

64  
2 es.

**Universidad Nacional Autónoma de**  
**Facultad de Ingeniería**

**CONFORMABILIDAD  
DE  
PRODUCTOS PLANOS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA,  
ÁREA MECÁNICA

PRESENTAN:

**MIGUEL FONSECA FONSECA**  
**ESTEBAN PACHECO VILLAVICENCIO**

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. UBALDO EDUARDO MÁRQUEZ AMADOR

MÉXICO, D.F.  
1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

265122



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## INDICE

	página
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	1.1
<b>Capítulo 2. Comportamiento mecánico de los metales</b>	2.1
2.1 Ensayo de tracción	2.1
2.1.1 Diagrama esfuerzo-deformación ingenieril	2.2
2.1.2 Diagrama esfuerzo-deformación real	2.4
2.1.3 Ley de Hooke	2.9
2.2 Criterios de cedencia	2.15
2.2.1 Criterio de la máxima energía de distorsión	2.16
2.2.2 Criterio del esfuerzo cortante máximo	2.18
2.3 Parámetros de deformación plástica	2.21
<b>Capítulo 3. Conformabilidad</b>	3.1
3.1 Procesos de conformado volumétrico	3.2
3.1.1 Laminado	3.3
3.1.2 Forjado	3.5
3.1.3 Extrusión	3.8
3.1.4 Estirado de alambre y barras	3.12

---

	página
<b>3.2 Procesos de conformado plano</b>	<b>3.13</b>
3.2.1 Doblado	3.14
3.2.2 Embutido	3.18
3.2.3 Estirado de lámina	3.21
<b>3.3 Ensayos de conformabilidad de productos planos</b>	<b>3.22</b>
3.3.1 Ensayo de tracción uniaxial	3.22
3.3.2 Ensayo de dureza	3.24
3.3.3 Ensayos de doblado	3.25
3.3.4 Ensayos de estirado	3.27
3.3.5 Ensayos de embutido	3.29
<b>Capítulo 4. Problemas del conformado de lámina y diagrama límite</b>	<b>4.1</b>
4.1 Problemas del conformado de lámina	4.1
4.1.1 Fracturas	4.2
4.1.2 Ondulaciones y pliegues	4.3
4.1.3 Distorsión de la forma	4.3
4.1.4 Pérdida de metal	4.4
4.1.5 Texturas superficiales indeseables	4.4
4.2 Método y técnicas del diagrama de conformabilidad límite	4.5
4.2.1 Técnica del mallado circular	4.8

	página
4.2.2 Diagrama de conformabilidad límite	4.12
4.2.2.1 Factores que influyen en el DCL	4.15
4.2.2.2 Interpretación del DCL	4.17
<b>Capítulo 5. Evaluación de conformabilidad y análisis de resultados</b>	<b>5.1</b>
5.1 Procedimiento experimental	5.2
5.1.1 Ensayo de tracción	5.2
5.1.2 Diagrama de conformabilidad límite	5.5
5.1.2.1 Grabado	5.6
5.1.2.2 Ensayo Erichsen	5.7
5.1.2.3 Método de medición	5.9
5.2 Resultados	5.11
5.2.1 Ensayo de tracción (reportes)	5.11
5.2.1.1 Anisotropía (datos y resultados)	5.29
5.2.2 Ensayos Erichsen	5.30
5.2.3 Diagramas de conformabilidad límite (mediciones y gráficas)	5.34
5.3 Análisis de resultados	5.43
<b>Capítulo 6. Conclusiones</b>	<b>6.1</b>
<b>Capítulo 7. Referencias bibliográficas</b>	<b>7.1</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos materiales, más deformables, ha permitido que la forma de piezas fabricadas en lámina sea más elaborada y variada (zonas con deformaciones altas, radios pronunciados, curvaturas irregulares). Por ende, el análisis y planeación del proceso de manufactura se ha vuelto más complejo, tardado y costoso.

En la búsqueda de técnicas simples, más rápidas y económicas, se ha tratado de encontrar correlaciones entre los procesos industriales de estampado de láminas y las pruebas o ensayos de simulación para lámina. Sin embargo, estas correlaciones no han sido muy satisfactorias, ya que los ensayos sólo evalúan la capacidad de deformación de una lámina para estirado, doblado, o embutido. Por lo tanto, no pueden simular cabalmente un proceso de estampado industrial que implica la combinación de dos o más procesos de conformado (estirado, embutido, doblado).

Una técnica que arroja resultados que tienen una buena correlación con los procesos industriales de conformado de lámina, implica obtener su

diagrama de conformabilidad límite. Este diagrama permite conocer los estados de deformación que no producen falla en la lámina.

Aplicando esa técnica, se evaluará la conformabilidad de productos planos (láminas) nacionales y para uso automotriz. Este es el objetivo del presente trabajo.

Primero, se plantean algunos conceptos importantes sobre el comportamiento mecánico de los metales (capítulo 2); luego, se describen brevemente algunos procesos de conformado y ensayos de conformabilidad (capítulo 3); en el capítulo 4, se mencionan algunos problemas del conformado de lámina y se describe el diagrama de conformabilidad límite.

En el capítulo 5, se presentan los resultados de las pruebas de tracción, los ensayos Erichsen y los diagramas de conformabilidad límite de cuatro láminas diferentes; se define y precisa el procedimiento experimental que se siguió y se hace el análisis de los resultados.

Por último, el capítulo 6 contiene las conclusiones del trabajo, y el capítulo 7 las referencias bibliográficas utilizadas.

## **CAPÍTULO 2**

### **COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS METALES**

La selección de los materiales se hace considerando sus propiedades y las condiciones de funcionamiento de las distintas aplicaciones. El primer paso en el proceso de selección es analizar la aplicación y determinar las propiedades más importantes que debe tener el material. Dentro de éstas, y para los fines del presente trabajo, importan las mecánicas.

Al evaluar las propiedades mecánicas de un material nos podemos auxiliar de diversos ensayos o pruebas. Uno de los ensayos que más información nos puede proporcionar es el de tracción, especialmente tratándose de metales.

#### **2.1 Ensayo de tracción**

En la prueba de tracción, una muestra es sometida a una fuerza uniaxial que va aumentando continuamente mientras se realizan observaciones simultáneas de su elongación.



### 2.1.1 Diagrama esfuerzo-deformación ingenieril

Una curva esfuerzo-deformación ingenieril se grafica según las medidas carga-elongación. Figura 2.1.

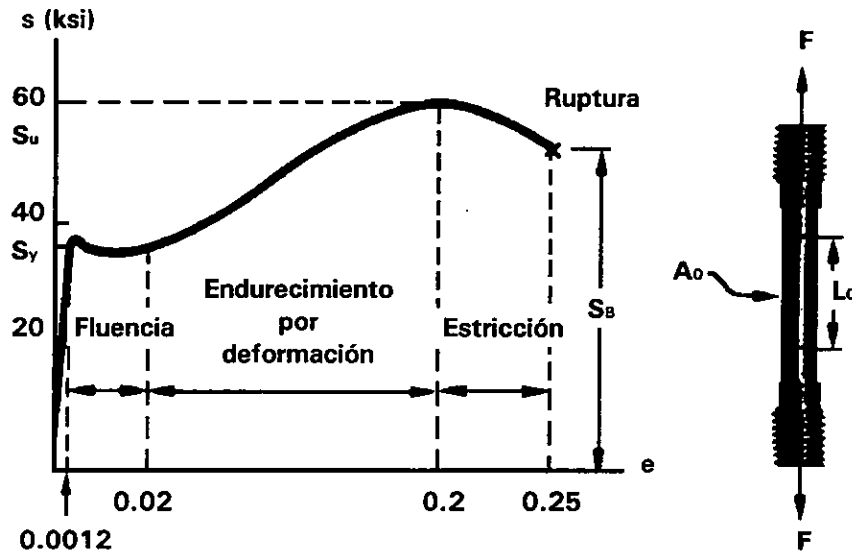


Figura 2.1. Diagrama esfuerzo-deformación ingenieril de un material dúctil típico.

El esfuerzo graficado en la curva esfuerzo-deformación es la resistencia longitudinal promedio en la muestra sujeta a tracción, y se obtiene al dividir la carga ( $F$ ) entre el área original de la sección transversal de la muestra ( $A_0$ ).

$$s = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

La deformación empleada en la curva esfuerzo-deformación ingenieril es la deformación lineal promedio, obtenida al dividir la elongación del tramo de medición de la muestra ( $\delta$ ) entre su longitud original ( $L_0$ ).

$$e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

La forma y magnitud de la curva esfuerzo-deformación de un metal dependerá de su composición, tratamiento térmico, historia previa de su deformación plástica, su rapidez de deformación, la temperatura y el estado de esfuerzo impuesto durante la prueba. Los parámetros que son utilizados para describir la curva esfuerzo-deformación de un metal son: la resistencia a la tracción, la resistencia a la cedencia, el porcentaje de elongación y la reducción de área. Los dos primeros son parámetros de resistencia; los dos últimos indican ductilidad.

En la región elástica el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación. Cuando la carga excede el valor correspondiente a la resistencia a la cedencia, la muestra sufre deformación plástica, es decir, se deforma permanentemente y el esfuerzo para producir una deformación plástica posterior aumenta (el metal se endurece por deformación). El volumen de la muestra permanece constante durante la deformación plástica y, a medida que la muestra se elonga, el área de la sección transversal decrece uniformemente a lo largo del tramo de medición. Inicialmente, el endurecimiento por deformación compensa la disminución en el área y el esfuerzo ingenieril sigue aumentando conforme la

deformación aumenta. Eventualmente se llega a un punto en donde la disminución en el área de la sección transversal es mayor que el aumento de la carga por endurecimiento. Esta condición se alcanzará en algún lugar de la muestra que sea ligeramente más débil que los demás. Toda la deformación plástica posterior se concentrará en esa región, y en la muestra se comenzará a formar un adelgazamiento, provocando la disminución del esfuerzo ingenieril. Al continuar la tracción, la muestra seguirá deformándose hasta que ocurra la fractura.

El diagrama esfuerzo-deformación ingenieril es muy utilizado en el diseño mecánico ya que con él se obtienen las propiedades de los materiales requeridas para hacer un buen diseño. Recordemos que, al diseñar, se debe evitar que los materiales vayan a estar sujetos a cargas que rebasen el punto de fluencia. Todos los componentes mecánicos sólo deben deformarse elásticamente.

### **2.1.2 Diagrama esfuerzo-deformación real**

La reducción en el esfuerzo ocurre más allá del punto de la resistencia a la tracción máxima, debido a la definición de esfuerzo ingenieril, ya que se utiliza el área original  $A_0$ . Esto no es correcto porque

el área cambia continuamente. El esfuerzo real y la deformación real se definen como sigue:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \int \frac{dL}{L_0} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (2.4)$$

donde "A" es el área instantánea sobre la que se aplica la fuerza (F). La expresión  $\ln(A_0/A)$  debe utilizarse después de iniciada la estricción. El esfuerzo real continúa incrementándose después de la estricción debido a que, aunque la carga requerida disminuye, el área disminuye aún más. Figura 2.2.

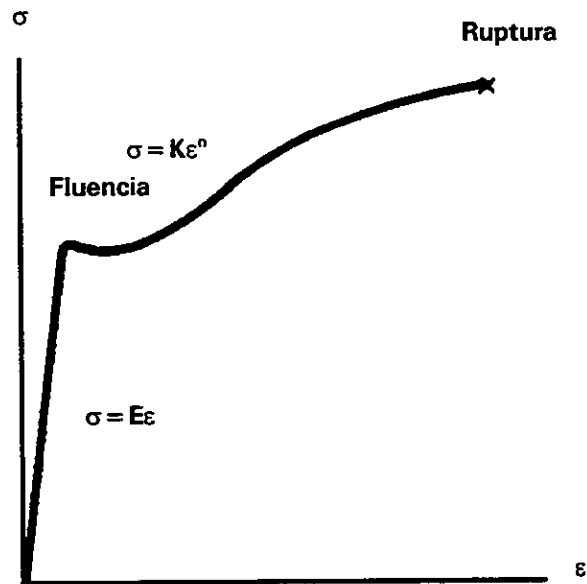


Figura 2.2. Diagrama esfuerzo-deformación real de un material dúctil típico.

El esfuerzo real ( $\sigma$ ) puede ser expresado en términos del esfuerzo ingenieril ( $s$ ), mediante:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}(e + 1) = s(e + 1) \quad (2.5)$$

Esta ecuación supone el volumen constante y una distribución homogénea de la deformación, a lo largo del tramo de medición, en la muestra de tracción. De este modo, la Ec. (2.5) sólo debe ser utilizada hasta el comienzo de la formación del cuello. Más allá de la carga máxima, el esfuerzo real debe ser determinado con las medidas verdaderas de carga y área transversal.

La deformación real ( $\varepsilon$ ) puede ser calculada a partir de la ingenieril ( $e$ ) por medio de:

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (2.6)$$

Esta ecuación es aplicable hasta el comienzo de la formación del cuello por las razones antes señaladas. Más allá de la carga máxima, la deformación verdadera debe considerar el área real o las medidas del diámetro:

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right) D_0^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right) D^2} = 2 \ln \frac{D_0}{D} \quad (2.7)$$

Al diagrama esfuerzo-deformación real también se le conoce como curva de flujo, puesto que representa las características básicas del flujo plástico de un material. Los puntos en la curva de flujo pueden ser

considerados como la resistencia a la cedencia del material deformado en tracción. Si la carga es removida en cualquier punto y, luego, es reaplicada el material se comportará elásticamente a lo largo de todo el rango de la recarga.

La curva de flujo de muchos metales en la región de deformación plástica uniforme puede ser expresada como sigue:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.8)$$

donde "n" es el exponente de endurecimiento por deformación y "K" es el coeficiente de resistencia. Una gráfica logarítmica esfuerzo-deformación real resultará una línea recta, hasta la carga máxima, si la Ec. (2.8) es satisfecha por los datos de la figura 2.3.

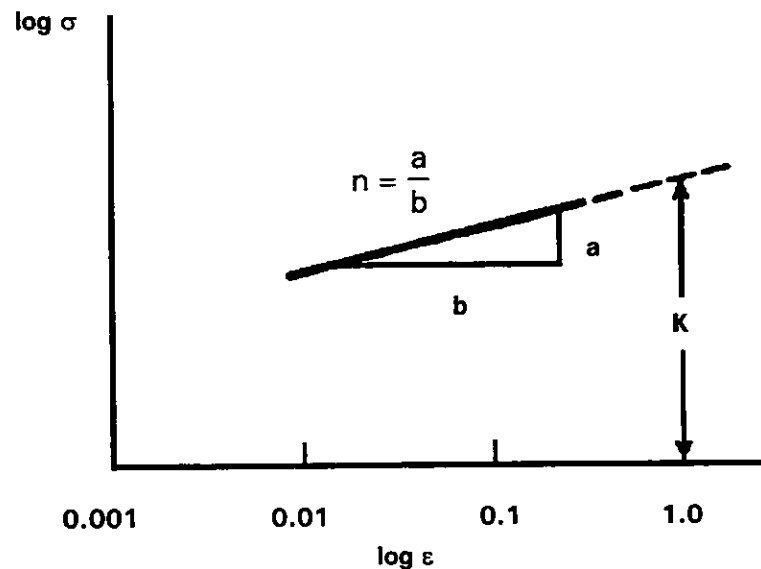


Figura 2.3. Diagrama logarítmico esfuerzo-deformación real.

La pendiente lineal de esa recta es "n" y "K" es el esfuerzo real en  $\varepsilon = 1.0$ , que corresponde a una reducción de área de 0.63. El exponente de endurecimiento por deformación puede tener valores desde  $n=0$  (sólidos perfectamente plásticos), hasta  $n=1$  (sólidos elásticos). Figura 2.4. Para muchos metales "n" presenta valores entre 0.1 y 0.5.

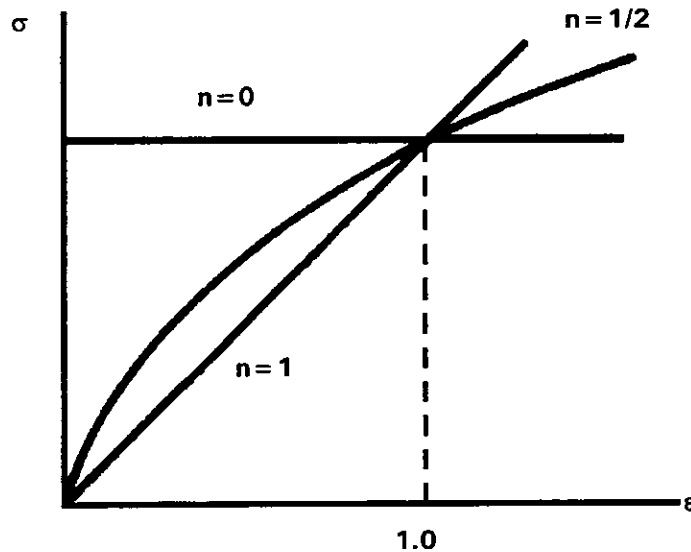


Figura 2.4. Curva  $\sigma = K\varepsilon^n$  para varios valores de "n".

Es importante notar que la rapidez de endurecimiento por deformación  $d\sigma/d\varepsilon$  equivale al exponente de endurecimiento por deformación.

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \varepsilon)} = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.9)$$

Algunas veces los datos no concuerdan con la Ec. (2.8) y producirán en una gráfica logarítmica una línea recta, acorde con:

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (2.10)$$

Se ha demostrado (Ref. 7.1) que  $\epsilon_0$  puede considerarse como la cantidad de endurecimiento por deformación, que el material recibió, previo a la prueba de tracción.

Otra variación común de la Ec. (2.8) es la siguiente (Ref. 7.1):

$$\sigma = \sigma_0 + K\epsilon^n \quad (2.11)$$

donde  $\sigma_0$  es la resistencia a la cedencia. Esta ecuación puede ser más satisfactoria que la Ec. (2.8) porque implica que a deformación real cero el esfuerzo es cero. También se ha demostrado (Ref. 7.1) que  $\sigma_0$  puede ser obtenida de la intersección de la porción del endurecimiento por deformación de la curva esfuerzo-deformación y la línea del módulo elástico:

$$\sigma_0 = \left( \frac{K}{E^n} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (2.12)$$

### 2.1.3 Ley de Hooke

Del diagrama esfuerzo-deformación pueden determinarse algunas propiedades importantes del material, tales como su módulo de elasticidad, y si el material es dúctil o frágil. También puede determinarse si las deformaciones generadas en la muestra desaparecerían después de



que se hubiera retirado la carga, en cuyo caso el material se habría comportado elásticamente.

En el diseño de componentes mecánicos y estructurales se busca que las deformaciones que sufran sean pequeñas. Así, los diseñadores se auxilian de la parte lineal del diagrama esfuerzo-deformación. En esta zona, llamada elástica, el esfuerzo ( $\sigma$ ) es directamente proporcional a la deformación ( $\epsilon$ ):

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.13)$$

Esta relación es la ley de Hooke para un material isotrópico sometido a una carga axial en un solo eje, donde "E" es el módulo de elasticidad del material.

Ahora se considerará un material sometido a una carga multiaxial; es decir, a fuerzas que actúan en las direcciones de los tres ejes coordenados produciendo los esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , todos diferentes de cero. Para esto, se tomará un elemento del material en forma de cubo de arista unitaria. Bajo la carga multiaxial el elemento se convierte en un paralelepípedo rectangular de lados  $1 + \epsilon_x$ ,  $1 + \epsilon_y$  y  $1 + \epsilon_z$ , en donde  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$  son las deformaciones normales en las direcciones de los ejes coordenados. Figura 2.5.

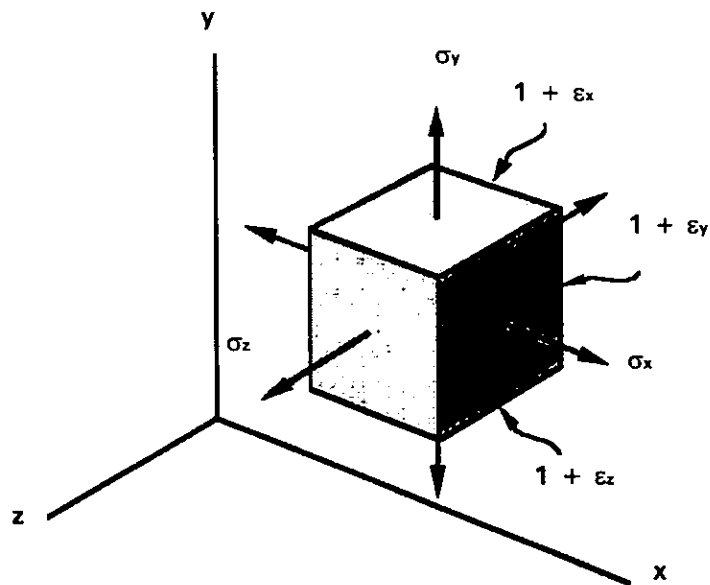


Figura 2.5. Elemento sometido a carga multiaxial.

Para expresar las componentes de la deformación  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$  en términos de los esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  se considera separadamente el efecto de cada componente del esfuerzo y se combinan los resultados obtenidos. Utilizaremos el principio de la superposición. Este principio es válido siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

1. Cada efecto está linealmente relacionado con la carga que lo produce.
2. La deformación que resulta de cualquier carga dada es pequeña y no afecta las condiciones de aplicación de las demás cargas.

En el caso de cargas multiaxiales, la primera condición se satisface si los esfuerzos no exceden el límite de proporcionalidad del material, y la

segunda también se cumple si el esfuerzo en cualquier cara no causa, en las otras, deformaciones suficientemente grandes como para afectar el cálculo de esfuerzos en esas caras.

