor de un mismo material tiene su propio DLC. La región de conformado seguro aumenta a medida que lo hace el espesor hasta un valor crítico (de hecho, una de las soluciones industriales para piezas poco seguras es simplemente aumentar el espesor de la chapa). La influencia del espesor es alta para estados de tracción biaxial y disminuye hasta desvanecerse en la región de compresión pura.
  2. Endurecimiento por deformación “ $n$ ” (Figura 2.16). El exponente de

endurecimiento por deformación  $n$  mide la ductilidad antes de aparezca la estricción. La curva del DLC corta al eje de  $\varepsilon_1$  aproximadamente a un valor igual a  $n$ . Si este exponente disminuye (p.ej.: trabajo en frío previo) la curva disminuye proporcionalmente, reduciendo la zona de conformado seguro. Cuando  $n \rightarrow 0$ , la capacidad de conformado en la zona negativa del diagrama se agota pero es posible conformarla todavía bajo un estado de tracción biaxial.

3. Fractura dúctil (ductilidad) (Figura 2.17). La fractura dúctil produce una intensa concentración de la deformación según los planos de deformación principal máxima hasta producir la rotura del material (sección 2.2.1). Si el material es suficientemente dúctil la fractura aparece una vez iniciada la estricción localizada, y no modifica el DLC. Si el material tiene baja ductilidad (p.ej.: aleaciones de aluminio) la fractura puede aparecer antes de que lo haga la estricción, truncando el DLC por su extremo derecho.
  4. Velocidad de deformación “ $m$ ” (Figura 2.18). El coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación  $m$  solo tiene influencia destacable en el conformado superplástico, Coeficientes altos retrasan el adelgazamiento y por tanto el desarrollo de la estricción.
  5. Imperfecciones (Figura 2.18). Se definen como imperfecciones principales las reducciones de espesor, las inclusiones o la propia rugosidad superficial. Cuanto mayor es su número y/o tamaño más se reduce la forma de conformado seguro ya que la estricción localizada se inicia con más facilidad en las mismas.
- b) **Proceso de conformado.** Tanto el método de simulación como el método de medición de deformaciones provocan variaciones en el DLC:
1. Tamaño del círculo en el CGA ( $d_0$ ) (Figura 2.19). La malla de elipses en su estado final reproduce una serie de gradientes deformacionales. Cuanto mayor es el diámetro “ $d_0$ ” del círculo original, menor precisión el diagrama pues se están midiendo gradientes promediados con una distancia mayor. Su efecto no es muy importante en DLC de estricción ya que sus gradientes son bajos, pero sí puede ser relevante en diagramas de fractura.
  2. Trayectoria de deformación (Figura 2.20). Aunque en la generación del DLC debe ser recta, en los procesos industriales complejos (por ejemplo, re-embutición) la trayectoria puede variar, modificando las deformaciones críticas que alcanzan: si en las primeras deformaciones  $\varepsilon_2 < 0$  y en las segundas  $\varepsilon_2 > 0$  la zona segura de operación aumenta, pero si sucede al contrario (primero  $\varepsilon_2 > 0$ , después  $\varepsilon_2 < 0$ ) disminuye



3. Curvatura del punzón. Algunos estudios con variación del radio del punzón (hasta llegar a infinito -punzón recto-) demuestran que la formabilidad aumenta si el radio del mismo disminuye.
4. Temperatura. La formabilidad aumenta solo para algunos materiales si la temperatura aumenta (trabajo en caliente). Empleado en materiales “poco conformables”.
5. Velocidad de deformación. A medida que se aumenta la velocidad de deformación (avance del punzón), disminuye la zona de seguridad del DLC.
6. Presión normal. Importante en procesos como el hidroconformado, un aumento de la presión normal tiende a cerrar las posibles imperfecciones en forma de huecos y, por lo tanto, aumenta la zona de seguridad del DLC.