Considerando primero el efecto de  $\sigma_x$ , la deformación en la dirección "x" es igual a  $\sigma_x/E$ , y en las direcciones "y" y "z" es igual a  $-\nu\sigma_x/E$ . Análogamente: para  $\sigma_y$ , la deformación en la dirección "y" es igual a  $\sigma_y/E$ , y en las direcciones "x" y "z" es igual a  $-\nu\sigma_y/E$ ; para  $\sigma_z$ , la deformación en la dirección "z" es igual a  $\sigma_z/E$ , y en las direcciones "x" y "y" es igual a  $-\nu\sigma_z/E$ . Combinando estos resultados, se concluye que las deformaciones son:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= +\frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E}\end{aligned}\tag{2.14}$$

Las relaciones (2.14) son la ley generalizada de Hooke para carga multiaxial, donde "v" es el coeficiente de Poisson. En éstas, se supuso que no habían esfuerzos cortantes involucrados. En una situación más general los esfuerzos cortantes  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  y  $\tau_{zx}$  están presentes, así como las componentes  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{zy}$  y  $\tau_{xz}$ . Estos esfuerzos no tienen efecto directo sobre las deformaciones normales y, siempre que todas las deformaciones sean

pequeñas, no afectarán la validez de las relaciones (2.14). Los esfuerzos cortantes, sin embargo, tenderán a transformar un elemento cúbico de un material en un paralelepípedo oblicuo.

Considérese primero un elemento cúbico de lado unitario sometido sólo a los esfuerzos cortantes  $\tau_{xy}$  y  $\tau_{yx}$  aplicados a las caras respectivamente perpendiculares a los ejes "x" y "y". Se observa que dos de las caras del elemento se transforman en un romboide. Figura (2.6). De los ángulos formados por las otras cuatro caras, dos se reducen de  $\pi/2$  a  $(\pi/2) - \gamma_{xy}$ , mientras los otros dos se incrementan de  $\pi/2$  a  $(\pi/2) + \gamma_{xy}$ . El pequeño ángulo  $\gamma_{xy}$ , medido en radianes, define la deformación cortante correspondiente a las direcciones "x" y "y".

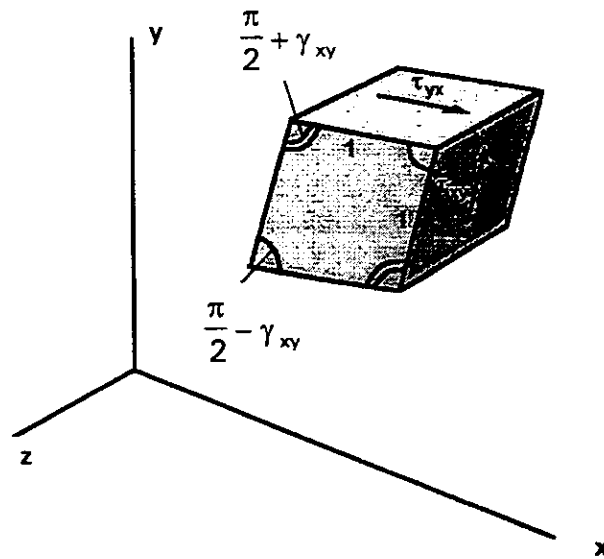


Figura 2.6. Elemento sometido a esfuerzos cortantes.

Graficando valores sucesivos de  $\tau_{xy}$  contra los valores correspondientes de  $\gamma_{xy}$ , se obtiene el diagrama esfuerzo-deformación cortante para el material considerado. Esto se puede lograr por medio de un ensayo de torsión. El diagrama obtenido es similar al diagrama esfuerzo-deformación normal obtenido para el mismo material con la prueba de tracción. Sin embargo, los valores para fluencia y resistencia última de un material dado son solamente alrededor de la mitad, a cortante, de lo que son a tracción. Para valores del esfuerzo cortante que no excedan el límite proporcional en cortante, se puede escribir para cualquier material homogéneo isotrópico:

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (2.15)$$

esta relación se conoce como la ley de Hooke para esfuerzo cortante y deformación. La constante "G" es el módulo de rigidez o módulo de corte del material.

Considerando un pequeño elemento de material sujeto a esfuerzo cortante  $\tau_{yz}$  y  $\tau_{zy}$ , y otro sujeto a esfuerzo cortante  $\tau_{zx}$  y  $\tau_{xz}$ , para valores del esfuerzo que no excedan el límite de proporcionalidad, se pueden escribir:

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz} \quad \tau_{zx} = G\gamma_{zx} \quad (2.16)$$

Aplicando el principio de superposición y combinando las Ecs. (2.16), (2.15) y (2.14), se obtiene el siguiente grupo de ecuaciones que representa la ley generalizada de Hooke, para un material homogéneo e isotrópico en la condición de esfuerzo más general:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= +\frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E}; & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_z}{E}; & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E}; & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}\end{aligned}\quad (2.17)$$

En la realidad los materiales no son homogéneos e isotrópicos por lo que se define la ley general de Hooke, para cualquier estado de esfuerzos:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.18)$$

donde "C<sub>ijkl</sub>" es el tensor de constantes elásticas, "σ<sub>ij</sub>" es el tensor de esfuerzos y "ε<sub>kl</sub>" es el tensor de deformaciones.

## 2.2 Criterios de cedencia

El esfuerzo al cual se observa que empieza la deformación plástica o cedencia depende de la sensibilidad de las mediciones de deformación. Como en la mayor parte de los materiales se presenta una transición gradual del comportamiento elástico al plástico, es difícil determinar con

precisión el punto en el cual comienza la deformación plástica. Para calcular la iniciación de la cedencia son utilizados varios criterios.

### 2.2.1 Criterio de la máxima energía de distorsión

Este criterio se basa en el cálculo de la energía requerida para la distorsión en un material dado (la energía asociada con cambios en la forma del material). De acuerdo con este criterio, también conocido como el criterio de von Mises, un componente dado es seguro siempre que el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen, en ese material, permanezca más pequeño que la energía de distorsión por unidad de volumen requerida para hacer fluir una probeta del mismo material, sometida a tracción.

Von Mises propuso que la cedencia ocurriría cuando el segundo invariante del desviador de esfuerzos ( $J_2$ ) excediera un valor crítico:

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = k^2 \quad (2.19)$$

Para evaluar la constante "k" y relacionarla con el esfuerzo de cedencia del ensayo de tracción, nos damos cuenta que en la cedencia de

un material sometido a una carga uniaxial de tracción  $\sigma_1 = \sigma_0$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , donde  $\sigma_0$  es el esfuerzo de cedencia.

$$\begin{aligned}\sigma_0^2 + \sigma_0^2 &= 6k^2 \\ \sigma_0 &= \sqrt{3}k\end{aligned}\quad (2.20)$$

Sustituyendo la Ec. (2.20) en Ec. (2.19) obtenemos el criterio de cedencia de von Mises:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

Generalizando:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

Para una condición biaxial de esfuerzos ( $\sigma_2 = 0$ ), el criterio de fluencia de von Mises se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3 = \sigma_0^2 \quad (2.23)$$

esta ecuación representa gráficamente una elipse cuyo semieje mayor es  $\sqrt{2}\sigma_0$  y su semieje menor es  $\sqrt{2/3}\sigma_0$ . Figura 2.7. Cualquier estado de esfuerzos se representará en esta figura por un punto de coordenadas  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ . Si el punto cae dentro de la elipse, se interpretará que el estado de esfuerzos está por debajo del punto de fluencia; si el punto cae fuera de la elipse, entonces el estado de esfuerzos provocará deformación plástica.



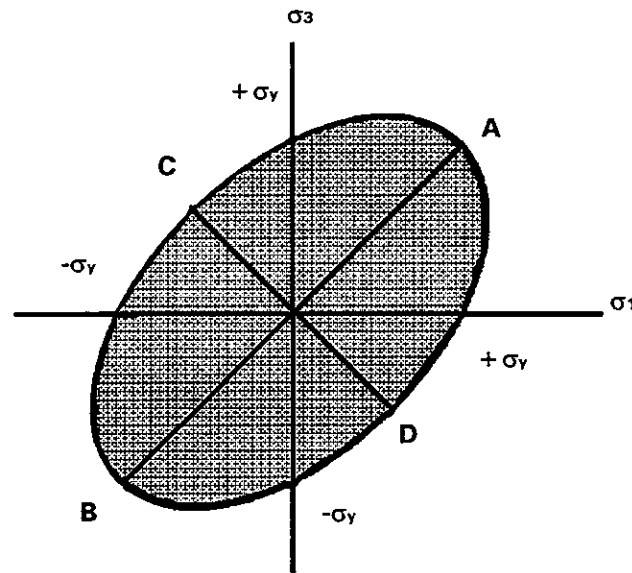


Figura 2.7. Representación gráfica del criterio de la máxima energía de distorsión. Elipse de von Mises.

### 2.2.2 Criterio del esfuerzo cortante máximo

Este criterio se basa en la observación del instante en que se inicia la fluencia de materiales dúctiles como causa del deslizamiento plástico del material, a lo largo de superficies oblicuas, debido a esfuerzos cortantes. De acuerdo con este criterio, un componente estará seguro siempre que el valor máximo ( $\tau_{\text{máx}}$ ) del esfuerzo cortante permanezca por debajo del valor correspondiente al esfuerzo cortante que en una prueba de tracción de una probeta del mismo material la hace fluir.

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.24)$$

donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales algebraicamente mayor y menor, respectivamente.

Para una carga uniaxial de tracción:  $\sigma_1 = \sigma_0$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  y el esfuerzo cortante de cedencia  $\tau_0$  es igual a  $\sigma_0/2$ . Sustituyendo en la Ec. (2.24):

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2}$$

por lo tanto el criterio del esfuerzo cortante máximo, o de Tresca, está dado por:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (2.25)$$

esta expresión se puede representar gráficamente como un hexágono, figura 2.8, llamado hexágono de Tresca. Cualquier estado de esfuerzos se representará en esta figura por un punto de coordenadas  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ . Si el punto cae dentro del hexágono, se interpretará que el estado de esfuerzos está por debajo del punto de fluencia; si el punto cae fuera del hexágono, entonces el estado de esfuerzos provocará deformación plástica.

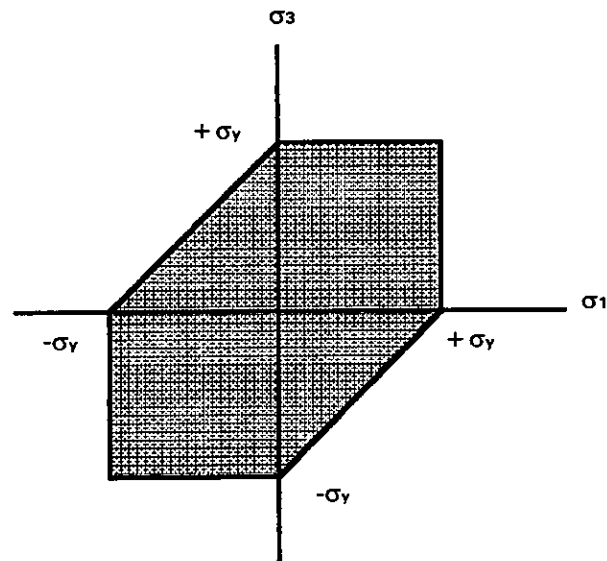


Figura 2.8. Representación gráfica del criterio del esfuerzo cortante máximo. Hexágono de Tresca.

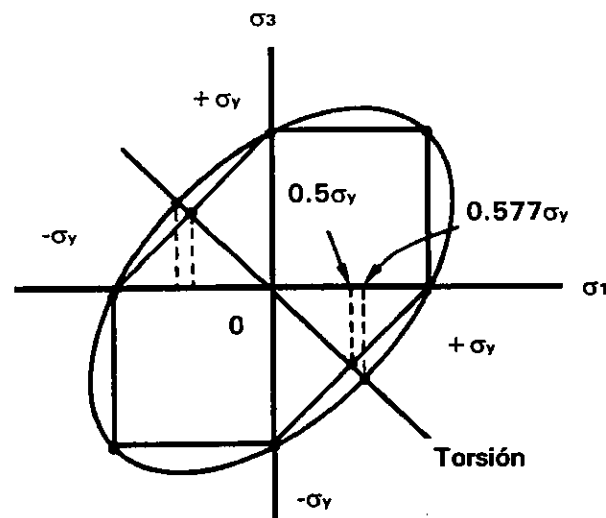


Figura 2.9. Comparación de los criterios de fluencia de von Mises y Tresca.

En la figura 2.9 se comparan el criterio del máximo esfuerzo cortante con el de la energía máxima de distorsión. Nótese que la elipse pasa por

los vértices del hexágono. En consecuencia, para los estados de esfuerzos representados por estos seis puntos, los dos criterios coinciden. Para cualquier otro estado de esfuerzos, el criterio de Tresca es más conservador que el criterio de von Mises, ya que el hexágono está localizado dentro de la elipse.

### **2.3 Parámetros de deformación plástica**

La ductilidad es una propiedad cualitativa de un material. En general, las mediciones de ductilidad son de interés en tres formas:

1. Para indicar el alcance al cual un metal puede ser deformado, sin fracturarse, en operaciones de trabajo de metales como el laminado y la extrusión.
2. Para indicarle al diseñador, de una manera general, la habilidad de un metal para fluir plásticamente antes de la fractura. Una alta ductilidad indica que el material está deformándose localmente sin fracturarse, debido a que el diseñador pudo equivocarse en el cálculo del esfuerzo o la predicción de cargas severas.

3. Para servir como un indicador de cambios en el nivel de impurezas o condiciones de procesamiento. Las mediciones de ductilidad pueden ser especificadas para determinar la "calidad" del material aun cuando no exista una relación directa entre las mediciones de la ductilidad y el rendimiento en servicio.

Las medidas convencionales de ductilidad que son obtenidas de una prueba de tracción son: la deformación ingenieril en la fractura ( $e_f$ ), usualmente llamada elongación, y la reducción de área en la fractura ( $q$ ). Ambas propiedades son parámetros de deformación plástica, y son obtenidos después de la fractura colocando la muestra otra vez junta y tomando medidas de  $L_f$  y  $A_f$ .

$$e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.26)$$

$$q = \frac{A_f - A_0}{A_0} \quad (2.27)$$

Tanto la elongación como la reducción de área usualmente son expresadas como porcentajes.

Otro parámetro de deformación plástica es la tenacidad. La tenacidad de un material es la habilidad para resistir esfuerzos poco frecuentes arriba del esfuerzo de cedencia, sin fracturarse, y es particularmente

deseable en algunos componentes mecánicos. La tenacidad es un concepto comúnmente utilizado; pero es difícil de restringir y definir. Una manera de observar la tenacidad es el considerar que es el área total bajo la curva esfuerzo-deformación. Esta área es una indicación de la cantidad de trabajo, por unidad de volumen, que puede ser realizado en el material sin causarle la fractura.

Varias aproximaciones matemáticas para obtener el área bajo la curva esfuerzo-deformación han sido sugeridas. Para metales dúctiles, el área bajo la curva puede ser aproximada por cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$U_T = s_u e_f \quad (2.28)$$

$$U_T = \frac{s_0 + s_u}{2} e_f \quad (2.29)$$

Para materiales frágiles la curva esfuerzo-deformación es, a veces, supuesta como una parábola, y el área bajo la curva está dada por:

$$U_T = \frac{2}{3} s_u e_f \quad (2.30)$$

Todas estas expresiones dan solamente valores aproximados del área bajo la curva esfuerzo-deformación. Además, la curva no representa el

comportamiento real en el rango plástico, puesto que está basada en el área original de la muestra.

Los criterios de cedencia y los parámetros de deformación plástica son muy utilizados en el cálculo de variables que intervienen en los procesos de conformado. Así como en el diseño mecánico las variables elásticas son las importantes, los parámetros de la deformación plástica son los que intervienen en el análisis de los procesos de manufactura.

## CAPÍTULO 3

### CONFORMABILIDAD

Las propiedades de los metales varían considerablemente de uno a otro y dependen de los elementos aleantes presentes, del tratamiento térmico recibido, y del nivel de trabajo en frío. Al seleccionar un metal para una aplicación particular, se debe analizar la relación entre las propiedades de funcionalidad de la pieza o parte de que se trate y las propiedades de conformabilidad de los materiales disponibles. Para un conformado óptimo, en la mayoría de las aplicaciones, el material de trabajo debe tener las siguientes características: presentar una distribución uniforme de las deformaciones; alcanzar altos niveles de deformación, sin que se produzca adelgazamiento o fractura; soportar esfuerzos compresivos, sin arrugarse; soportar esfuerzos cortantes, sin fracturarse, y conservar la forma después de eliminar los esfuerzos y removerlo del dado.

El éxito en los procesos de conformado implica que las propiedades que determinan la conformabilidad del material de trabajo se encuentren dentro de un rango bien definido. En general, la consistencia en los



valores de tales propiedades es un factor importante para la producción de piezas que requieran una alta precisión dimensional.

A continuación, se tratarán los principales procesos de conformado, que se clasifican como: volumétricos, o de deformación en un plano, en función de las direcciones en las que se realiza la deformación plástica.

### **3.1 Procesos de conformado volumétrico**

Los procesos de conformado volumétrico provocan un cambio significativo en las tres dimensiones de la pieza. Las formas iniciales más comunes son barras, tochos cilíndricos, tochos rectangulares y planchas. Los procesos de conformado volumétrico al modificar las formas originales generan, con frecuencia, diversas y muy variadas formas geométricas, y algunas veces mejoran las propiedades mecánicas.

El principio de operación o trabajo de esos procesos de deformación consiste en someter al metal a un esfuerzo suficiente para hacerlo que fluya plásticamente y tome la forma deseada. Los procesos se realizan en operaciones de trabajo en frío, o en caliente. El trabajo en frío es apropiado cuando el cambio de forma es menos severo y hay necesidad

de mejorar las propiedades mecánicas o alcanzar un buen acabado en la parte final. El trabajo en caliente se emplea generalmente cuando implica altos porcentajes de deformación volumétrica en grandes piezas de trabajo.

Los procesos de deformación volumétrica considerados son: laminado, forjado, extrusión, y estirado de alambre y barras. A continuación se explica su funcionamiento.

### 3.1.1 Laminado

El laminado es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos que giran en sentidos opuestos. Los rodillos jalan el material mientras lo comprimen.

El proceso básico ilustrado en la figura 3.1 es el laminado plano, que se usa para reducir el espesor de una sección transversal rectangular al producir láminas y placas. La mayoría de los procesos de este tipo se realizan en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida, y se le llama laminado en caliente. Los metales laminados en caliente están,

por lo general, libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Este tipo de laminado dificulta mantener el producto dentro de tolerancias adecuadas, debido a los cambios de dimensión por las variaciones de temperatura. Por lo tanto, las últimas etapas de laminación se realizan en frío. Así se obtienen mejores propiedades mecánicas y mayor precisión dimensional.

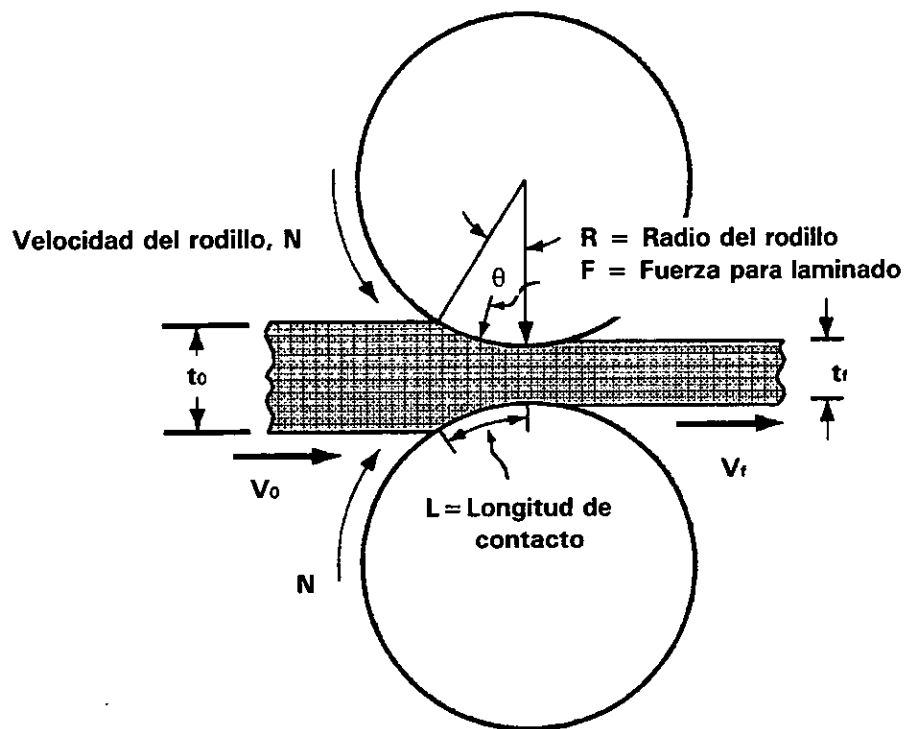


Figura 3.1. Vista lateral de laminado plano.

Para determinar la carga y potencia requeridas en el proceso, se considera la geometría de los rodillos y las fuerzas, obteniendo las siguientes expresiones:

$$F = \sigma_y wL \quad (3.1)$$

$$P = 2\pi NFL \quad (3.2)$$

donde "F" es la fuerza de laminado, " $\sigma_y$ " es el esfuerzo de fluencia promedio, "w" es el ancho de la lámina, "P" es la potencia demandada, "N" la velocidad de rotación de los rodillos y "L" la longitud de contacto.

### 3.1.2 Forjado

El forjado es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos dados usando impacto, o presión gradual, para formar la pieza.

Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría se realizan en caliente, por el grado de deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal. Sin embargo, el forjado en frío también se realiza en muchos productos. La ventaja de éste es la mayor resistencia del componente, como resultado del endurecimiento por deformación.

Otra clasificación de las operaciones de forjado se hace de acuerdo con la forma en que los dados permiten, o restringen, el flujo del metal de trabajo. Resultan tres tipos; forjado en dado abierto, forjado en dado impresor, y forjado sin rebaba. Figura 3.2.

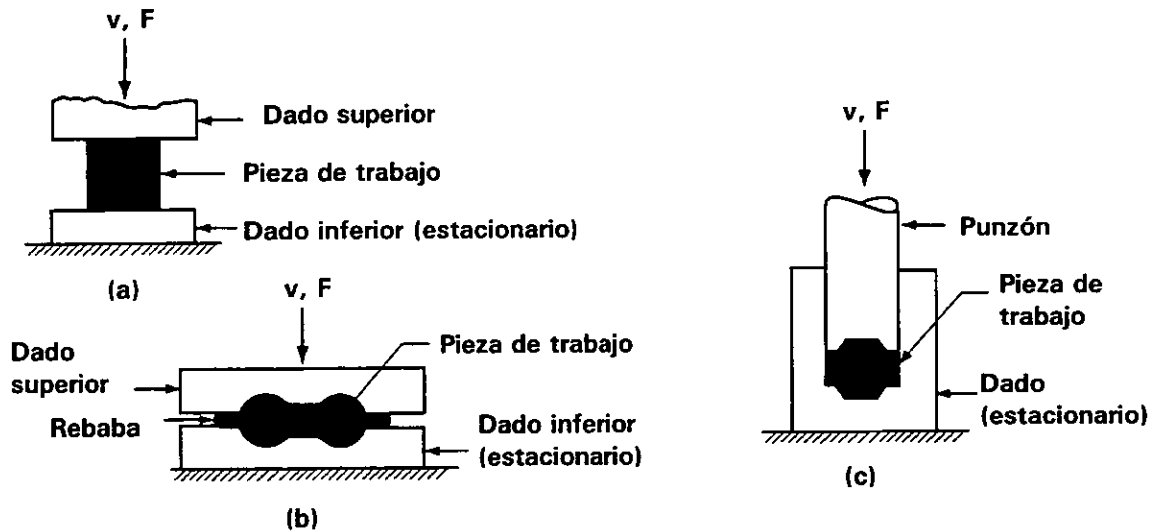


Figura 3.2. Tres tipos de operación de forja ilustrados por diagramas de sección transversal.

En el forjado en dado abierto la pieza se comprime entre dos dados, permitiendo que el material fluya sin restricciones, longitudinalmente, respecto a las superficies de contacto.

En el forjado en dado impresor, o en dado cerrado, las superficies del dado contienen la forma que se imprime al material de trabajo durante la

compresión, restringiendo significativamente el flujo del metal; pero formando una rebaba.

En el forjado sin rebaba, el dado restringe completamente al material de trabajo dentro de la cavidad. No se produce rebaba excedente. Por esto, es necesario controlar estrictamente el volumen de la pieza inicial para que sea igual al volumen de la cavidad del dado.

Para determinar la fuerza que se necesita para forjar una pieza se relacionan su geometría y las características del material, obteniendo la siguiente expresión:

$$F = K_f \sigma_v A \quad (3.3)$$

donde "F" es la fuerza requerida para forjar la pieza, " $\sigma_v$ " es el esfuerzo de fluencia del material, "A" es el área transversal de la pieza (en el caso de forja en dado cerrado incluye el área de la rebaba) y "K<sub>f</sub>" es el factor de forma del forjado, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h} \quad (3.4)$$

siendo " $\mu$ " el coeficiente de fricción, "D" el diámetro de la pieza de trabajo, o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie, y "h" la altura de la pieza.

### 3.1.3 Extrusión

La extrusión es un proceso de conformado por compresión en el que el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un dado, para darle forma a su sección transversal. Se puede extruir una gran variedad de formas, especialmente con la extrusión en caliente. Sin embargo, una limitación en la geometría es que la sección transversal no puede cambiar a lo largo de toda la pieza. La estructura del grano y las propiedades de resistencia se mejoran tanto en la extrusión en frío como en caliente. Cuando se usa extrusión en frío son posibles tolerancias más estrictas.

Las operaciones de extrusión, atendiendo a su configuración física, se clasifican en directa e indirecta.

En la extrusión directa, un tocho de metal se carga en un recipiente y un pistón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas practicadas en un dado colocado en el extremo opuesto del recipiente contenedor. Un problema presente en este tipo de extrusión es la gran fricción que se genera entre la superficie del material de trabajo y la pared del recipiente, al forzar el deslizamiento del tocho hacia la

abertura del dado. Vencer esa fricción obliga a incrementar sustancial -y comparativamente- la fuerza aplicada en el pistón para la extrusión directa. Figura 3.3a.

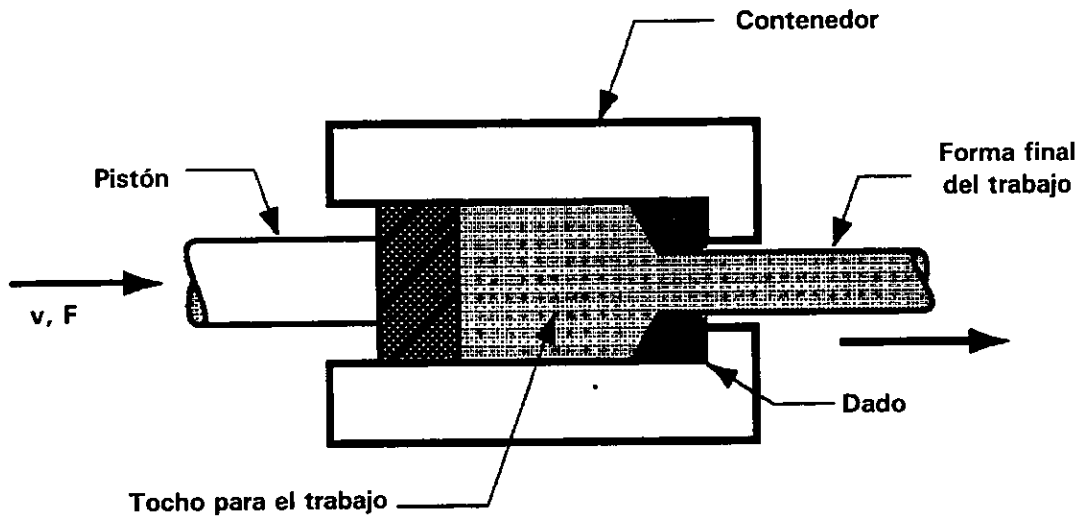


Figura 3.3a. Extrusión directa.

En cambio, en la extrusión indirecta el dado está montado sobre el pistón. Al penetrar el dado en el material de trabajo lo fuerza a fluir a través del hueco, en dirección opuesta a la del movimiento del pistón. Como el tocho no se desliza contra las paredes del recipiente, no hay fricción adicional que vencer. Por consiguiente, la fuerza que se debe aplicar al pistón es menor, en comparación, que cuando la extrusión es directa. Figura 3.3b.



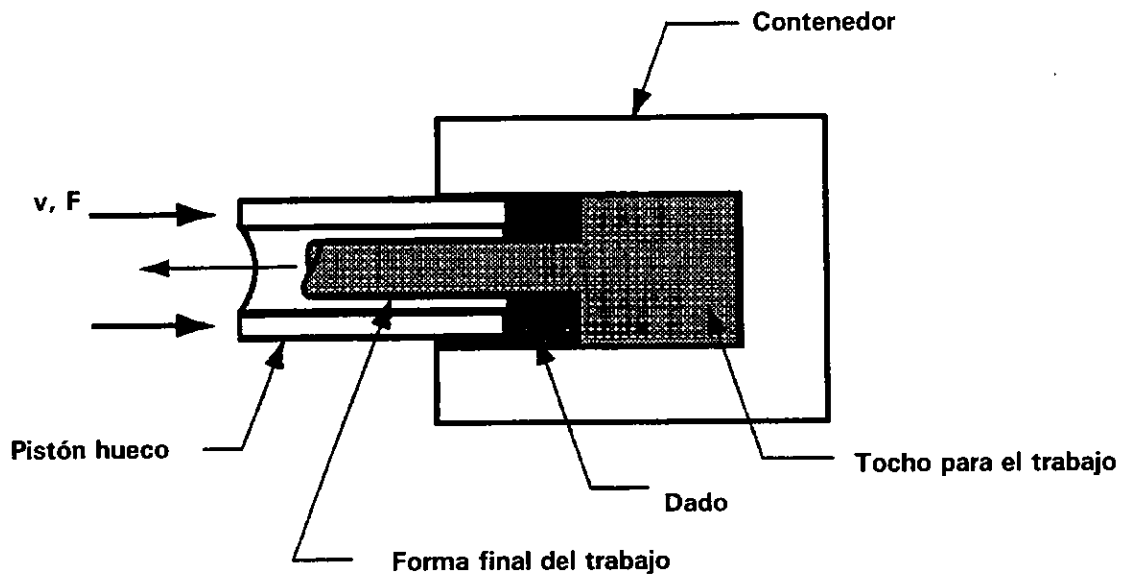


Figura 3.3b. Extrusión indirecta.

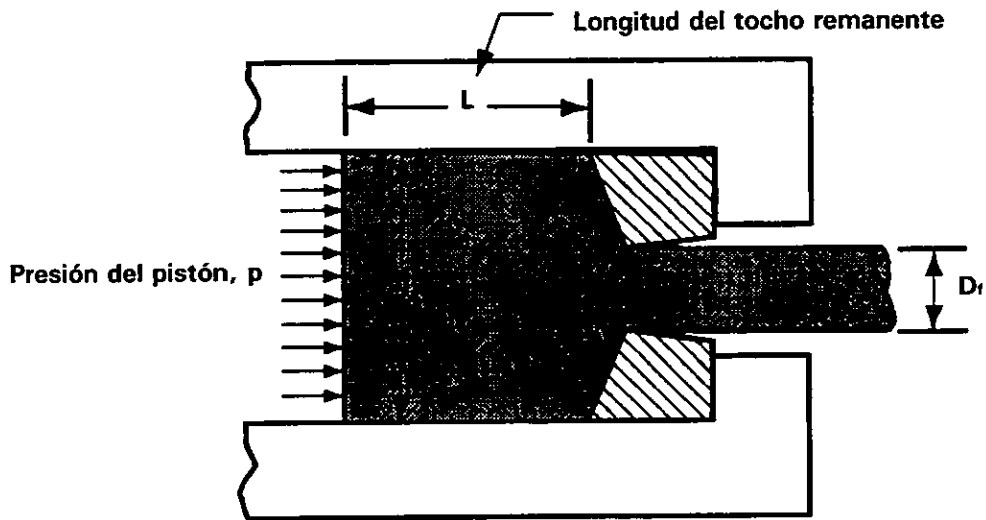


Figura 3.4. Presión y otras variables en la extrusión directa.

Para evaluar la presión de extrusión relacionaremos los parámetros que se muestran en la figura 3.4, obteniendo la siguiente expresión:

$$p = \sigma_y \left( \varepsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right) \quad (3.5)$$

donde "p" es la presión de extrusión, " $\sigma_y$ " es el esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, " $\varepsilon_x$ " es la deformación de extrusión y el término  $2L/D_0$  representa la presión adicional debida a la fricción generada entre el contenedor y el tocho (que en la extrusión indirecta es cero).

La deformación de extrusión se define como:

$$\varepsilon_x = a + b \ln r_x \quad (3.6)$$

donde "a" y "b" son constantes empíricas para el ángulo del dado (los valores típicos son  $a=0.8$  y  $b=1.2$  a  $1.5$ ) y " $r_x$ " es la relación de extrusión, definida como  $r_x = A_0/A_f$  (" $A_0$ " es el área de la sección transversal del tocho inicial y " $A_f$ " es el área de la sección transversal de la parte extruida).

La fuerza del pistón en la extrusión -directa, o indirecta- es simplemente la presión (p) de la Ec. (3.5) multiplicada por el área inicial del tocho ( $A_0$ ).

### 3.1.4 Estirado de alambre y barras

El estirado es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de la abertura de un dado, como se muestra en la figura 3.5. Las características generales del proceso son similares a la extrusión. La diferencia es que en el estirado el material de trabajo se jala a través del dado, mientras que en la extrusión se empuja a través de él. Aunque la presencia de esfuerzos de tracción es obvia en el estirado, la compresión también juega un papel importante ya que el material se comprime al pasar a través de la abertura del dado.

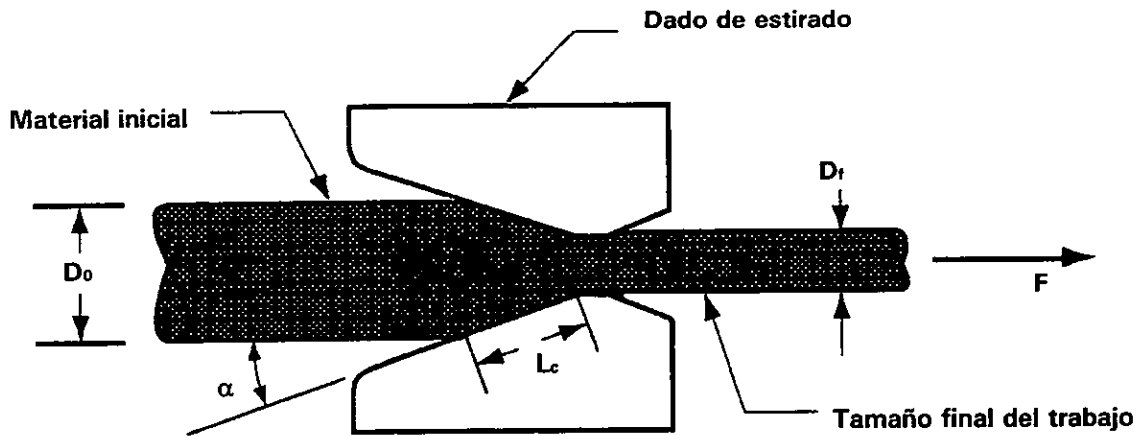


Figura 3.5. Estirado de barra, varilla o alambre.

La fuerza correspondiente de estirado equivale al área final de la sección transversal del material multiplicada por el esfuerzo de estirado:

$$F = A_f \sigma_e = A_f \sigma_v \left( 1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (3.7)$$

donde "A<sub>o</sub>" y "A<sub>f</sub>" son las áreas inicial y final de la sección transversal del material de trabajo, "σ<sub>v</sub>" es el esfuerzo de fluencia promedio, "μ" es el coeficiente de fricción entre el dado y el material, "α" es el ángulo del dado, y "φ" es un factor que se utiliza para deformación no homogénea.

### 3.2 Procesos de conformado plano

Se les da el nombre de procesos de conformado plano a las operaciones de deformación realizadas sobre láminas o placas delgadas de metal, producidas por laminado.

El espesor del material se considera constante y puede ser tan pequeño como algunas milésimas de pulgada; pero la mayor parte de los espesores del metal están entre 0.4 mm (1/64 de pulgada) y 6.4 mm (1/4 de pulgada). Cuando el espesor excede 1/4 de pulgada se le llama placa en lugar de lámina.

La importancia comercial de los procesos de conformado plano es significativa. Existe un gran número de productos industriales y de consumo que incluyen partes de lámina metálica: carrocerías de automóviles y camiones, aeroplanos, carros de ferrocarril, equipo de construcción, etcétera. Las piezas fabricadas con lámina de metal se caracterizan, generalmente, por su alta resistencia, buena precisión dimensional, buen acabado superficial y bajo costo relativo.

Los procesos de conformado plano se pueden clasificar en: doblado, embutido y estirado. Se usan para transformar láminas de metal en partes de forma especial.

### 3.2.1 Doblado

El doblado se define como la deformación del metal alrededor de un eje neutro. Durante la operación de doblado, el material dentro del plano neutral se comprime mientras que el metal por fuera del plano neutral se estira. Figura 3.6. El metal se deforma plásticamente. Así, el doblado toma una forma permanente al remover las fuerzas que lo causaron. El doblado produce poco o ningún cambio en el espesor de la lámina metálica.

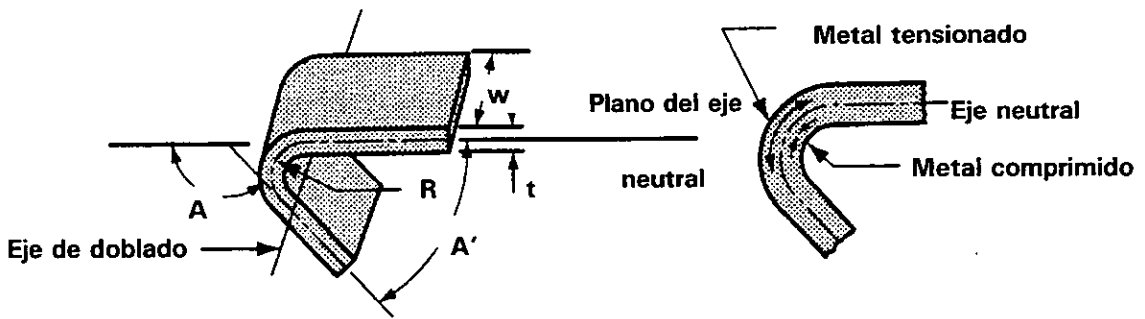


Figura 3.6. Doblado de lámina metálica.

Las operaciones de doblado se realizan usando como herramientas de trabajo diversos tipos de punzones y dados. Los dos métodos de doblado más comunes son el doblado en "V" y el doblado de bordes. Figura 3.7.

En el doblado en "V", la lámina de metal se dobla entre un punzón y un dado con dicha forma.

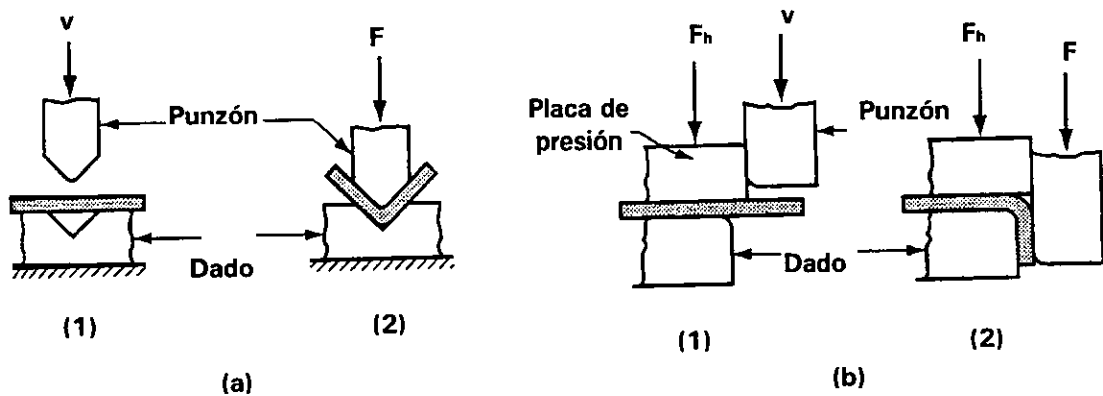


Figura 3.7. Métodos comunes de doblado: a) doblado en "V" y b) doblado de bordes.

En el doblado de bordes se usa un momento flexionante sobre la lámina de metal colocada en cantiliver. Una placa de presión aplica la fuerza de sujeción " $F_h$ " para sostener la base contra el dado, mientras el punzón fuerza a la parte volada para doblarla sobre el borde.

En el doblado, el metal, de espesor " $t$ ", forma el llamado ángulo de doblado " $A$ " (figura 3.6). El resultado es una lámina con un ángulo incluido " $A'$ ", tal que  $A + A' = 180^\circ$ . El radio del doblado ( $R$ ) se especifica, normalmente, sobre la parte interna y lo determina el radio de la herramienta que se usa para ejecutar la operación. El doblado se hace a lo ancho ( $w$ ) de la pieza de trabajo.

Si el radio es pequeño comparado con el espesor del material, el metal tiende a estirarse durante el doblado. Es importante estimar la magnitud del estirado, de manera que la longitud de la parte final coincida con la dimensión especificada. El problema es determinar la longitud del eje neutro antes del doblado y tomar en cuenta el estirado de la sección doblada final, que se llama tolerancia de doblado y se puede estimar como sigue:

$$BA = 2\pi \frac{A}{360} (R + K_{ba} t) \quad (3.8)$$

donde "BA" es la tolerancia de doblado y "K<sub>ba</sub>" es un factor para estimar el estirado.

Cuando la presión de doblado se retira al terminar la operación de deformación, la energía elástica permanece en la parte doblada haciendo que recobre parcialmente su forma original. Esta recuperación elástica se define como el incremento del ángulo comprendido por la parte doblada en relación con el ángulo de la herramienta formadora, después de que ésta se retira:

$$SB = \frac{A' - A_b'}{A_b'} \quad (3.9)$$

donde "SB" es la recuperación elástica y "A<sub>b</sub>'" es el ángulo de la herramienta de doblado.

La fuerza que se requiere para realizar el doblado depende de la geometría del punzón y del dado, así como de la resistencia, espesor y ancho de la lámina de metal que se dobla. La fuerza de doblado, máxima necesaria, se puede estimar por medio de la siguiente ecuación, basada en el doblado de una viga simple:

$$F = \frac{K_{bf} \sigma_{m\acute{a}x} w t^2}{D} \quad (3.10)$$

donde "F" es la fuerza de doblado, " $\sigma_{m\acute{a}x}$ " es la resistencia a la tracción del metal en lámina, "D" es la dimensión del dado abierto y "K<sub>bf</sub>" es una



constante que considera las diferencias encontradas en un proceso real de doblado. Para doblado en "V",  $K_{br} = 1.33$  y para doblado de bordes,  $K_{br} = 0.33$ .

### 3.2.2 Embutido

El embutido se utiliza para hacer piezas con forma de recipiente, de caja y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia dentro con un punzón. Figura 3.8. La forma inicial debe oprimirse contra el dado mediante un sujetador.