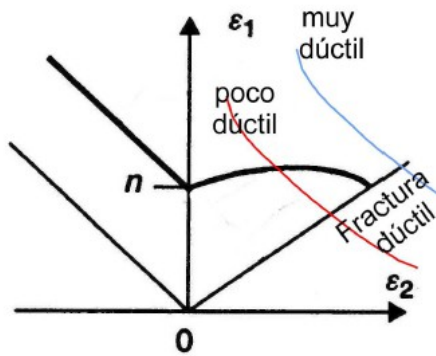


Figura 2.17: Efecto de la fractura dúctil, que trunca el DLC en las zonas cercanas a  $\epsilon_1 = \epsilon_2$ . Fuente: Apuntes de clase de Vallengano y García-Lomas, US

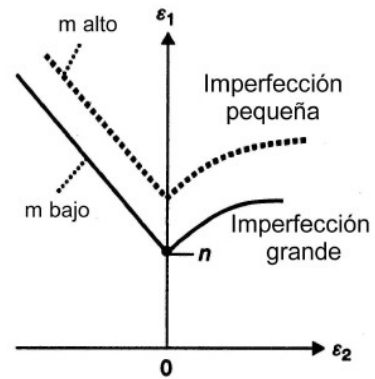


Figura 2.18: Influencia del coeficiente "m" y del número de imperfecciones, en el DLC. Fuente: Apuntes de clase de Vallengano y García-Lomas, US

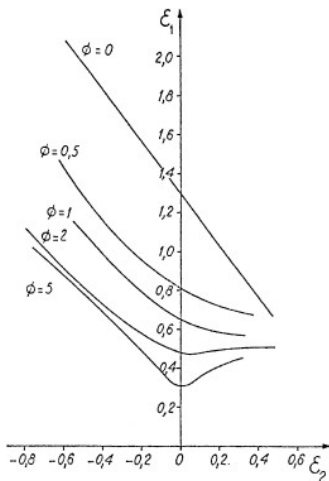


Figura 2.19: Variación de la zona central del DLC en función del diámetro inicial ( $\phi$ ) del círculo. Nótese que para un  $\phi = 0$ , se hablaría de elementos infinitesimales (gradiente real). Fuente: Sheet Metal Forming Processes, de Dorel Banabic.

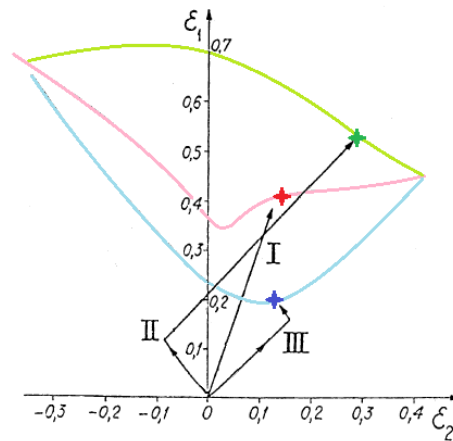


Figura 2.20: DLC de un material (I) y sus hipotéticas variaciones según el orden de variación de trayectoria: II representa primero una compresión y después un alargamiento biaxial, y III representa el inverso. Modificado de: Sheet Metal Forming Processes, de Dorel Banabic.

### 2.3.5. Uso del DLC

La obtención del DLC para un material y espesor dados es la base que la industria emplea para evaluar sus productos y procesos de conformado de chapa mediante la

comparación de las deformaciones de ésta con el diagrama correspondiente (Figura 2.21). Es habitual definir un índice de severidad, el cual define una banda o zona de peligro por debajo de la CLC en donde si algún punto de la pieza se encuentra, se debe tomar una decisión para abandonarla y así volver a entrar en la zona de seguridad (Figuras 2.22 y 2.23). El **equilibrio entre seguridad y gasto** es importante, ya que cuanto mayor sea el índice de severidad, mejores deben ser los materiales o procesos por reducción de la zona de seguridad.

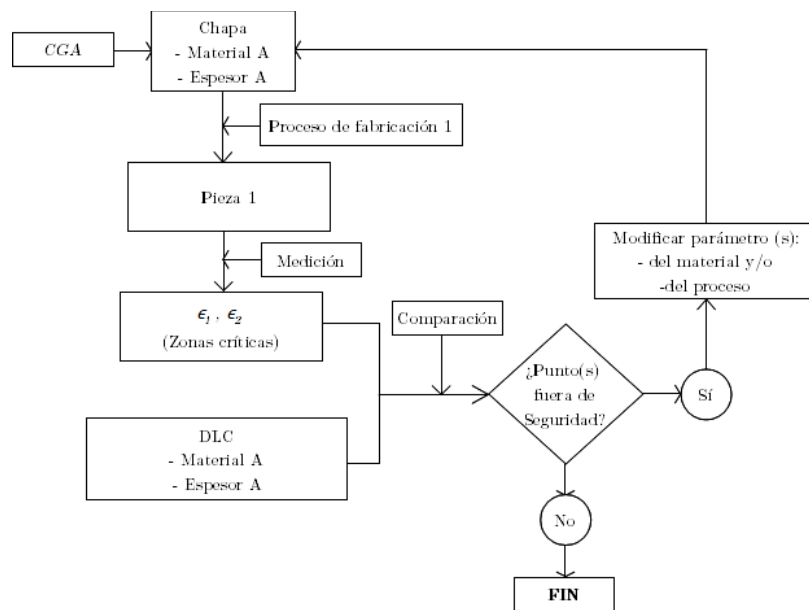


Figura 2.21 : Algoritmo básico del proceso de diseño de una pieza por conformado.