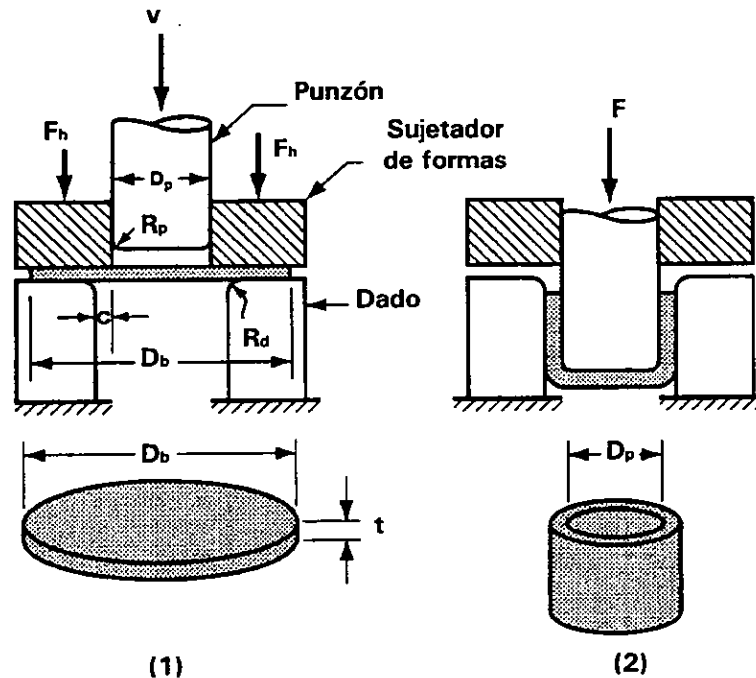


Figura 3.8. Embutido de una parte en forma de recipiente. Se muestra la forma inicial y la parte ya embutida.

En la figura 3.8 se señalan las dimensiones y los parámetros de la operación y la mecánica de ejecución del embutido de un disco de lámina dentro de un dado. El punzón y el dado deben tener redondeados los bordes (radios " $R_p$ " y " $R_d$ "). Las superficies del punzón y el dado están separados por el claro " $c$ ", aproximadamente 10% mayor que el espesor del material por embutir.

El punzón aplica una fuerza ( $F$ ) para deformar el metal y el sujetador de partes la fuerza de sujeción ( $F_h$ ).

Conforme el punzón se mueve hasta su posición final, la pieza de trabajo experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar, gradualmente, la forma definida por el punzón y la cavidad del dado. Cuando el punzón empuja al material lo sujeta a una operación de doblado. El perímetro exterior del disco se mueve ligeramente hacia el centro en esta primera etapa.

A medida que el punzón avanza, ocurre una acción de enderezado del metal previamente doblado sobre el radio del dado. Es decir: el metal del fondo y el curvado contra el borde del punzón se han movido hacia abajo, junto con el punzón; pero el material que se había doblado sobre el

borde del dado debe enderezarse para que pueda ser jalado dentro del claro y forme la pared del cilindro. Durante esta etapa del proceso, la fricción y la compresión juegan papeles importantes en la zona de sujeción de la parte. Para que el material en esta zona se mueva hacia el interior del dado, debe superar la fricción que se genera entre la lámina de metal y las superficies del sujetador y del dado.

La fuerza requerida para realizar una operación de embutido se puede estimar con la siguiente expresión:

$$F = \pi D_p t \sigma_{\text{máx}} \left( \frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad (3.11)$$

donde "F" es la fuerza (máxima) de embutido, "t" el espesor original de la lámina, " $\sigma_{\text{máx}}$ " la resistencia a la tracción y la constante 0.7 es un factor de corrección por fricción.

La fuerza de sujeción se puede calcular con la siguiente expresión:

$$F_h = 0.15 \sigma_y \pi \left[ D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right] \quad (3.12)$$

donde " $F_h$ " es la fuerza de sujeción, " $\sigma_y$ " es el esfuerzo de fluencia de la lámina, "t" es el espesor inicial del material y " $R_d$ " es el radio del borde del dado.

### 3.2.3 Estirado de lámina

El estirado es un proceso de deformación en el cual la lámina metálica se dobla simultáneamente para lograr un cambio de forma. Figura 3.9. El material se sujeta mediante una o más mordazas, en cada extremo, y se estira y dobla sobre un dado positivo que tiene la forma deseada. El metal es sometido a esfuerzos de tracción superiores a su punto de fluencia.

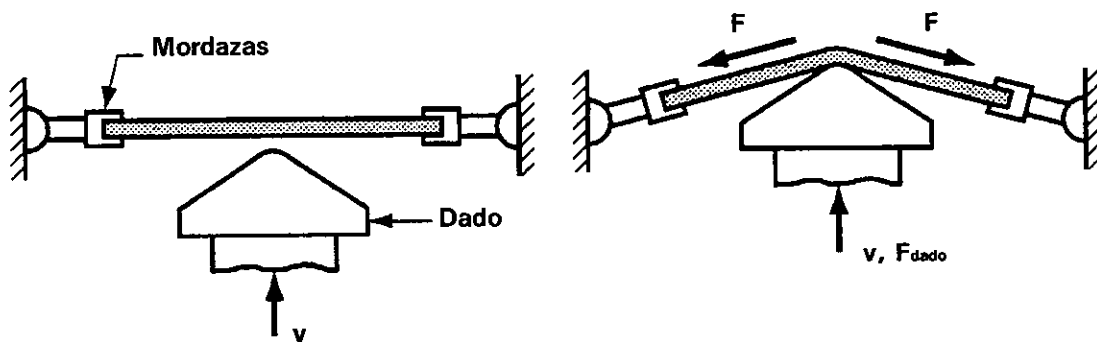


Figura 3.9. Estirado de lámina.

Una estimación de la fuerza requerida en este tipo de conformado se puede obtener multiplicando el área de la sección de lámina, perpendicular a la dirección de la tensión, por el esfuerzo de fluencia del metal:

$$F = Lt\sigma_y \quad (3.13)$$

donde "F" es la fuerza necesaria; "L" la longitud de la lámina, en dirección perpendicular al estiramiento; "t" el espesor del material, y " $\sigma_y$ " su esfuerzo de fluencia.

### **3.3 Ensayos de conformabilidad de productos planos**

Para saber si un material es capaz de adquirir la geometría deseada, mediante alguno de los procesos descritos anteriormente, debe ser evaluado por medio de ensayos de conformabilidad.

Hay dos tipos de ensayos de conformabilidad: los intrínsecos y los de simulación. Los intrínsecos miden propiedades características de los materiales, que pueden ser relacionadas con su conformabilidad; entre éstos se encuentran el de tracción uniaxial y el de dureza. Los ensayos de simulación someten al material a una deformación muy parecida a la que ocurre en una operación particular de conformado; son los de doblado, estirado y embutido.

#### **3.3.1 Ensayo de tracción uniaxial**

El ensayo de tracción uniaxial es el más usado de los ensayos intrínsecos de conformabilidad para lámina. La probeta se sujeta por sus

extremos y se estira, a velocidad constante, hasta su fractura, con una máquina de tracción, como se describe en la norma ASTM E8. La carga aplicada y la elongación son medidas por medio de una celda de carga y un extensómetro. Estos datos, usualmente, se convierten en esfuerzo y deformación ingenieril, o en esfuerzo y deformación real.

La tracción uniaxial permite determinar el factor de anisotropía ( $r$ ), y la sensibilidad a la rapidez de deformación ( $m$ ).

El factor de anisotropía se define como el cociente entre la deformación real del ancho y la deformación real del espesor, en un ensayo de tracción. El factor varía con la elongación a la cual se mide (usualmente se mide al 10, 15, o 20% de ésta). El valor " $r$ " se calcula de la siguiente forma:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (3.14)$$

donde " $w$ " y " $w_0$ " son el ancho final y el inicial, y " $t$ " y " $t_0$ " son el espesor final y el inicial, respectivamente, de la probeta. La dirección del laminado suele afectar los valores de " $r$ ", según la dirección en que se tome la probeta (generalmente los materiales no son isotrópicos). Por

esto, se ensayan probetas tomadas en la misma dirección de laminado, a 45 grados y en dirección perpendicular. Así, se definen la anisotropía normal ( $r_m$ ) y la anisotropía plana ( $\Delta r$ ) :

$$r_m = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (3.15)$$

$$\Delta r = \frac{(r_0 - 2r_{45} + r_{90})}{2} \quad (3.16)$$

La sensibilidad a la rapidez de deformación se puede determinar haciendo varios ensayos de tracción a diferentes velocidades o en un solo ensayo en el que la deformación se alterne entre dos valores. La sensibilidad ( $m$ ) puede ser calculada para varios niveles de deformación porcentual en la región de elongación uniforme:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)}{\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2}\right)} \quad (3.17)$$

es decir, "m" resulta de medir los cambios en el esfuerzo de flujo debido a las variaciones de la velocidad de deformación.

### 3.3.2 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza consiste en medir la resistencia que opone un material a la penetración de un indentador. Ha sido muy utilizado para la

medición de la conformabilidad. Generalmente, ésta decrece con el incremento de la dureza; aunque no se han podido correlacionar estas propiedades.

El ensayo de dureza se utiliza frecuentemente en el control de calidad para asegurar que el material tenga la resistencia requerida. El más utilizado es el Rockwell, que describe con detalle la norma ASTM E18.

### 3.3.3 Ensayos de doblado

Relacionados con la conformabilidad de láminas existen dos tipos: el de doblado simple y el de doblado con estiramiento.

El ensayo de doblado simple es muy útil para predecir cómo se comportará la lámina cuando se trata de un doblado sin tracción. Se puede realizar de varias maneras como se describe en la norma ASTM E290. La más común se muestra en la figura 3.10(a). La probeta se dobla manualmente o por medio de un mazo no metálico, hasta un ángulo de  $180^\circ$ . Si no se fractura, la prueba se repite utilizando un dado de radio



menor. Los ensayos pueden realizarse tomando probetas en diferentes direcciones con respecto a la de laminación.

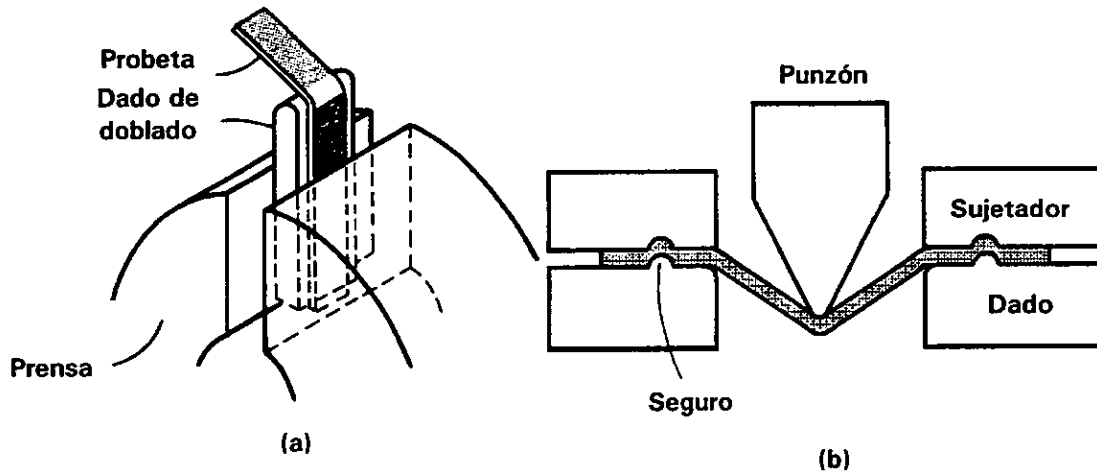


Figura 3.10. Herramiental para ensayos de doblado.

El ensayo de doblado con estiramiento consiste en sujetar, por sus extremos, una probeta rectangular y deformarla con un punzón centrado. Figura 3.10(b). Se pueden utilizar dos tipos de punzones: el semiesférico y el angular. El primero involucra un rango de estados de deformación, mientras que el segundo sólo produce un estado plano. En este ensayo se mide la distancia que se desplaza el punzón desde el primer contacto con la probeta hasta que ésta se fractura en la región de contacto con el punzón.

### 3.3.4 Ensayos de estirado

Implican estirar una probeta, formando una copa hasta que en ésta comienza a presentarse un adelgazamiento o cuello. Existen dos ensayos muy utilizados, el Olsen y el Erichsen, en los que la probeta es estirada por medio de un punzón de bola. En ambos, la profundidad de la copa, correspondiente a la carga máxima soportada, se toma como medida de conformabilidad. Los ensayos Olsen y Erichsen son muy similares; sólo varían las dimensiones del herramental. Figura 3.11. Estos ensayos son descritos por la norma ASTM E643.

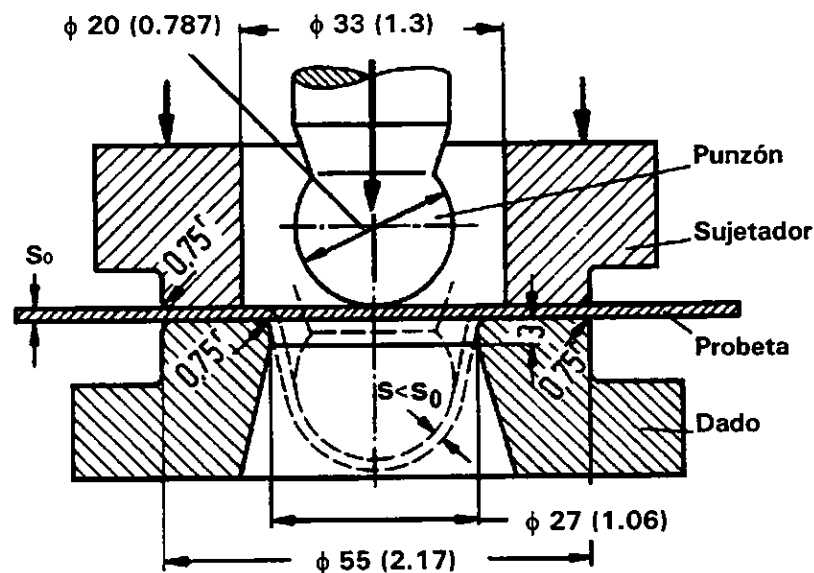


Figura 3.11. Herramental para ensayo Olsen y Erichsen. El diámetro del punzón Olsen es de 22.22mm. (Dimensiones en milímetros y, entre paréntesis, en pulgadas.)

Los ensayos Olsen y Erichsen como indicadores de la capacidad de estirado se deberían poder correlacionar satisfactoriamente con el valor "n"; pero no es así. Esta deficiencia se atribuye al pequeño tamaño del punzón y a las posibles variaciones en la lubricación. Para no agudizarla, las condiciones de prueba deben ser controladas cuidadosamente.

En el ensayo con punzón semiesférico, figura 3.12, se obtienen resultados más reproducibles que con los ensayos de punzón de bola, así como mejores correlaciones entre la profundidad de la copa y el valor "n".

Para aceros de bajo contenido de carbono, la conformabilidad aumenta linealmente con el valor "n".

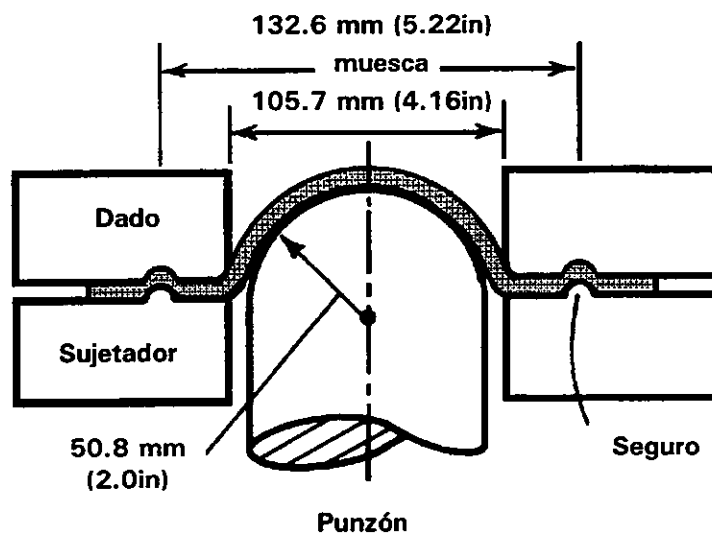


Figura 3.12. Herramiental para ensayo de estirado con punzón semiesférico.

### 3.3.5 Ensayos de embutido

El ensayo más común para embutido profundo es el Swift. Figura 3.13. Se prueban piezas circulares, de diferentes diámetros, embutiéndolas, en forma de copa, por medio de un punzón cilíndrico, hasta encontrar el máximo diámetro embutible.

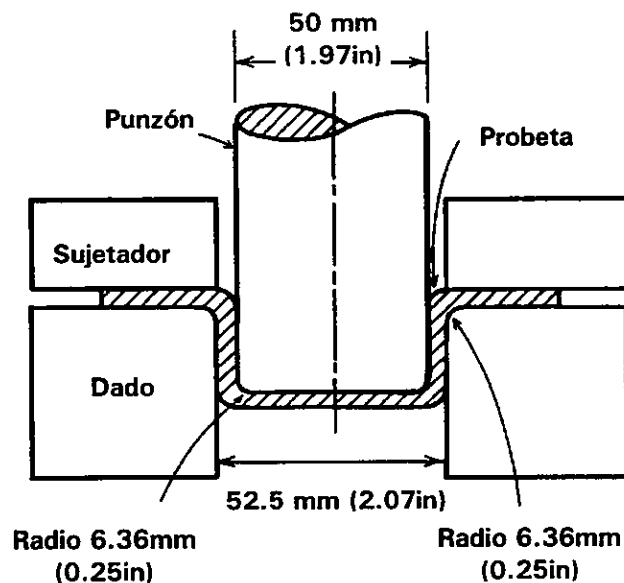


Figura 3.13. Herramental para ensayo Swift.

La capacidad de embutido se expresa como la relación de embutido límite (LDR) o por el porcentaje de reducción:

$$\text{LDR} = \frac{D}{d} \quad (3.18)$$

$$\text{red}(\%) = \frac{100(D - d)}{D} \quad (3.19)$$

donde "D" es el diámetro (máximo embutible) de la pieza inicial y "d" es el diámetro del punzón.

Otro ensayo de embutibilidad, en el que también interviene estiramiento, es el Fukui (Ref. 7.6). En éste, probetas circulares son deformadas, en forma de copas cónicas, por medio del herramental que se ilustra en la figura 3.14. Se mide el diámetro de la base de la copa cónica y se divide entre el diámetro original de la probeta para obtener el valor Fukui. El punto final del ensayo no es crítico, porque el diámetro del cono no cambia después de la fractura.

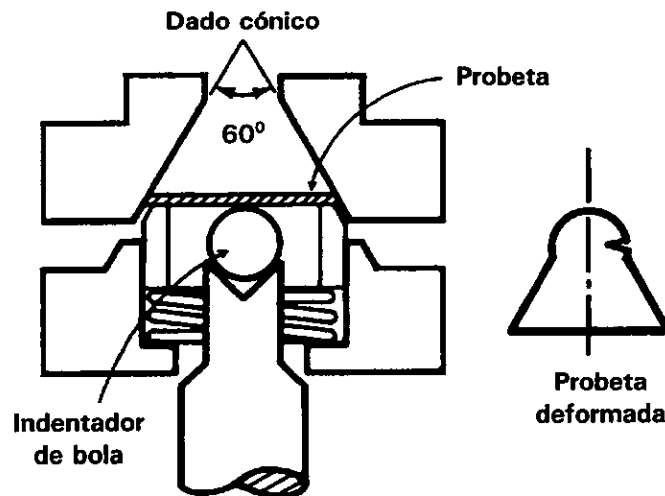


Figura 3.14. Herramental para ensayo Fukui.

Se han encontrado buenas correlaciones entre el valor Fukui y el producto del valor promedio de "n" y "r", para aceros de bajo contenido de carbono.

Existen otros ensayos de conformabilidad; pero los más importantes son los antes mencionados.

Al no ser posible simular toda la complejidad de los procesos industriales, se pueden complementar los resultados de los ensayos descritos obteniendo el diagrama de conformabilidad límite. Esto se abordará en el siguiente capítulo.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROBLEMAS DEL CONFORMADO DE LÁMINA Y DIAGRAMA LÍMITE**

Una materia prima muy utilizada en la industria es la lámina, ya que al conformarla permite obtener una gran variedad de formas: ofrece muchas posibilidades para dar cuerpo y estructura a distintas aplicaciones. Por ejemplo, se emplea en carrocerías de automóviles, equipos electrodomésticos, muebles metálicos, diversos tipos de envases.

El proceso de conformado puede ser tan simple como una operación de doblado, o requerir varias operaciones complejas: combinaciones o secuencias de las básicas (doblado, estirado, embutido). Esto es lo que frecuentemente sucede al fabricar una parte, y complica el análisis y modelado del proceso.

#### **4.1 Problemas del conformado de lámina**

Los problemas más comunes en el conformado de lámina son la formación de fracturas, ondulaciones y pliegues; la distorsión de la forma, la pérdida de metal y la formación de texturas superficiales indeseables.

### 4.1.1 Fracturas

La fractura ocurre cuando la lámina de trabajo se somete a fuerzas de estirado o cortantes que exceden el límite de falla del material para un cierto historial, estado, velocidad y temperatura de deformación.

Al estirarse una lámina, inicialmente ocurre un adelgazamiento uniforme. Eventualmente, se llega a un punto en donde la deformación se concentra y causa un adelgazamiento localizado, conocido como cuello, donde finalmente se fractura. La formación del cuello generalmente se considera como falla, ya que produce un defecto visible y un debilitamiento estructural.

En cambio, al someter una lámina a fuerzas cortantes la fractura puede darse sin un adelgazamiento previo. En este tipo de operaciones se aplican a la lámina fuerzas normales a su plano. En el estampado, las fallas por cortante se producen por fuerzas aplicadas en el plano de la lámina; pero no son tan comunes como las fallas por estirado.



#### 4.1.2 Ondulaciones y pliegues

En una operación típica de estampado, el punzón estira la lámina de trabajo y la empieza a desplazar bajo el sujetador. Los bordes de la lámina son jalados hacia regiones de perímetros progresivamente menores. Esto produce esfuerzos de compresión perpendiculares a la dirección del estiramiento. Si estos esfuerzos superan niveles críticos, según el material y su espesor, causarán pequeñas ondulaciones que pueden generar pliegues pronunciados si la presión del sujetador no es suficiente.

#### 4.1.3 Distorsión de la forma

En las operaciones de conformado las fuerzas externas que se aplican a la lámina la deforman elástica y plásticamente. Al removerlas, los esfuerzos elásticos tienden a cero. En algunas zonas, éstos se pueden relajar completamente, provocando un pequeño cambio en las dimensiones de la parte. Sin embargo, en áreas sujetas a doblado se dan gradientes de esfuerzo elástico a lo largo del espesor: los esfuerzos de la superficie externa son diferentes a los esfuerzos en la superficie interna de la lámina.

Si los esfuerzos residuales resultantes no son bien soportados por la geometría de la parte, al darse la recuperación elástica se puede distorsionar la forma. La recuperación elástica debe ser compensada tomando en cuenta las propiedades del material al diseñar el dado; pero el problema puede persistir si tales propiedades varían más allá de las tolerancias de diseño.

#### **4.1.4 Pérdida de metal**

La pérdida de metal ocurre en regiones sin deformar y es indeseable. En el estampado, en zonas donde el dobléz es muy pronunciado el metal tiende a fluir dentro de la cavidad y provocar, en el material remanente, la pérdida de metal. Este problema se puede minimizar aumentando la presión del sujetador.

#### **4.1.5 Texturas superficiales indeseables**

La deformación severa de lámina metálica, particularmente si es de grano grueso, frecuentemente produce una textura superficial rugosa conocida como "cáscara de naranja". Esto, generalmente, es inaceptable en partes que serán visibles.

Otro problema de textura superficial se da en metales que tienen un pronunciado punto de fluencia; es decir, que se estiran un alto porcentaje sin incremento de la carga. En estos metales la deformación, a bajos niveles, se concentra en estrías irregulares conocidas como líneas o bandas de Lüders. Estos defectos desaparecen al aplicar mayores niveles de deformación.

#### **4.2 Método y técnicas del diagrama de conformabilidad límite**

Para el diseño y fabricación de partes estampadas se requiere fabricar los dados y especificar las propiedades del material. Comúnmente, el fabricante del dado se basa en sus experiencias y conocimientos para definir el diseño inicial y las especificaciones. Posteriormente se construye un prototipo que es modificado por ensayo y error. Este proceso resulta caro y tardado.

Debido a que en la industria se debe de cumplir con los tiempos preestablecidos para cada proyecto, se han buscado nuevas técnicas que permitan disminuir los tiempos y costos del desarrollo de los nuevos procesos y, además, predecir si el estampado se podrá realizar satisfactoriamente.

Un intento de solución a ese problema fue dividir un proceso complejo de estampado en varios subprocesos y estudiarlos independientemente para comprender mejor su conjunción y la superposición de sus efectos.

Una aproximación empírica para resolver los problemas de conformabilidad ha sido correlacionar la eficiencia del prensado con las propiedades del material. Las propiedades que comúnmente se evalúan para este propósito son el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tracción y la dureza Rockwell. Obviamente, la influencia de cada propiedad y, por ende, su correlación con la eficiencia, varían de un proceso de estampado a otro. Para obtener esta correlación se necesita recabar datos del proceso de estampado durante un largo periodo; pero, generalmente, su utilidad para la fabricación del dado es poca.

Problemas similares subsisten al correlacionar la eficiencia con los resultados de ensayos de simulación (Erichsen, Olsen, Fukui, Swift, etcétera) que son esencialmente de estirado o de embutido y, así, no reproducen el proceso más complejo propio de un estampado particular.

Se ha encontrado una buena correlación de la eficiencia del prensado con la anisotropía plástica ( $r$ ) para operaciones de embutido, y con el coeficiente de endurecimiento por deformación ( $n$ ) para operaciones de estirado. Ya que el estampado combina operaciones de embutido y estirado, tiene una alta correlación con " $n$ " y " $r$ ". Pero, la eficiencia del prensado es muy sensible a factores ajenos a las propiedades del material, como son: lubricación, espesor y alineación de los dados, entre otros.

Otro intento para establecer un método rápido para determinar las especificaciones del material, realizando pocas pruebas, ha sido grabar cuadrados de una pulgada de lado en el material de trabajo, estamparlo y usando la deformación máxima, medida en los cuadrados, definir los requerimientos de la lámina.

La técnica se modificó. Se utilizan, ahora, mallados circulares, con círculos de 2.5 a 5.0 mm de diámetro, para obtener más información en menos tiempo y poder analizar con mayor precisión la distribución de la deformación.

Tales mallados son patrones circulares (conformados por círculos, o por círculos y cuadrículas) semejando mallas o parrillas. Grabados en la

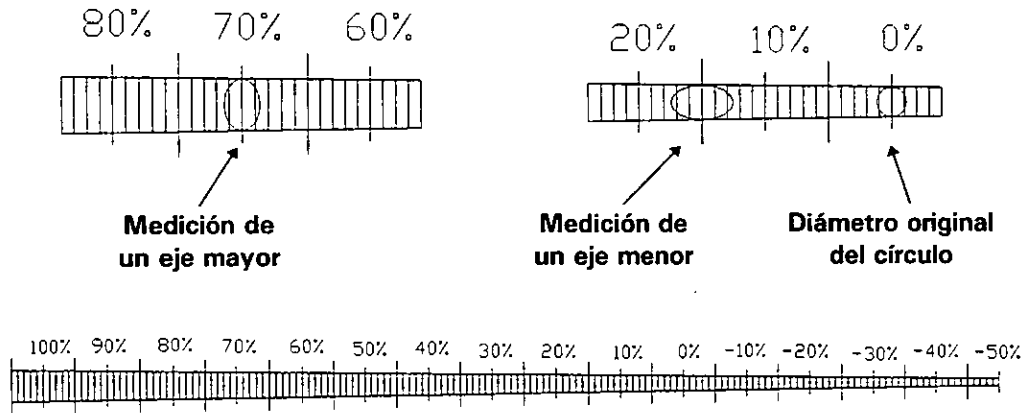
lámina metálica, se puede visualizar la deformación causada en la probeta por un ensayo determinado, y simplificar la resolución de problemas de conformado.

#### 4.2.1 Técnica del mallado circular

Se basa en analizar un mallado circular grabado en el material de trabajo. El patrón se compone de pequeños círculos cuyos diámetros varían desde 6.4 mm hasta 1.3 mm. El diámetro del círculo se selecciona dependiendo del gradiente de deformación. Para áreas planas es suficiente utilizar círculos de 6.4 mm de diámetro; para áreas dobladas con radios pequeños y curvaturas pronunciadas círculos de 2.5 mm, y para áreas con radios muy pequeños y curvaturas muy pronunciadas círculos de 1.3 mm, con objeto de poder medir satisfactoriamente los valores máximos de deformación.

La ventaja del mallado circular es que no tiene una orientación preferencial. La dirección de la deformación máxima o principal se puede observar claramente en la elipse que resulta al deformarse el círculo. Las magnitudes de las deformaciones principales se pueden obtener midiendo los ejes mayor y menor de la elipse. Para hacerlo, se utiliza comúnmente

una regla de acetato flexible, como la mostrada en la figura 4.1, diseñada para leer directamente el porcentaje de deformación. La medición puede estar auxiliada por algún dispositivo de amplificación óptica.



**Figura 4.1.** Regla flexible para medición del porcentaje de deformación.

Existen cuatro patrones comunes de mallado circular. Figura 4.2. El patrón "a" se compone de una cuadrícula auxiliar y círculos separados (esto ayuda a la visualización de la dirección y magnitud de la deformación principal). El patrón "b" se forma por la cuadrícula y círculos unidos tangencialmente (cada uno unido a 4 más). Los patrones "c" y "d" los conforman círculos traslapados; en el primer caso el traslape es sencillo, en el segundo es doble. Con los dos últimos mallados se reducen los espacios de lámina sin marcar.

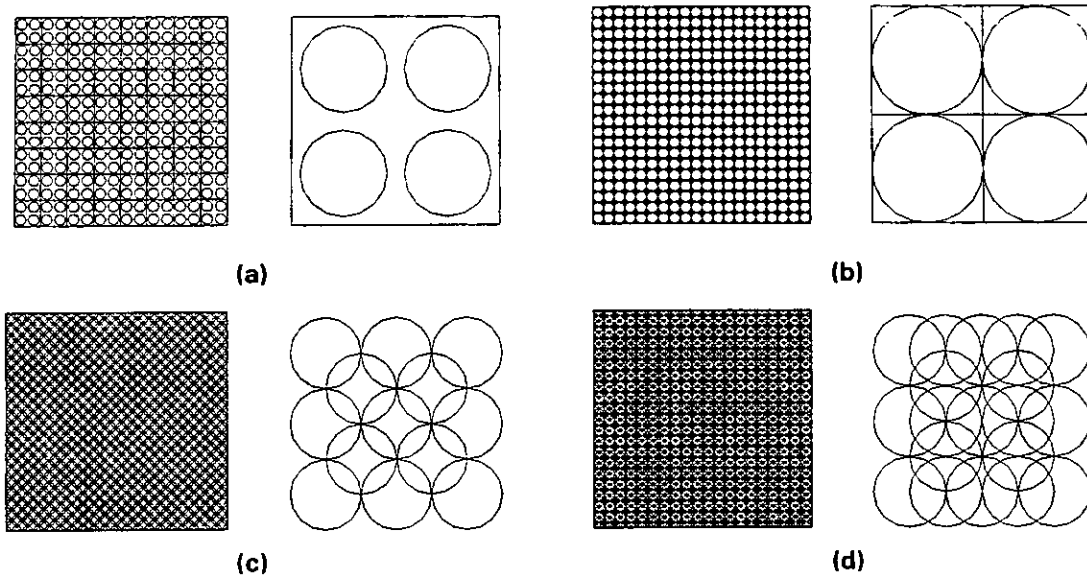


Figura 4.2. Patrones de mallado circular (a la derecha de cada uno se muestra una ampliación del patrón).

Para realizar el grabado de la malla se han desarrollado varios procedimientos. Primero se utilizó el grabado con tinta; pero se borraba fácilmente. Otro procedimiento que se ha utilizado es el fotográfico, en donde una emulsión fotosensible puesta sobre la lámina es expuesta junto con un negativo a una fuente de luz. Permite hacer una malla más fina, de hasta cien líneas por pulgada; sin embargo, se deteriora fácilmente y el tiempo para realizarla es de más de treinta minutos.

El procedimiento más utilizado produce el grabado electroquímicamente. Un *stencil*, previamente elaborado con el patrón que se desea grabar, se coloca sobre el material de trabajo. Después, un paño



empapado en electrolito se pone encima del *stencil* y se forma un circuito colocando el electrodo positivo sobre el paño y el negativo conectado a la lámina. Para realizar la marca, se hace pasar una corriente aproximada de 200 Amperes, mediante una fuente de poder de 14 Volts (corriente alterna), durante 10 segundos. Figura 4.3.

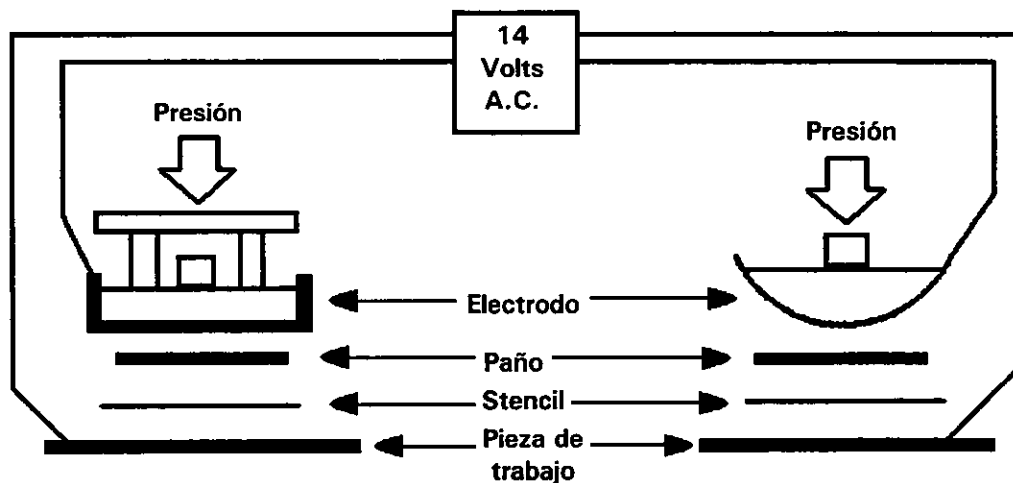


Figura 4.3. Sistema para grabado electroquímico.

La profundidad del grabado electroquímico es proporcional al tiempo de aplicación del voltaje. El mallado es permanente y continuará visible aun si se somete a abrasión. Dos de las ventajas de este procedimiento son que las marcas no provocan concentración de esfuerzos y que el equipo que se requiere para realizarlas es portátil (permite hacer el mallado rápidamente y, si es necesario, en la línea de producción).

### 4.2.2 Diagrama de conformabilidad límite

El estado de la deformación local en una lámina frecuentemente se representa graficando la deformación mayor " $e_1$ ", en el eje vertical, y la deformación menor " $e_2$ ", que puede ser negativa o positiva, en el eje horizontal. Por ejemplo, la figura 4.4 muestra cinco estados diferentes de deformación, en los que la mayor es 40% y la menor se encuentra entre -40% y 40%. Las elipses fueron originalmente círculos (dibujados con línea discontinua) cuando la lámina aún no se deformaba.

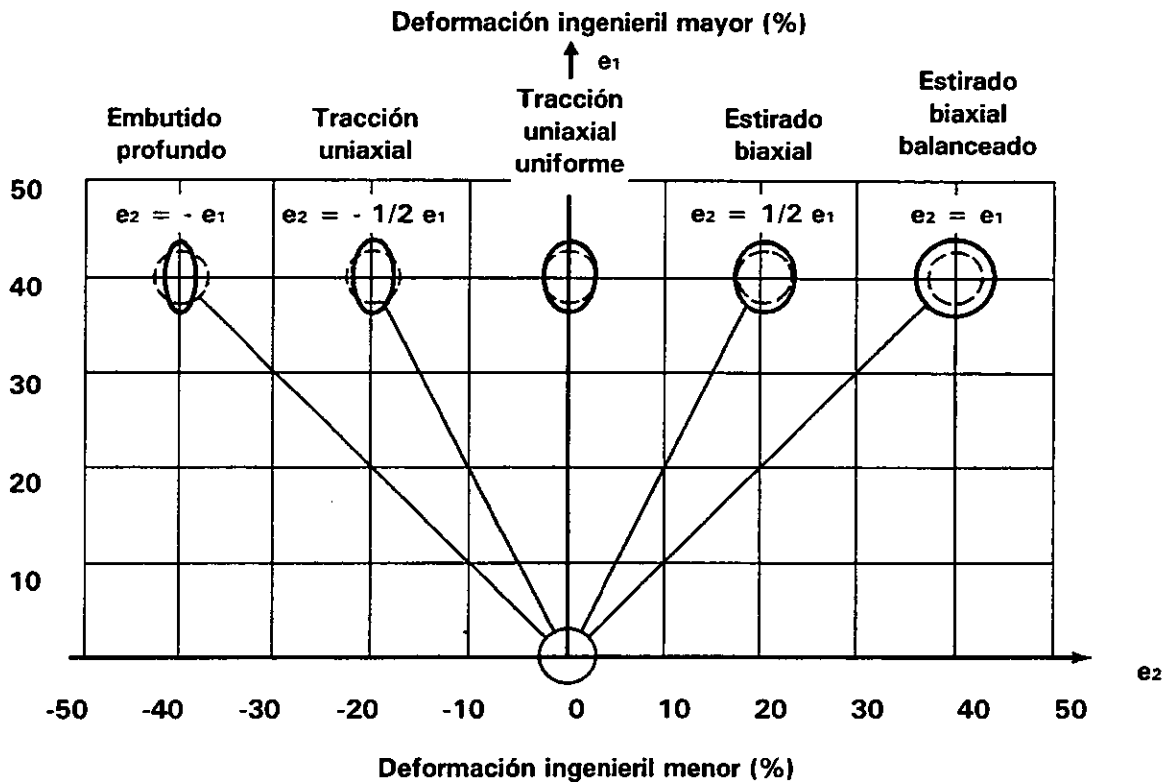


Figura 4.4. Diagrama de estado de deformación.

A la derecha del eje vertical, en la figura 4.4, los círculos se transformaron en elipses que son más grandes en todas direcciones que el círculo original. Esta es la región de estiramiento biaxial. En la línea a 45 grados, los círculos aumentaron de tamaño sin cambiar su forma, por lo que a esta línea se le llama de estiramiento biaxial balanceado, y limita el área de la gráfica en la que pueden graficarse los estados de deformación.

A la izquierda del eje vertical, los círculos se transformaron en elipses, alargadas en una dirección y más cortas en la perpendicular. Esta es la región de embutido (y, también, la del estado de deformaciones que se desarrolla en un ensayo de tracción). En el eje vertical, las elipses son más largas en una dirección y en la perpendicular no cambian de dimensión; es la zona de deformación plana.

Realizando ensayos de simulación, como el Erichsen, por ejemplo, se obtienen -y seleccionan- pares de valores  $e_1$  y  $e_2$  (deformación mayor y menor), distinguiendo si corresponden a zonas de formación de cuello, de fractura, o aceptables. Estos datos, graficados, dan como resultado el diagrama de conformabilidad límite (DCL). Éste, permite conocer y precisar la deformación máxima que puede soportar una lámina de metal. Se ha encontrado una buena correlación entre los diagramas obtenidos en

el laboratorio y el comportamiento de la lámina al utilizarla en la producción industrial.

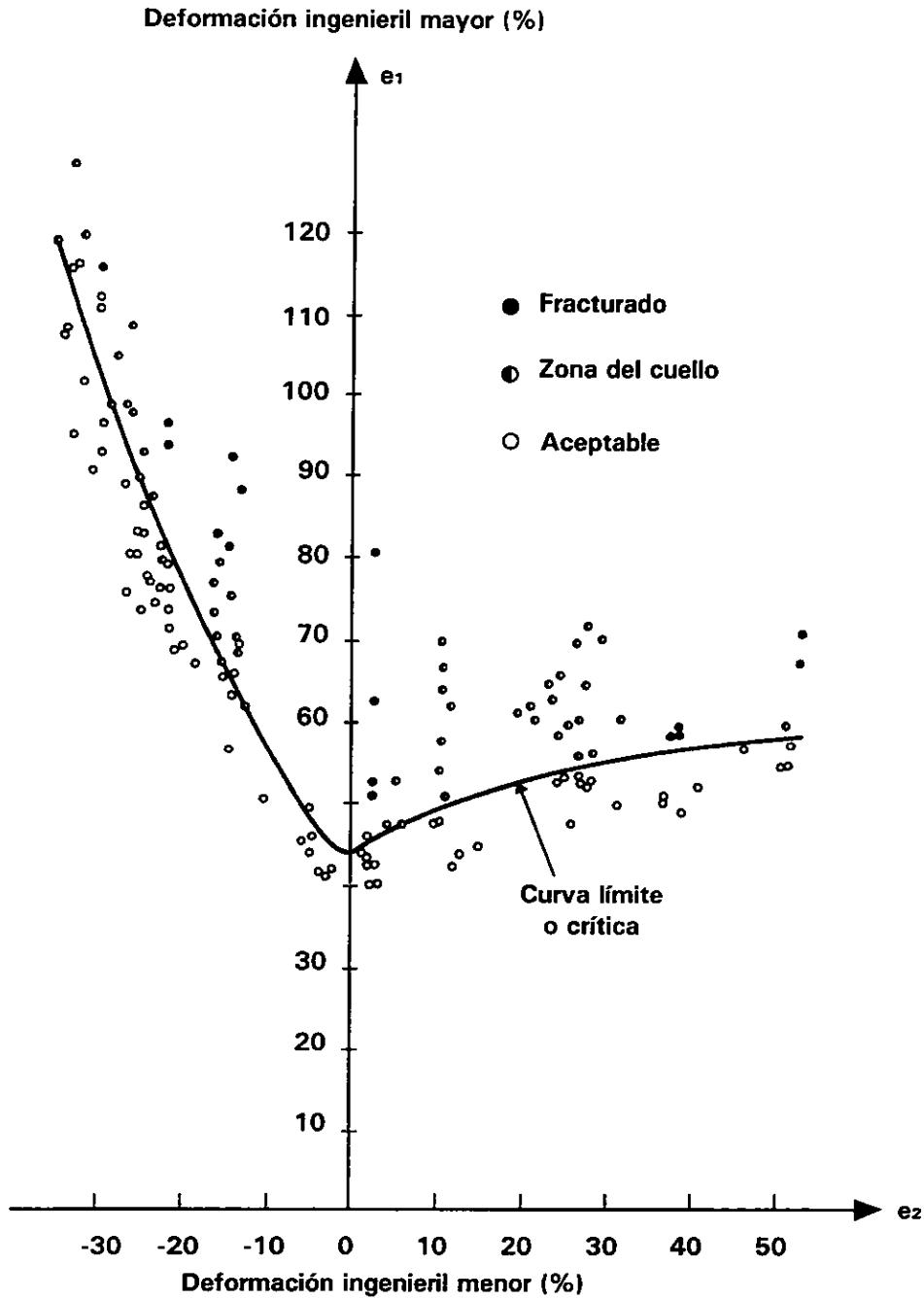


Figura 4.5. Diagrama de conformabilidad límite típico de un acero pasivado con aluminio.

Así, para elaborar el DCL se toma una muestra representativa del material y se fabrican las probetas de acuerdo al ensayo de simulación que se vaya a utilizar. A cada probeta se le graba el mallado circular y se prueba. En las probetas deformadas se mide el eje mayor y menor de las elipses del mallado que se encuentran en la zona de falla (donde se formó el cuello o la fractura) y sus inmediaciones. Las mediciones se plasman en un diagrama de estado de deformación y se traza la curva límite o crítica. En la figura 4.5 se muestra un diagrama típico de un acero pasivado con aluminio.