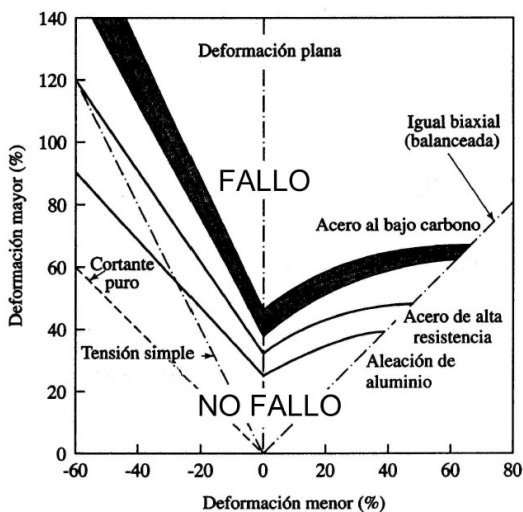


Figura 2.22: DLC para diferentes materiales. El acero al bajo carbono incorpora una banda de alerta (zona oscura). Fuente: Apuntes de clase de Vallellano y García-Lomas, US.

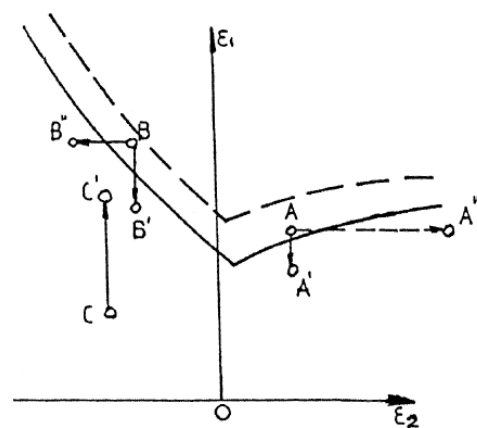


Figura 2.23.: Modificaciones de material en un DLC: Los caminos de A y B lo llevan a la zona de seguridad. El camino C-C' está abaratando costes a costa de acercarse a la zona de alerta.

## 2.4 El Ensayo Erichsen

### 2.4.1 Historia

A principios del siglo XX el ingeniero noruego Abraham Martinius Erichsen estableció su primer negocio en Alemania. Entre otras invenciones desarrolló el denominado *Ensayo de Copa* (hoy en día conocido como *Ensayo Erichsen*), el primer método disponible y patentado para determinar la calidad de chapas metálicas y que con el tiempo fue adoptado por los organismos internacionales de estandarización (Tabla 2.3). De esta manera se sentaron las bases de ensayos de conformado por chapa. La definición de la norma *UNE EN\_12258-1* sobre el ensayo Erichsen es la siguiente:

*"Ensayo de embutición mediante el cual una pieza de chapa, sujeta únicamente en su periferia, se deforma hasta la rotura mediante un punzón cónico con su extremo esférico. La altura de la copa, en milímetros, a la iniciación de la rotura es una medida de la ductilidad".*

Ensayo de copa (Erichsen)	
ISO 20482	JIS Z-7729
ISO 8490	UNI 3037
EN 14-58	UNE 7080
EN 14-67	GOST 10 510
DIN 50 101	ICONTEC 21
DIN 50 102	SIS 11 26 35
DIN EN ISO 20482	SABS 0132-197
BS 3855:1965	PN-68 H-04400
NF A 03-602	MSZ 5704-67
NF A 03-652	CSN 42 046
ASTM E 643-84	GB 4156-84JIS
IS 1756:1961	JIS Z-2247

Tabla 2.3: Algunas de las normativas actuales (nacional e internacional) con contenido relacionado sobre el ensayo Erichsen. Fuente: [www.Erichsen.de](http://www.Erichsen.de)

Se trata de un test **destructivo** para evaluar la **formabilidad** de chapas metálicas (sección 2.3.1) mediante un solo parámetro: la altura de la copa (avance del punzón) hasta el momento de la fractura medida en milímetros, denominándose este parámetro *Erichsen Index* o Índice Erichsen (*IE*). Las chapas durante el ensayo estándar se encuentran bajo un

estado predominante de alargamiento biaxial equilibrado, esto es, sirve para comparar chapas que se conforman bajo **estirado**.