#### 4.2.2.1 Factores que influyen en el DCL

El DCL puede ser influenciado por varios factores, como son: el diámetro del mallado circular, la posición relativa de la dirección de medición con respecto a la del laminado, la lubricación y el espesor de la lámina.

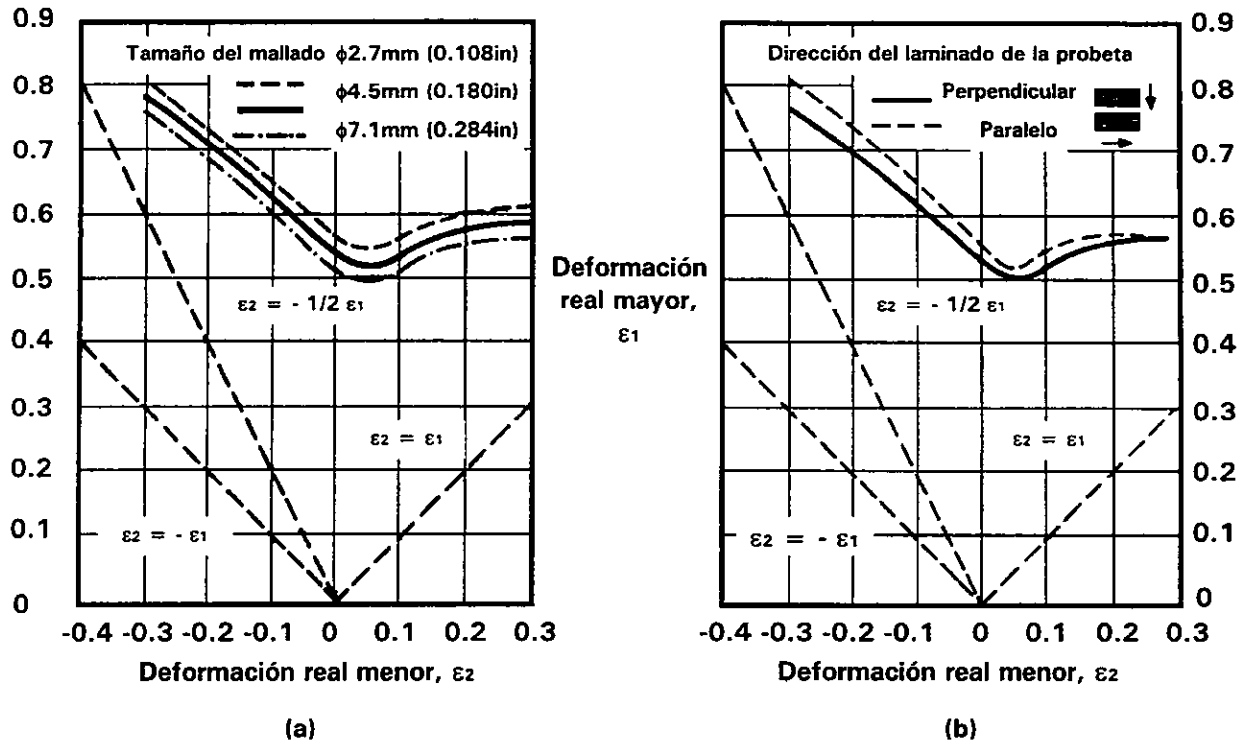


Figura 4.6. Influencia en el DCL por: a) tamaño de los círculos en el mallado y b) anisotropía planar.

Como se muestra en la figura 4.6(a), al aumentar el diámetro del mallado, disminuyen, comparativamente, las ordenadas de la curva crítica en los diagramas de conformabilidad límite, ya que se pueden determinar con más precisión las zonas de fractura o formación del cuello si el diámetro del mallado es más pequeño. La influencia de la anisotropía planar es relativamente más pequeña (aunque significativa para láminas de acero), como se muestra en la figura 4.6(b).

La influencia de la lubricación se muestra en la figura 4.7(a). Al mejorarla los valores límite aumentan. Lo mismo sucede al incrementar el espesor de la lámina. Figura 4.7(b).

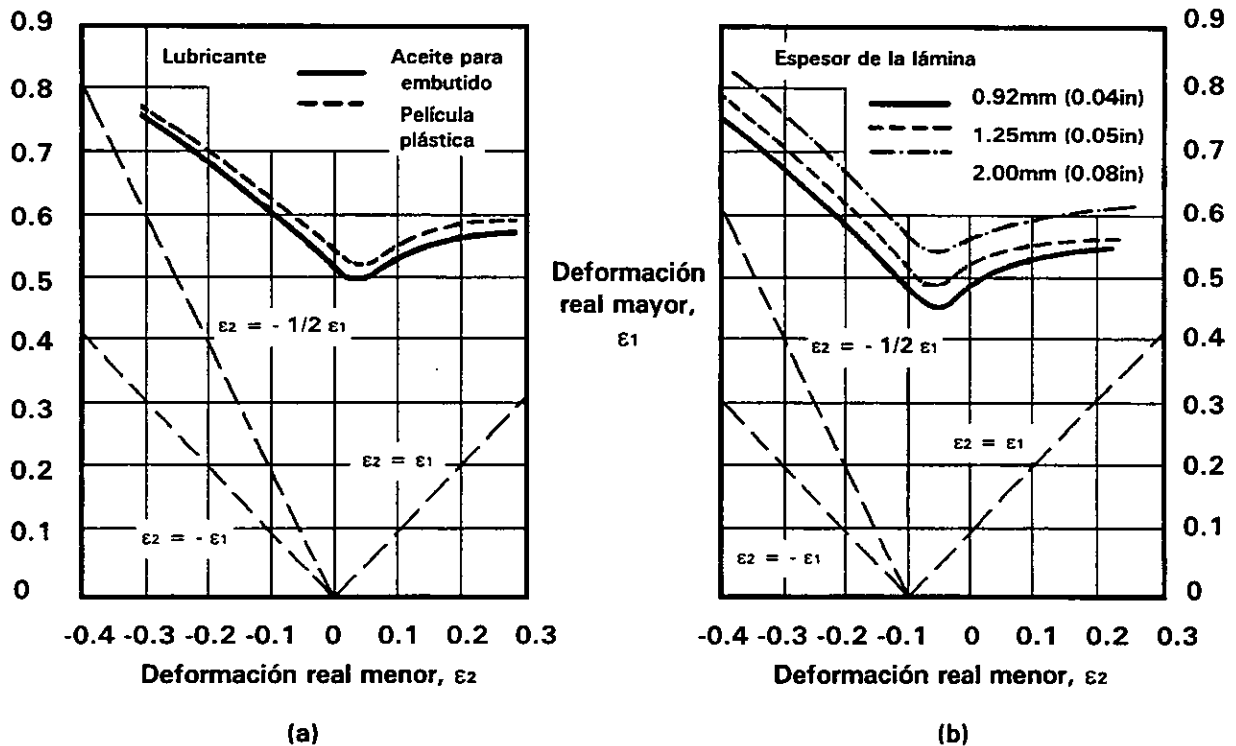


Figura 4.7. Influencia en el DCL por: a) lubricación y b) espesor de la lámina.

#### 4.2.2.2 Interpretación del DCL

La deformación del mallado circular difiere dependiendo del tipo de carga a la que se somete al material. De hecho existe una relación entre la distorsión del círculo y el tipo de estado de esfuerzo aplicado. Figura 4.4.

El diagrama de conformabilidad límite permite encontrar combinaciones de deformación mayor y menor para las cuales no se presentará formación de cuello o fractura. Si una combinación de deformaciones, al ubicarla en la gráfica, se encuentra por arriba o muy cercana a la curva crítica del DCL, querrá decir que esa combinación tiene una alta probabilidad de producir falla en la lámina. Por el contrario, si la combinación de deformaciones mayor y menor se encuentra suficientemente por debajo de la curva (aproximadamente un 10%), se podrá inferir que es muy poco probable que se presente falla en la lámina.

Figura 4.5.

En el siguiente capítulo se evalúa la conformabilidad de varias láminas y se obtienen sus diagramas límite. También se reportan los resultados de las pruebas que se realizaron para conocer algunas de sus propiedades mecánicas.



## CAPÍTULO 5

### EVALUACIÓN DE CONFORMABILIDAD Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron pruebas a cuatro láminas diferentes para obtener algunas de sus propiedades mecánicas y su diagrama de conformabilidad límite. La tabla 5.1 señala sus características principales.

Lámina número	Descripción	Composición química*	Calibre	Estado metalúrgico
1	Lámina negra nacional	0.06 %C, 0.13 %Si, 0.53 %Mn	22	Recocido
2	Lámina negra nacional, trabajada en frío	0.06 %C, 0.13 %Si, 0.53 %Mn	22	40% de trabajo en frío
3	Lámina de Bélgica	0.146 %C, 0.732 %Cr, 1.308 %Mn, 0.026 %Mo	22	Recocido
4	Lámina para uso automotriz	0.027 %C, 0.18 %Mn, 0.06 %P, 0.07 %S	22	Recocido

\*La composición química de las láminas 1 y 2 se evaluó haciendo un análisis de energía dispersa y metalografía cuantitativa. Las composiciones de las 3 y 4 fueron proporcionadas junto con las láminas.

Tabla 5.1. Características de las láminas estudiadas.

A continuación, se describen los procedimientos experimentales utilizados para el estudio de las cuatro láminas y se reportan los resultados obtenidos.

## 5.1 Procedimiento experimental

En este trabajo se utilizó el ensayo de tracción para caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales. Y para obtener el diagrama de conformabilidad límite se empleó un método de grabado electroquímico del mallado circular, el ensayo Erichsen, ensayos de tracción, y una técnica para medir la deformación en la malla.

### 5.1.1 Ensayo de tracción

Para realizarlo se empleó el siguiente equipo:

- Máquina universal de pruebas electromecánica marca Instron, modelo 4206, y las mordazas con apertura máxima de 6.35 mm:  
  
Capacidad: 150 kN;  
  
velocidades de aplicación de carga: hasta 25 kN a 500 mm/min y hasta 150 kN a 50 mm/min;  
  
precisión de la celda de carga:  $\pm 1\%$  de la lectura a 1/50 de su capacidad;  
  
rango de velocidades del marco de carga: 0.05 a 500 mm/min;  
  
precisión de la velocidad del marco de carga:  $\pm 0.2\%$  en valores superiores a 100 mm;  
  
velocidad de regreso del marco de carga: 500 mm/min, y

rigidez de la máquina: 140 kN/mm.

- Calibrador digital marca Mitutoyo, modelo CD-6":  
Rango de medición: 0 a 152.4 mm, y  
resolución: 0.01 mm.
- Micrómetro digital marca Mitutoyo, modelo MDC-1"M:  
Rango de medición: 0 a 25.4 mm, y  
resolución: 0.001 mm.

Se elaboraron probetas de las láminas para ensayarlas según la norma ASTM E8 (*Tension testing of metallic materials*). La máquina universal de pruebas electromecánica se preparó empleando el programa para ensayo de tracción de láminas (los parámetros utilizados en el programa fueron: toma de datos para la elaboración de la gráfica 5 pts/seg, velocidad del marco de carga 10 mm/min) e instalando el herramental correspondiente (las pruebas se realizaron a temperatura y condiciones ambiente). Figura 5.1. A cada probeta se le midió el ancho y el espesor de la zona de prueba (con el calibrador digital) y se cargaron en el programa; posteriormente, se le sujetó a las mordazas y fue sometida a cargas de tracción hasta la ruptura, obteniendo su diagrama esfuerzo-

deformación ingenieril (el reporte incluye los datos y valores característicos de las pruebas). Éstas se hicieron en la dirección del laminado (longitudinal), a 45 grados y a 90 grados (transversal).

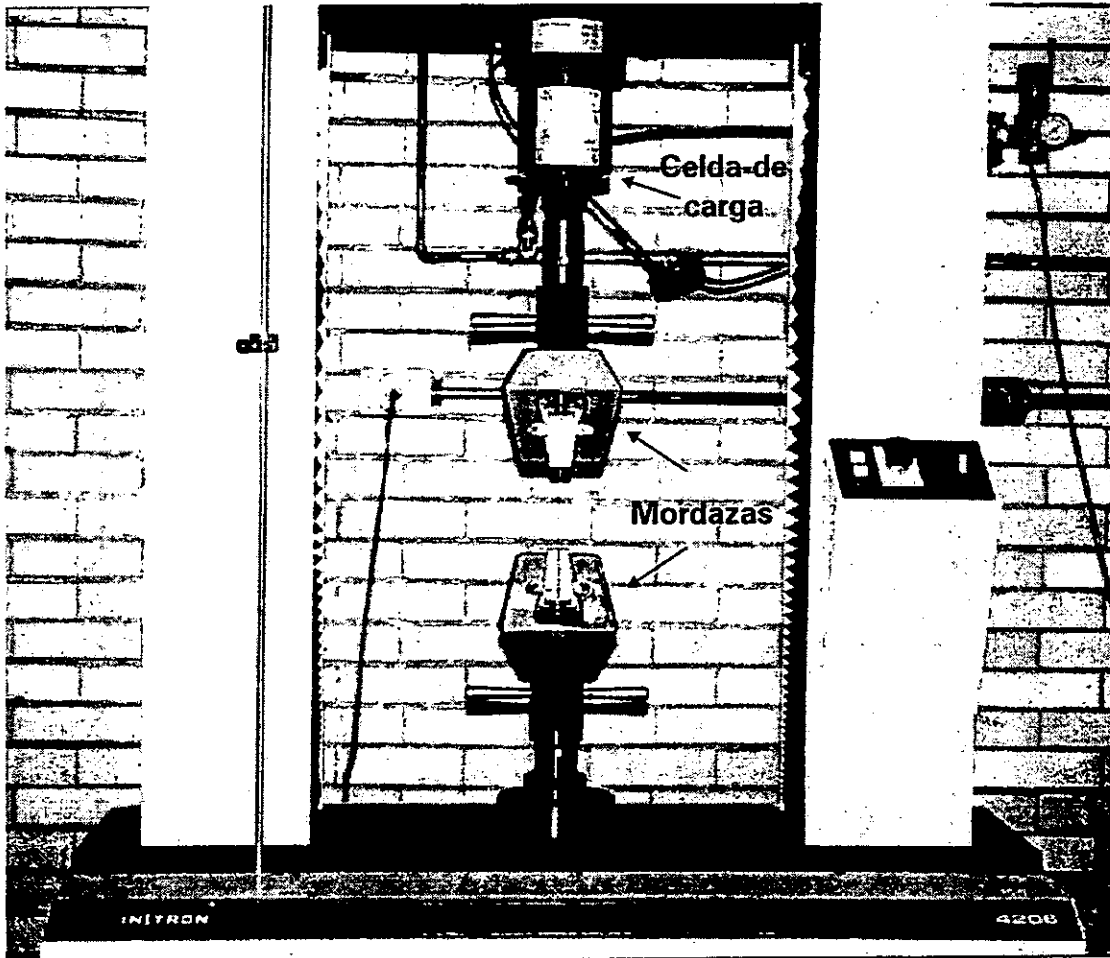


Figura 5.1. Máquina universal de pruebas electromecánica, con el instrumental para el ensayo de tracción.

En dos de las láminas estudiadas también se realizaron ensayos de tracción; pero deformándolas hasta un 20%, para calcular su anisotropía. El procedimiento es similar al antes descrito. Con el

micrómetro digital se midieron los espesores y anchos iniciales y finales. Se calculó la anisotropía normal ( $r_m$ ) y la anisotropía planar ( $\Delta r$ ), según las ecuaciones 3.14, 3.15 y 3.16.

### 5.1.2 Diagrama de conformabilidad límite

Para obtenerlo se utilizó:

- Equipo para grabado electroquímico marca Etch-O-Matic, modelo super kit:  
Profundidad de grabado: 0.00254 mm con corriente alterna, 0.07620 mm con corriente directa;  
tiempo de grabado: 10 a 12 segundos, y  
superficie máxima de grabado: 101.6 X 50.8 mm.
- Máquina universal de pruebas servohidráulica marca Instron, modelo 1331, y herramental para el ensayo Erichsen:  
Capacidad: 100 kN;  
precisión de la celda de carga:  $\pm 1$  % de la lectura a 1/50 de su capacidad;  
rango de la velocidad del marco de carga:  $8.5 \times 10^{-5}$  a 846.6 mm/min, y  
deflexión del marco de carga: 0.16764mm.

- Regla flexible para medir porcentajes de deformación, considerando una longitud inicial de 2.5 mm:  
Rango de medición: -50% a 105%, y  
resolución: 1%.

#### 5.1.2.1 Grabado

Las probetas para el ensayo Erichsen se grabaron con el equipo Etch-O-Matic de la siguiente manera: se limpió la superficie por grabar, eliminando grasa y polvo; se conectó el equipo a una toma de 110 volts, y la terminal de tierra a la lámina; sobre ésta, se colocó el *stencil* -con un patrón de mallado como el de la figura 4.2(b)-, un fieltro mojado con electrolito y la terminal positiva (ver figura 5.2), cerrando el circuito y manteniéndolo así, durante 10 segundos, para realizar la marca; por último, se agregó neutralizador a la zona del grabado, para suspender la reacción química, y se lavó la probeta.

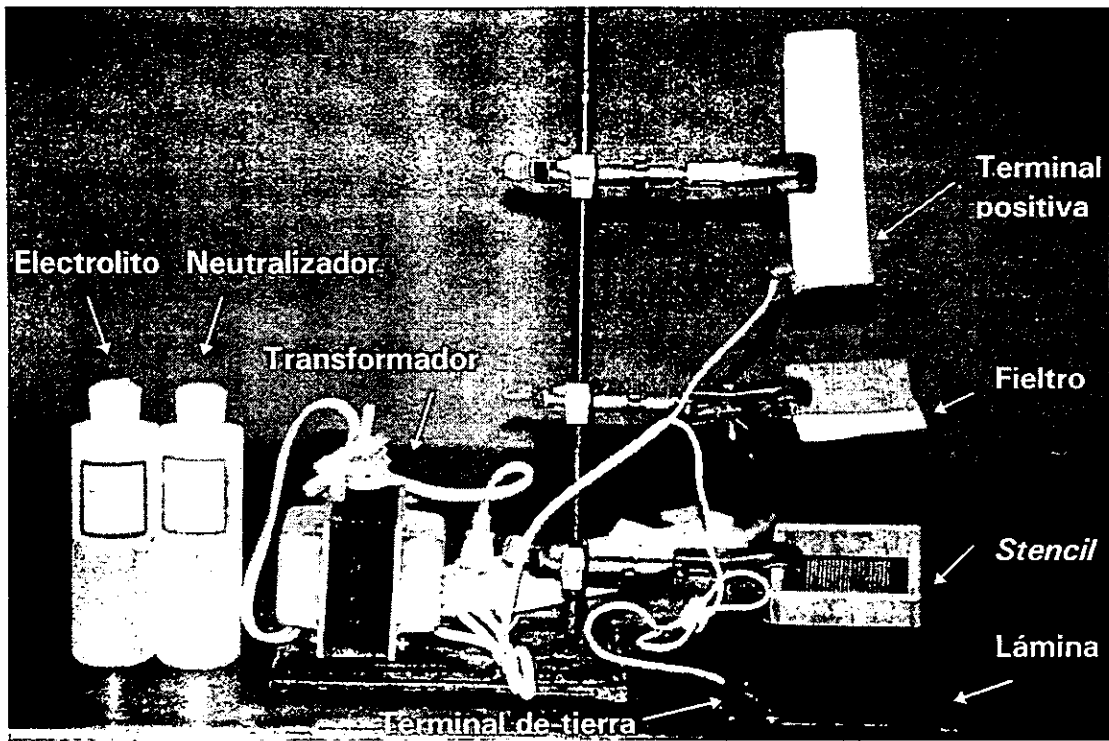


Figura 5.2. Equipo para grabado electroquímico.

#### 5.1.2.2 Ensayo Erichsen

La máquina universal de pruebas servohidráulica se programó con una función rampa negativa y una velocidad de 0.08 mm/seg (rango 0.01 Hz, multiplicador 1.84, 100% de desplazamiento). Se instaló el herramental como se muestra en la figura 5.3 (los parámetros del ensayo y el herramental fueron normalizados según ASTM E-643 *Ball punch deformation of metallic sheet material*). Cada probeta, ya marcada, se lubricó con grasa grafitada en la zona de prueba; se prensó con el

herramental, de manera que no se moviera durante el ensayo, y se deformó hasta el comienzo de la formación del cuello (lo cual se detecta con la caída súbita de la carga). En ese momento se detuvo la prueba. Se obtuvo una gráfica de carga contra desplazamiento para cada probeta (escala: 0.25 V/cm, en ambos ejes. Equivalencias: para la carga 10V = 10ton y para el desplazamiento 10V = 5.08cm). Se calcularon las cargas máximas soportadas y las profundidades de la copa Erichsen.