Es un test sencillo, rápido de ejecutar, de bajo costo, con probetas fáciles de fabricar, cuya técnica está consolidada desde hace más de un siglo, e ideal para un proceso de control y aceptación de material (entrada al almacén). Sin embargo no existe una relación precisa entre el IE obtenido para una dupla material-espesor y la formabilidad de dicha dupla bajo unas condiciones de producción diferentes (p.ej.: punzón distinto a una esfera para una pieza final). Además, la precisión del mismo es baja debido al pequeño tamaño de las piezas. Estos factores disminuyen su posible uso extendido en las técnicas de prevención del fallo industriales.

## 2.4.2 Componentes básicos y dimensiones

La máquina de ensayos consta necesariamente de los denominados elementos sensibles, los cuales en el ensayo original tienen las siguientes dimensiones (Figuras 2.24 y 2.25).

- 1.- **Punzón** (*punch*). Es la hemiesfera que transmite la fuerza final a la chapa y, por tanto, deforma el material produciendo la forma de “copa” típica de un ensayo Erichsen.
- 2.- **Prensa-Chapa** (*blank holder*). Se encarga de sujetar la chapa a ensayar por una de las caras, aplicando la presión necesaria para asegurar el proceso de estirado.
- 3.- **Matriz** (*die*). Por su oquedad central fluye el material empujado por el punzón. El borde achaflanado (radio de curvatura) facilita la fluencia del material.
- 4.- **Probeta** (*specimen*).

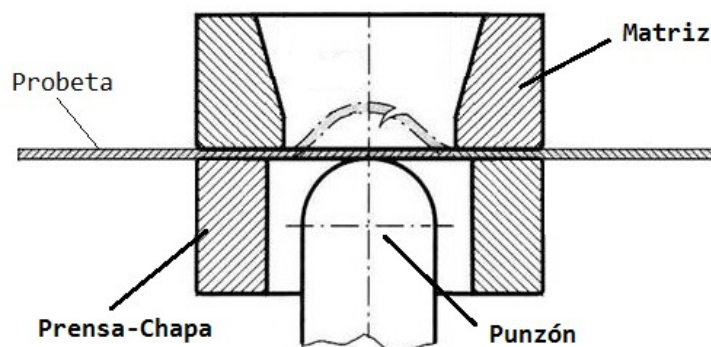


Figura 2.24: Esquema de los elementos sensibles de una máquina Erichsen. Fuente: me.autac.ir

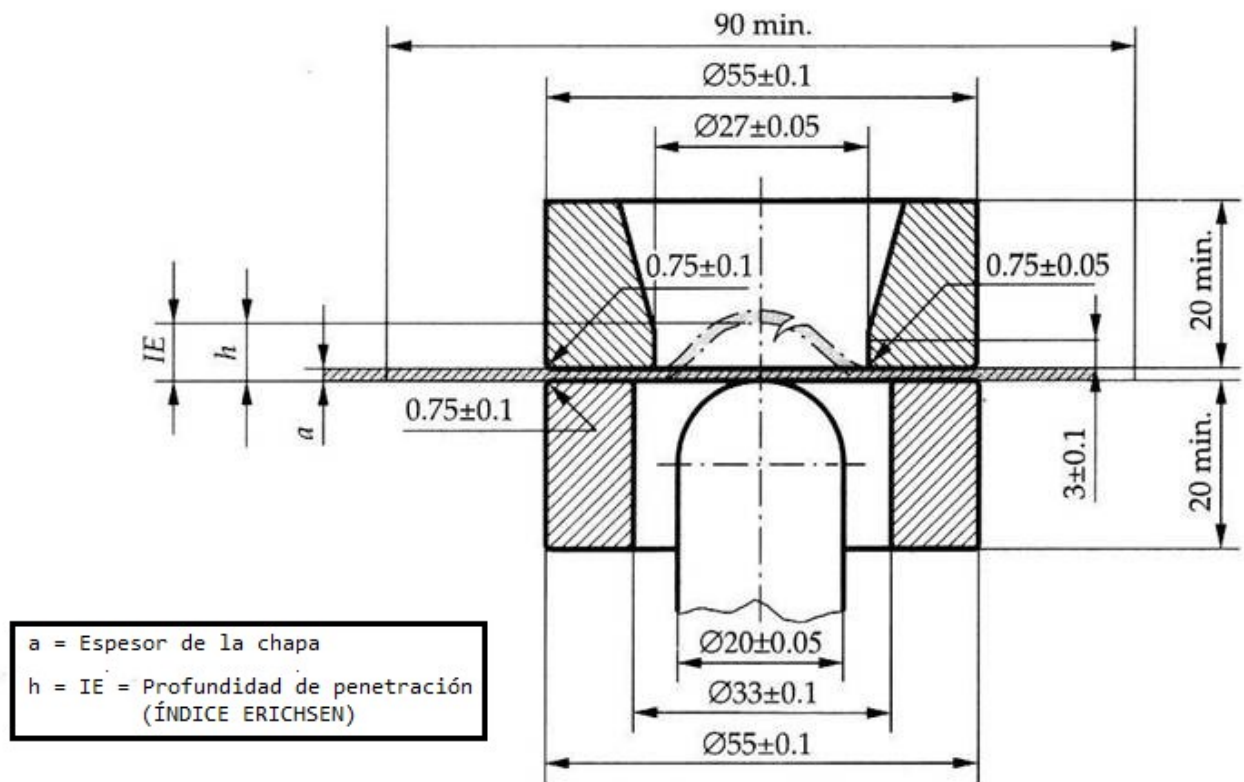


Figura 2.25: Esquema de las dimensiones principales de los elementos sensibles de una Máquina Erichsen y principales parámetros a tener en cuenta (" $a$ " e " $IE$ "). Fuente: me.autac.ir

Es habitual incluir un dispositivo de medida de la profundidad de la copa en tiempo real. Éste puede estar formado de una dupla escala lineal-escala circular o en las máquinas más modernas, de un dial electrónico. (Figura 2.26).



Figura 2.26: Comparación de una máquina específica de ensayos Erichsen manual (izquierda) y un centro universal de ensayo de láminas para investigación (derecha). Fuente: www.erichsen.de

### 2.4.3 Procedimiento del ensayo

El estándar ASTM E643 "Método de ensayo estándar para deformación de placas metálicas mediante punzón esférico" (*Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material*) establece las siguientes exigencias en cuanto al ensayo Erichsen:

- Fuerza mínima en el prensa-chapa de 9800 N, tal que no permita el flujo de metal.
- Debe disponer de un dispositivo para medir la copa formada por el punzón, con una precisión de  $\pm 0,05$  mm.
- El punzón debe moverse en dirección axial perpendicular a la superficie de la probeta. No puede girar ni moverse lateralmente durante el ensayo.
- La cabeza del penetrador [el punzón] debe ser esférica ( $\phi 20 \pm 0,05$  mm) y solo esta porción del penetrador debe hacer contacto con la probeta.
- El punzón debe ser suficientemente rígido y no deformarse. Su superficie debe estar pulida (Ra 4) y tener una dureza de al menos 62 HRC".
- Solo es aplicable a probetas con espesores entre 0,2 y 2,0 mm.
- Deben ensayarse al menos 3 probetas, que pueden ser circulares o rectangulares con tal de que su diámetro / anchura mínimo sea 90 mm.
- El ensayo termina cuando aparece la primera grieta en la cima de la copa. Si el fallo sucede en la base de la copa, el resultado es inválido.

Para realizar un ensayo, explicado de manera básica, se coloca la chapa sobre la matriz y se sujeta con el prensa-chapa a la fuerza especificada. Tras la lubricación, se inicia el avance del punzón que deforma la chapa. Cuando se observa el primer defecto, se detiene el ensayo y se mide el Índice Erichsen en milímetros (Figura 2.27).