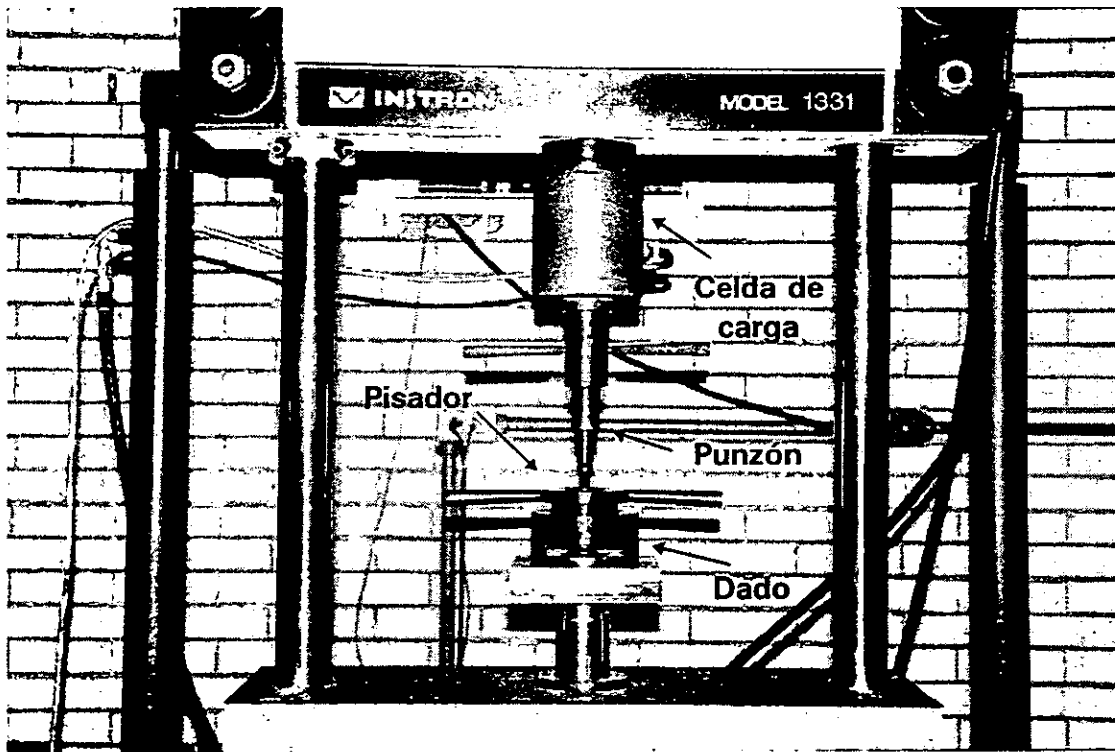


Figura 5.3. Máquina universal de pruebas servohidráulica, con el herramental para el ensayo Erichsen.



### 5.1.2.3 Método de medición

En las probetas Erichsen ensayadas se midieron las deformaciones principales; es decir, eje mayor y menor de las elipses resultantes del cambio de forma de los círculos grabados previamente. Se midieron las elipses donde se formó el cuello y las localizadas en las zonas adyacentes. Se utilizó una regla flexible, como se muestra en la figura 5.4.

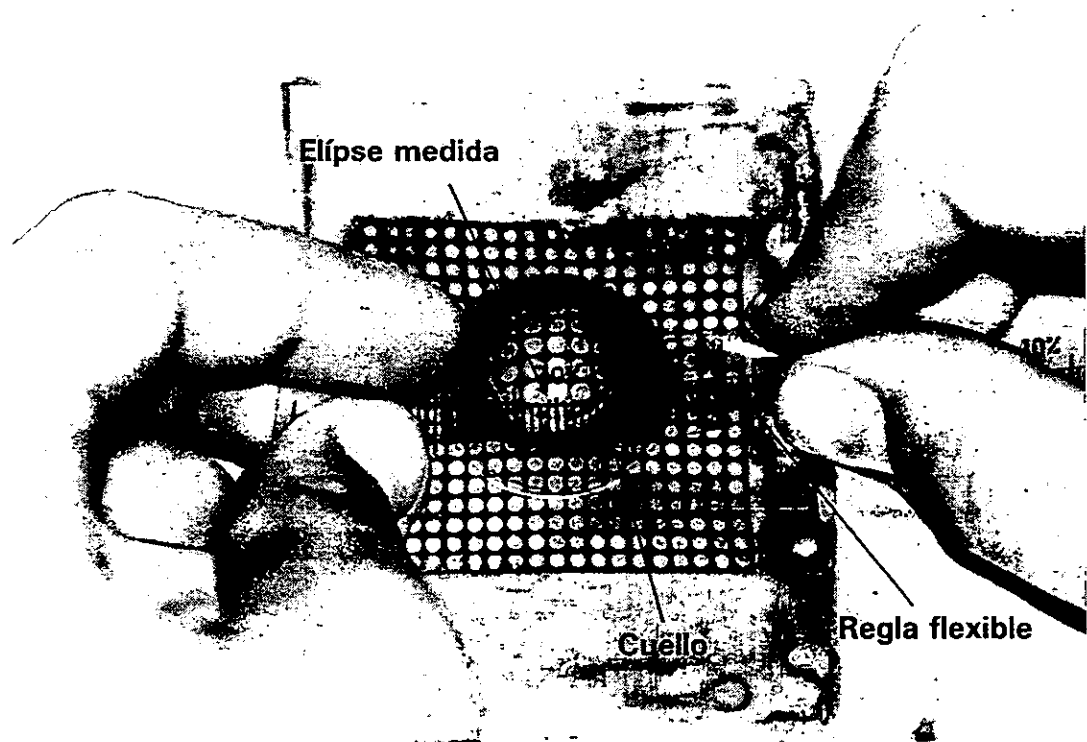


Figura 5.4. Probeta Erichsen ya deformada. Se está midiendo el eje mayor de una elipse en la zona de falla: la deformación es del 70%.

Las deformaciones mayor y menor de cada elipse medida se graficaron en un diagrama de estado de deformación, distinguiendo los puntos de la zona de cuello (fallados) de los demás (sin falla). Así, se forman dos regiones en la gráfica, ligeramente traslapadas, que permiten ubicar la curva crítica o límite del diagrama de conformabilidad.

Para complementar el diagrama y obtener estados de deformación a la izquierda del eje vertical, se marcaron, en la zona de prueba, usando el patrón 4.2(b), probetas para ensayos de tracción (cuatro de cada dirección: longitudinal, 45 grados y transversal). Se ensayaron y se siguió el mismo método y criterio utilizado para las probetas Erichsen, midiendo las deformaciones principales y graficándolas en el diagrama de conformabilidad límite.

**5.2 Resultados**

**5.2.1 Ensayos de tracción (reportes)**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 13 jul 1998

Sample Identification: lámina 1 (longitudinal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

Dimensions: Spec. 1 Spec. 2 Spec. 3 Spec. 4 Spec. 5

Width (mm) 14.07 14.09 13.85 13.72 13.61

Thickness (mm) .81 .80 .80 .80 .80

Spec gauge len (mm) 80.0 80.0 80.0 80.0 80.0

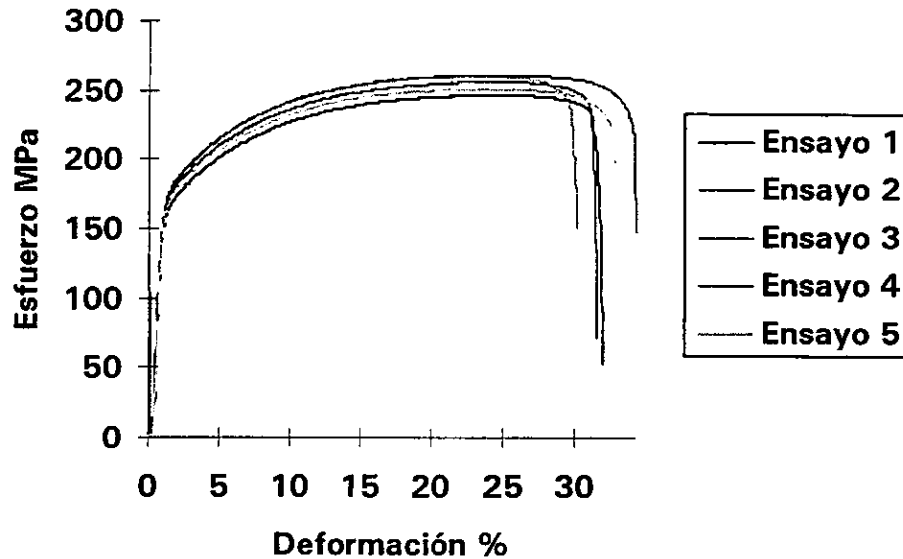
Grip distance (mm) 100.0 100.0 100.0 100.0 100.0

Out of 5 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazo. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. Carga (MPa)	Desplazo. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	20.59	25.74	3.507	307.8	25.56	31.95	.9141	80.23
2	20.30	25.38	3.515	311.9	25.27	31.59	.8134	72.18
3	19.74	24.68	3.572	322.5	24.10	30.13	2.0740	187.20
4	20.99	26.24	3.584	326.6	27.50	34.38	2.0250	184.50
5	20.41	25.51	3.443	316.3	26.37	32.96	2.3960	220.10
Mean:	20.41	25.51	3.524	317.0	25.76	32.20	1.6440	148.90
Standard deviation:	.46	.57	.057	7.6	1.27	1.59	.7277	67.85

Specimen number	Desplazo. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.7696	.9620	2.054	180.2	41120.
2	.7986	.9983	2.090	185.5	37770.
3	.8299	1.0370	2.102	189.8	36190.
4	.8636	1.0800	2.142	195.2	41960.
5	.8669	1.0840	2.110	193.8	39040.
Mean:	.8257	1.0320	2.100	188.9	39220.
Standard deviation:	.0419	.0524	.032	6.2	2369.

## Ensayo de tracción longitudinal lámina 1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 13 jul 1998

Sample Identification: lámina 1 (45 grados)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

Dimensions:

Width (mm)

Spec. 1 Spec. 2 Spec. 3 Spec. 4

3.65 13.65 13.70 13.70

Thickness (mm)

.80 .80 .80 .80

Spec gauge len (mm)

80.0 80.0 80.0 80.0

Grip distance (mm)

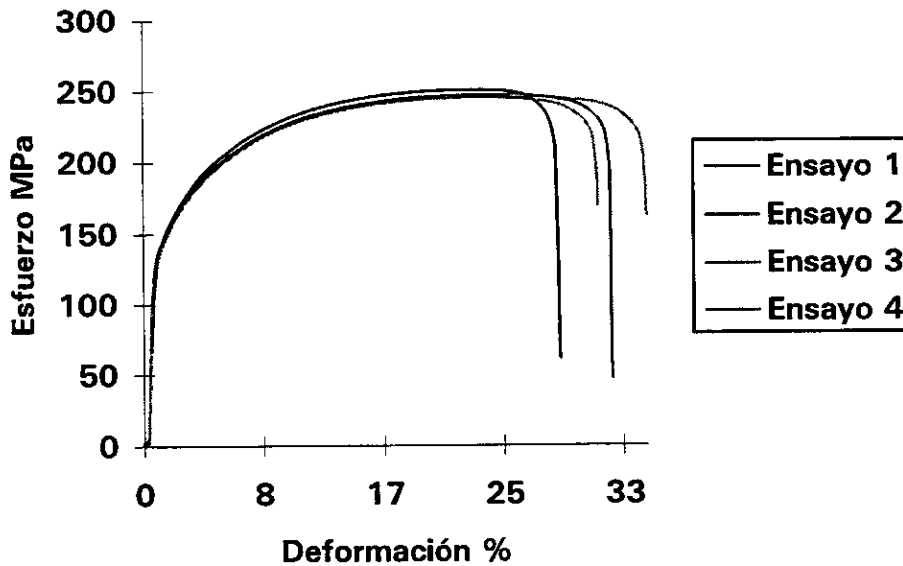
100.00 100.00 100.00 100.00

Out of 4 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	18.79	23.49	3.552	325.4	23.02	28.78	-----	-----
2	20.58	25.73	3.459	316.8	25.81	32.26	2.5530	233.90
3	19.79	24.74	3.479	317.5	25.12	31.40	2.4640	224.90
4	20.75	25.94	3.511	320.4	27.81	34.76	2.3190	211.60
Mean:	19.98	24.97	3.500	320.0	25.44	31.80	2.4450	223.50
Standard deviation:	.90	1.12	.041	3.9	1.98	2.47	.1181	11.17

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.8089	1.0110	1.860	170.4	33190.
2	.6966	.8708	1.816	166.3	45570.
3	.7656	.9570	1.864	170.1	31840.
4	.7323	.9154	1.796	163.9	42750.
Mean:	.7509	.9386	1.834	167.7	38340.
Standard deviation:	.0479	.0598	.034	3.1	6843.

Ensayo de tracción 45 grados lámina 1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 13 jul 1998

Sample Identification: lámina 1 (transversal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

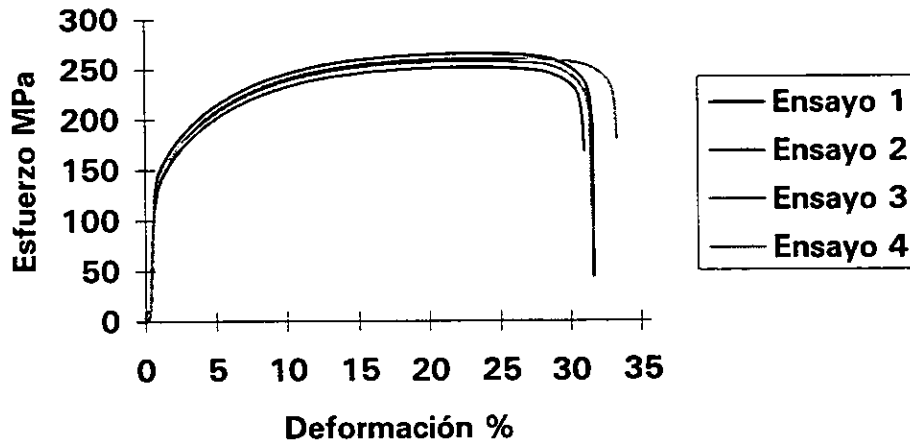
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4
Width (mm)	13.65	13.65	13.40	13.35
Thickness (mm)	.80	.80	.80	.80
Spec gauge len (mm)	80.00	80.00	80.00	80.00
Grip distance (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0

Out of 4 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazo. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazo. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	18.28	22.85	3.548	325.0	25.10	31.38	2.5010	229.10
2	18.15	22.69	3.411	312.4	24.64	30.80	2.2790	208.80
3	18.98	23.73	3.350	312.6	25.18	31.48	---	---
4	18.84	23.55	3.403	318.7	26.51	33.14	2.2870	214.20
Mean:	18.56	23.20	3.428	317.2	25.36	31.70	2.3560	217.30
Standard deviation:	.41	.51	.084	6.0	.80	1.00	.1259	10.53

Specimen number	Desplazo. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.7359	.9199	1.933	177.0	52280.
2	.7039	.8799	1.736	159.0	46520.
3	.6963	.8704	1.740	162.3	44110.
4	.7453	.9316	1.804	169.0	43870.
Mean:	.7203	.9004	1.803	166.8	46700.
Standard deviation:	.0239	.0299	.092	8.0	3911.

**Ensayo de tracción transversal lámina 1**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 26 feb 1998

Sample Identification: lámina 2 (longitudinal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

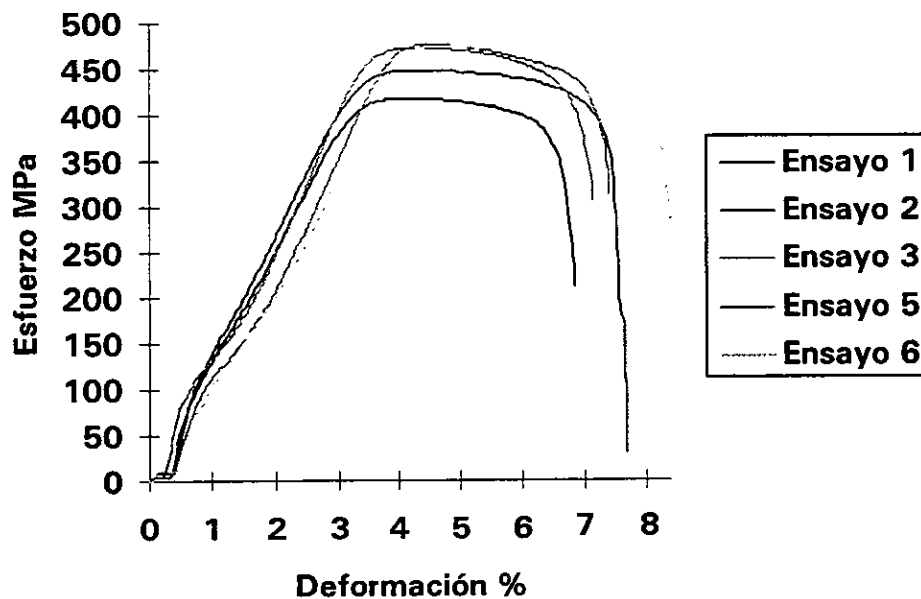
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4	Spec. 5	Spec. 6
Width (mm)	11.07	11.02	10.83	10.89	10.84	10.87
Thickness (mm)	.840	.770	.750	.720	.740	.750
Spec gauge len (mm)	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
Grip distance (mm)	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0

Out of 6 specimens, 1 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	2.660	3.800	3.886	418.0	4.570	6.529	1.792	192.8
2	2.950	4.214	3.801	448.1	5.120	7.314	1.148	135.3
3	2.930	4.186	3.841	473.0	4.770	6.814	2.484	305.9
Excluded	3.670	5.243	3.874	494.2	5.790	8.271	2.722	347.2
5	3.070	4.386	3.821	476.5	4.950	7.071	2.142	267.1
6	3.280	4.686	3.866	474.3	5.590	7.986	2.456	301.3
Mean:	2.978	4.254	3.843	458.0	5.000	7.143	2.004	240.5
Standard deviation:	.226	.322	.034	25.1	.388	.555	.555	74.2

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	2.2640	3.2350	3.7810	406.700	14120.
2	0.2336	.3337	.0725	8.544	14430.
3	2.4010	3.4300	3.7530	462.200	16710.
Excluded	3.3060	4.7230	3.8090	486.000	15030.
5	2.6990	3.8550	3.7650	469.500	15500.
6	2.7670	3.9530	3.8090	467.400	15690.
Mean:	2.0730	2.9610	3.0360	362.900	15290.
Standard deviation:	1.0490	1.4980	1.6570	199.800	1041.

### Ensayo de tracción longitudinal lámina 2





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 26 feb 1998

Sample Identification: lámina 2 (45 grados)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

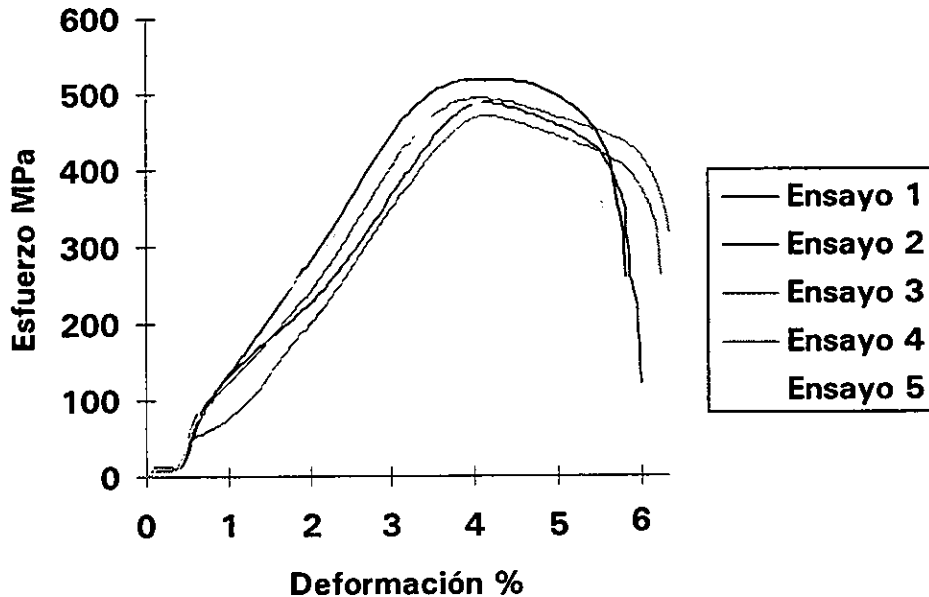
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4	Spec. 5
Width (mm)	11.41	11.42	11.48	11.47	10.51
Thickness (mm)	.750	.770	.800	.770	.730
Spec gauge len (mm)	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
Grip distance (mm)	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0

Out of 5 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	2.810	4.014	4.446	519.7	3.860	5.514	2.464	288.0
2	2.820	4.029	4.297	488.8	4.000	5.714	1.285	146.2
3	2.790	3.986	4.325	471.0	4.180	5.971	2.255	245.6
4	2.780	3.971	4.361	493.9	4.240	6.057	2.811	318.4
5	2.740	3.914	4.357	486.7	3.750	5.357	2.654	296.5
Mean:	2.788	3.983	4.357	492.0	4.006	5.723	2.294	258.9
Standard deviation:	.031	.044	.056	17.7	.207	.296	.601	68.3

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	2.3970	3.4240	4.3570	509.30	17510.
2	2.6400	3.7710	4.2560	484.10	17070.
3	2.6670	3.8100	4.2920	467.50	16280.
4	2.4760	3.5370	4.2920	486.10	17700.
5	0.2623	.3747	.1087	12.14	16080.
Mean:	2.0880	2.9830	3.4610	391.80	16930.
Standard deviation:	1.0270	1.4670	1.8750	212.80	724.