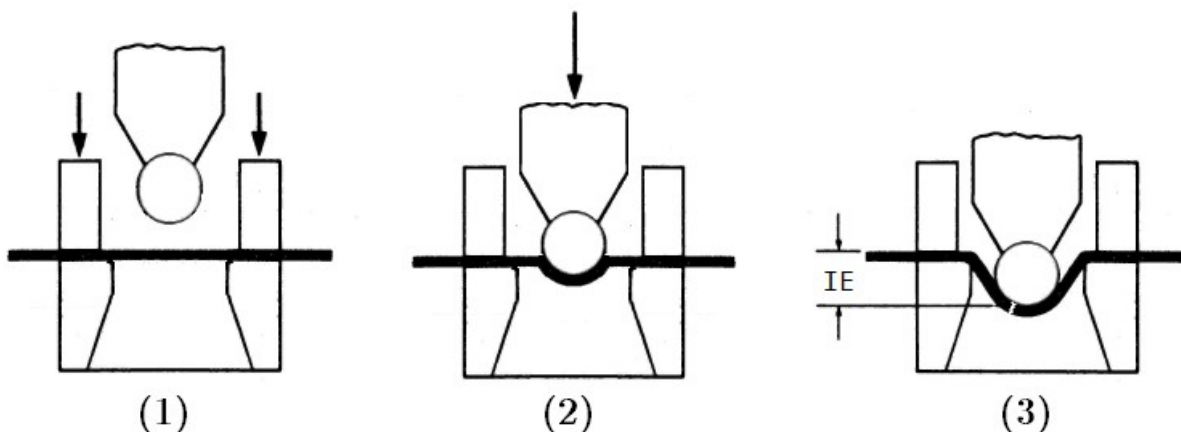


Figura 2.27: Esquema de las etapas básicas del ensayo Erichsen: sujeción de la chapa (1), avance del punzón (2) y primer defecto (3)

### 2.4.4 Variaciones del ensayo

Históricamente han existido evoluciones respecto al ensayo original que consisten en variaciones geométricas de la máquina (sección 2.3.1), incluso el DLH modifica unicalmente las probetas, haciendo que su ancho pueda ser menor de lo exigido en un ensayo Erichsen. Usar la máquina Erichsen para ensayos de diferente naturaleza para la que fue fabricada amplía sus posibilidades en los estudios de conformabilidad. Por ejemplo, es muy útil su utilización para la representación de un DLC. Para cubrir diferentes estados deformacionales de la chapa, se pueden emplear probetas rectangulares de ancho variable, cuyo largo sea suficiente sea cercano a lo especificado por la norma. De esta manera una probeta cuadrada reproducirá el estado original de un ensayo Erichsen (tracción biaxial equilibrada), y probetas más estrechas reproducirán otros estados deformacionales, tanto más alejados del biaxial como sea su estrechez (Figura 2.28). Ésta es la base de los ensayos que se realizan en el Capítulo 4. El *IE* no puede ser el parámetro del ensayo ya que se necesitan las dos deformaciones principales en el plano de la lámina, por lo que la opción generalmente usada es un CGA.

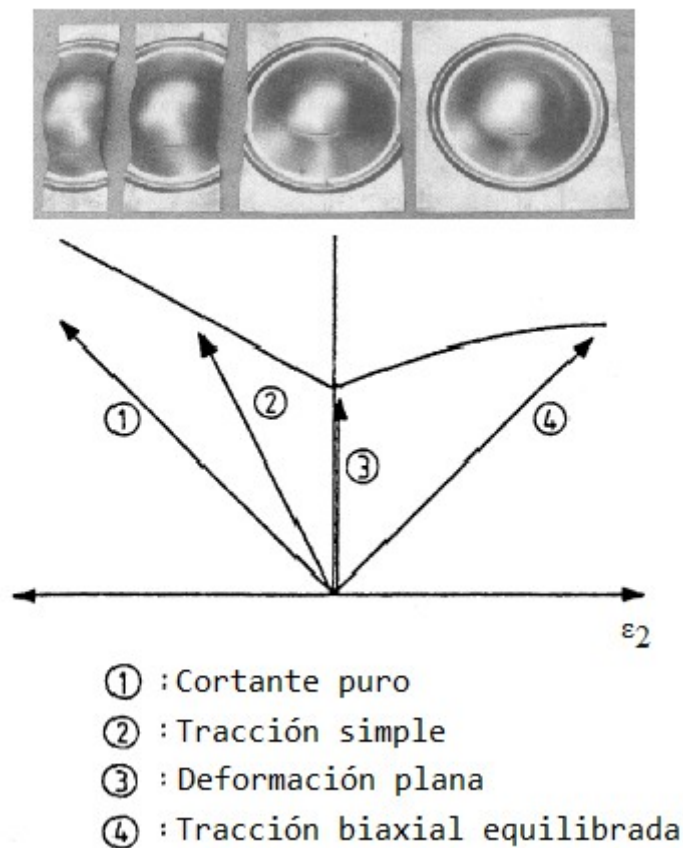


Figura 2.28: Probetas de ancho variable (ya ensayadas) y sus correspondientes estados deformacionales.

Fuente: Apuntes de clase de Vallellano y García-Lomas, US.