### Ensayo de tracción 45 grados lámina 2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 26 feb 1998

Sample Identification: lámina 2 (transversal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

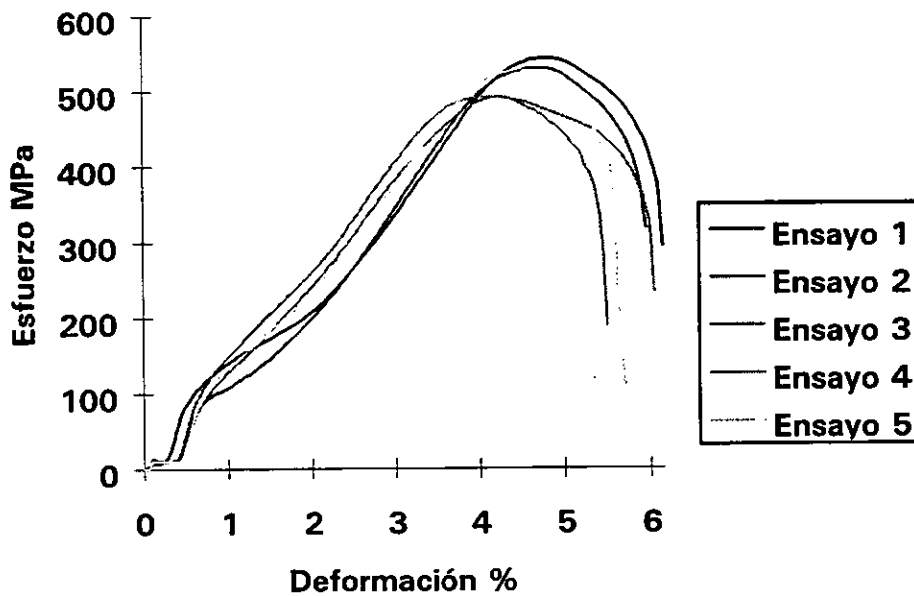
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4	Spec. 5
Width (mm)	10.53	10.50	10.56	10.61	10.51
Thickness (mm)	.720	.740	.790	.760	.730
Spec gauge len (mm)	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
Grip distance (mm)	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0

Out of 5 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	3.220	4.600	4.127	544.5	4.100	5.857	2.497	329.4
2	3.190	4.557	4.123	530.8	3.980	5.686	2.327	299.6
3	2.810	4.014	4.107	492.4	4.020	5.743	2.368	283.9
4	2.850	4.071	3.974	493.0	3.650	5.214	1.699	210.8
5	3.020	4.314	4.055	528.7	3.720	5.314	2.835	369.6
Mean:	3.018	4.311	4.077	517.9	3.894	5.563	2.345	298.7
Standard deviation:	.188	.269	.064	23.8	.197	.282	.413	59.0

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	3.008	4.298	4.071	537.1	16660.
2	2.867	4.096	4.043	520.4	17120.
3	2.500	3.571	4.047	485.2	15850.
4	2.630	3.757	3.890	482.5	14820.
5	2.732	3.903	3.950	515.0	16510.
Mean:	2.747	3.925	4.000	508.1	16190.
Standard deviation:	.199	.284	.077	23.5	890.

**Ensayo de tracción transversal lámina 2**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 10 mar 1998

Sample Identification: lámina 3 (longitudinal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

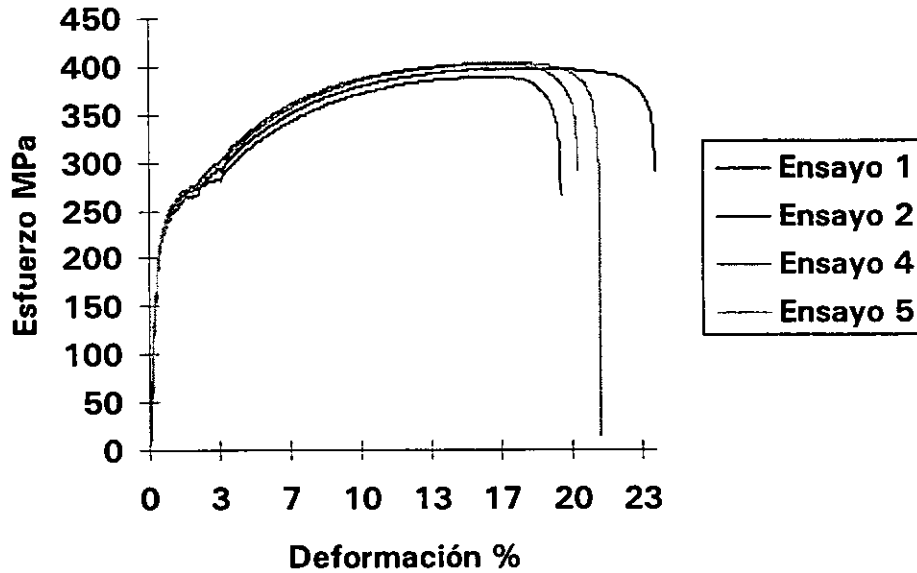
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4	Spec. 5
Width (mm)	12.00	12.01	11.95	11.95	11.95
Thickness (mm)	.80	.83	.82	.8200	.82
Spec gauge len (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Grip distance (mm)	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0

Out of 5 specimens, 1 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	18.3400	18.3400	3.8250	398.500	24.0300	24.0300	2.7950	291.2000
2	16.2000	16.2000	3.8860	389.900	19.5300	19.5300	2.8510	286.1000
Excluded	.0500	.0500	.0604	6.165	.0659	.0659	.0081	.8217
4	16.7300	16.7300	3.9460	402.800	20.3700	20.3700	2.7950	285.3000
5	17.4100	17.4100	3.9580	404.000	21.3500	21.3500	2.6820	273.8000
Mean:	17.1700	17.1700	3.9040	398.800	21.3200	21.3200	2.7810	284.1000
Standard deviation:	.9239	.9239	.0612	6.371	1.9540	1.9540	.0709	7.3660

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.5656	.5656	2.033	211.9	68670.
2	.6326	.6326	2.215	222.2	61790.
Excluded	-----	-----	-----	-----	2289.
4	.5966	.5966	2.166	221.1	68410.
5	.6329	.6329	2.130	217.4	61620.
Mean:	.6069	.6069	2.136	218.2	65120.
Standard deviation:	.0324	.0324	.077	4.7	3945.

**Ensayo de tracción longitudinal lámina 3**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

**Prueba de tracción para lámina**

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 11 mar 1998

Sample Identification: lámina 3 (45 grados)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

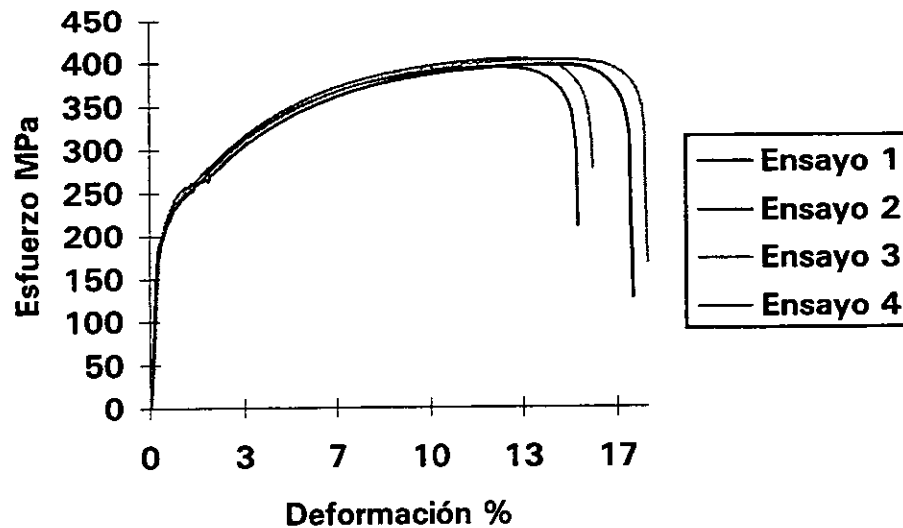
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4
Width (mm)	8.95	9.04	9.06	8.98
Thickness (mm)	.840	.830	.830	.810
Spec gauge len (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0
Grip distance (mm)	115.0	115.0	115.0	115.0

Out of 4 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	14.54	14.54	2.988	397.5	17.23	17.23	1.136	151.1
2	12.36	12.36	2.964	395.1	15.29	15.29	2.086	278.1
3	13.54	13.54	3.036	403.8	15.83	15.83	2.138	284.4
4	15.04	15.04	2.927	402.5	17.78	17.78	1.148	157.9
Mean:	13.87	13.87	2.979	399.8	16.53	16.53	1.627	217.9
Standard deviation:	1.18	1.18	.046	4.1	1.17	1.17	.560	73.3

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.5333	.5333	1.542	205.2	72400.
2	.5992	.5992	1.574	209.9	64380.
3	.6356	.6356	1.659	220.7	61930.
4	.5689	.5689	1.538	211.5	68080.
Mean:	.5842	.5842	1.578	211.8	66700.
Standard deviation:	.0436	.0436	.056	6.5	4564.

### Ensayo de tracción 45 grados lámina 3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 11 mar 1998

Sample Identification: lámina 3 (transversal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

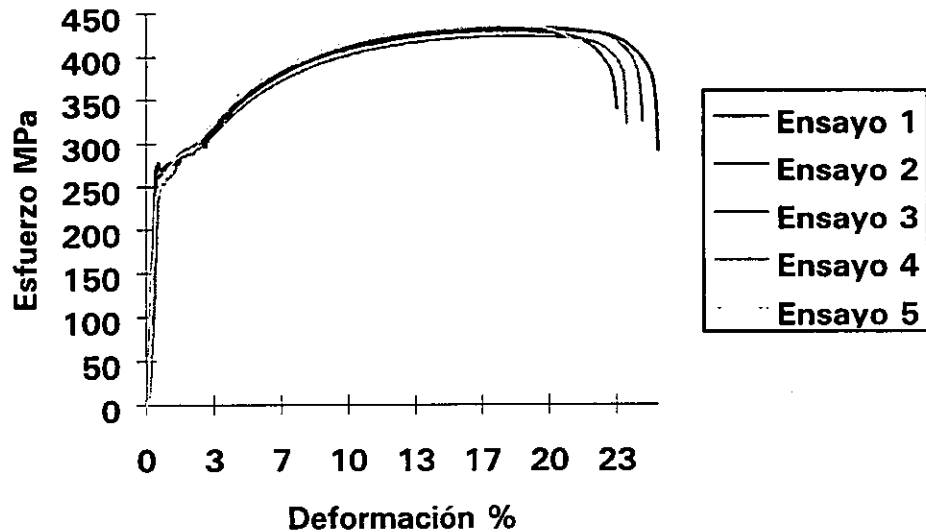
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4	Spec. 5
Width (mm)	11.52	11.52	11.50	11.52	11.51
Thickness (mm)	.80	.80	.80	.80	.80
Spec gauge len (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Grip distance (mm)	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0

Out of 5 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	19.76	19.76	3.978	431.7	25.43	25.43	2.782	301.9
2	18.58	18.58	3.958	429.6	23.44	23.44	2.907	315.5
3	19.49	19.49	3.990	433.8	24.68	24.68	2.923	317.8
4	19.43	19.43	3.902	423.5	23.98	23.98	1.832	198.8
5	17.15	17.15	4.023	437.0	22.25	22.25	2.835	308.0
Mean:	18.88	18.88	3.970	431.1	23.96	23.96	2.656	288.4
Standard deviation:	1.06	1.06	.045	5.1	1.21	1.21	.464	50.5

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.6682	.6682	2.436	264.4	73380.
2	.6752	.6752	2.444	265.3	80590.
3	.7016	.7016	2.444	265.7	73620.
4	.8342	.8342	2.356	255.7	65620.
5	.6619	.6619	2.299	249.8	71810.
Mean:	.7082	.7082	2.396	260.2	73010.
Standard deviation:	.0720	.0720	.066	7.1	5340.

### Ensayo de tracción transversal lámina 3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 13 jul 1998

Sample Identification: lámina 4 (longitudinal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

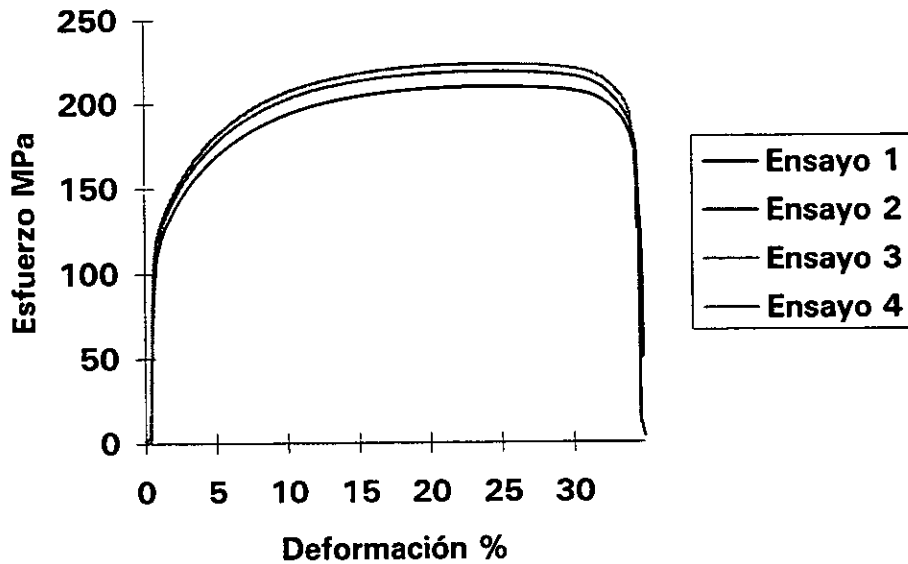
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4
Width (mm)	13.35	13.35	13.3	13.35
Thickness (mm)	.80	.80	.80	.80
Spec gauge len (mm)	80.0	80.0	80.0	80.0
Grip distance (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0
Out of 4 specimens, 0 excluded.				



Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	19.50	24.38	2.988	279.8	27.53	34.41	1.224	114.6
2	20.37	25.46	3.004	281.3	27.37	34.21	1.486	139.2
3	20.01	25.01	2.984	280.5	27.26	34.08	1.808	170.0
4	19.64	24.55	2.984	279.5	27.25	34.06	1.800	168.6
Mean:	19.88	24.85	2.990	280.3	27.35	34.19	1.579	148.1
Standard deviation:	.39	.49	.009	.80	.13	.16	.280	26.4

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.7039	.8799	1.566	146.7	42520.
2	.7353	.9191	1.615	151.2	41610.
3	.7133	.8916	1.623	152.6	46310.
4	.7073	.8841	1.583	148.2	45230.
Mean:	.7149	.8937	1.597	149.7	43920.
Standard deviation:	.0141	.0176	.027	2.7	2215.

Ensayo de tracción longitudinal lámina 4



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 13 jul 1998

Sample Identification: lámina 4 (45 grados)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

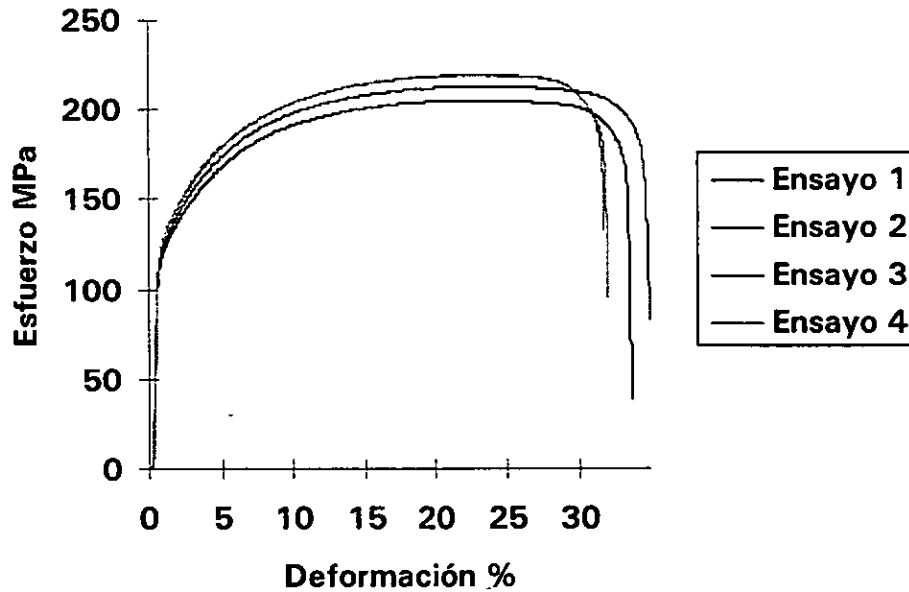
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4
Width (mm)	13.05	13.05	13.00	13.00
Thickness (mm)	.80	.80	.80	.80
Spec gauge len (mm)	80.00	80.00	80.00	80.00
Grip distance (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0

Out of 4 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	18.32	22.90	2.915	279.3	26.81	33.51	---	---
2	19.99	24.99	2.911	278.9	27.78	34.73	1.1320	108.50
3	19.50	24.38	2.911	280.0	25.28	31.60	1.6910	162.60
4	19.85	24.81	2.915	280.4	25.46	31.82	1.2640	121.60
Mean:	19.41	24.27	2.913	279.6	26.33	32.92	1.3623	130.9
Standard deviation:	.76	.95	.002	.70	1.18	1.48	.2922	28.22

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.7006	.8758	1.655	158.6	53680.
2	.7003	.8754	1.639	157.0	51360.
3	.6419	.8024	1.578	151.8	54350.
4	.7006	.8758	1.631	156.8	50240.
Mean:	.6858	.8573	1.626	156.1	52410.
Standard deviation:	.0293	.0366	.033	2.9	1928.

**Ensayo de tracción 45 grados lámina 4**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Prueba de tracción para lámina

Test type: Tensile

Instron Corporation

Series IX Automated Materials Testing System 1.04

Operator name: MFF y EPV

Test Date: 13 jul 1998

Sample Identification: lámina 4 (transversal)

Interface Type: 4200 Series

Sample Type: ASTM

Machine Parameters of test:

Sample Rate (pts/sec): 5.00

Crosshead Speed (mm/min): 10.000

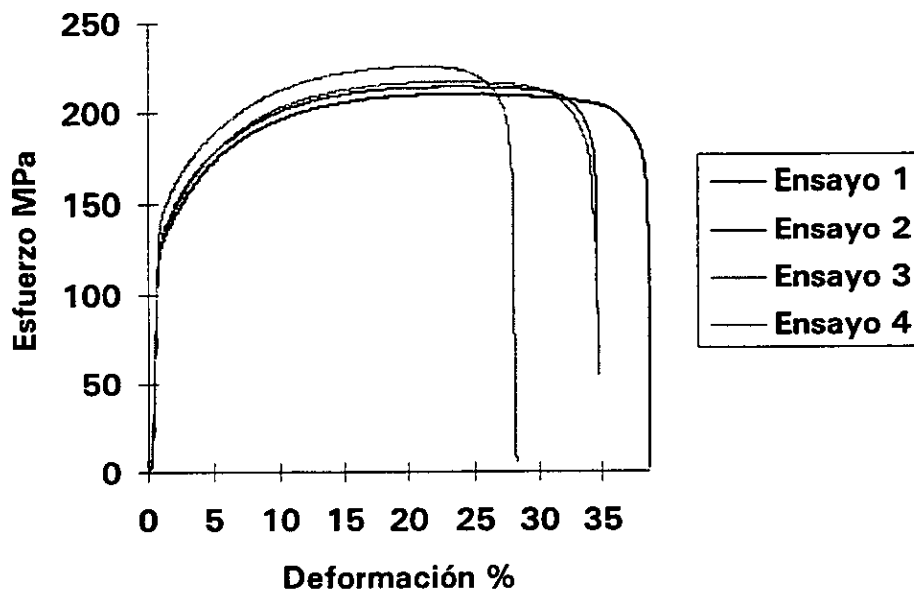
Dimensions:	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4
Width (mm)	13.05	13.00	13.00	13.65
Thickness (mm)	.80	.80	.80	.80
Spec gauge len (mm)	80.0	80.0	80.0	80.0
Grip distance (mm)	100.0	100.0	100.0	100.0

Out of 4 specimens, 0 excluded.

Specimen number	Desplazto. en máx. carga (mm)	Deforma. en máx. carga (%)	Carga máxima soportada (KN)	Esfuerzo en máx. carga (MPa)	Desplazto. en punto ruptura (mm)	Deforma. en punto ruptura (%)	Carga en punto ruptura (KN)	Esfuerzo en punto ruptura (MPa)
1	19.77	24.71	2.988	286.3	30.59	38.24	1.740	166.70
2	19.97	24.96	2.935	282.3	27.55	34.44	----	----
3	18.90	23.63	2.891	278.1	27.26	34.08	1.635	157.30
4	17.39	21.74	3.004	275.2	22.40	28.00	----	----
Mean:	19.01	23.76	2.954	280.4	26.95	33.69	1.6875	162.0
Standard deviation:	1.17	1.47	.052	4.9	3.39	4.23	.07424	6.647

Specimen number	Desplazto. al 0.2% fluencia (mm)	Deforma. al 0.2% fluencia (%)	Carga al 0.2% fluencia (KN)	Esfuerzo al 0.2% fluencia (MPa)	Módulo de Young (MPa)
1	.7473	.9341	1.740	166.7	49510.
2	.6973	.8716	1.663	159.9	49240.
3	.7026	.8783	1.643	158.0	50170.
4	.7329	.9161	1.832	167.8	47410.
Mean:	.7200	.9000	1.719	163.1	49080.
Standard deviation:	.0240	.0300	.086	4.9	1182.

#### Ensayo de tracción transversal lámina 4



5.2.1.1 Anisotropía (datos y resultados)

Dirección laminado	Lámina 1									
	w	w <sub>o</sub>	t	t <sub>o</sub>	ε <sub>w</sub>	ε <sub>t</sub>	r	r <sub>prom</sub>	r <sub>m</sub>	Δr
0 grados	0.73	0.78	16.47	17.47	-0.05	-0.06	0.92	r <sub>0</sub>	0.8	-0.2
	0.74	0.78	16.33	17.40	-0.05	-0.06	0.85	0.78		
	0.74	0.77	16.41	17.54	-0.03	-0.07	0.49			
	0.74	0.78	16.24	17.31	-0.05	-0.06	0.76			
	0.75	0.79	16.43	17.48	-0.06	-0.06	0.89			
45 grados	0.74	0.80	17.52	18.69	-0.07	-0.06	1.08	r <sub>45</sub>	0.85	
	0.75	0.79	16.79	17.88	-0.05	-0.06	0.73	0.85		
	0.75	0.79	17.22	18.32	-0.05	-0.06	0.83			
	0.75	0.79	19.02	20.21	-0.05	-0.06	0.82			
	0.74	0.78	17.60	18.73	-0.05	-0.06	0.82			
90 grados	0.75	0.78	16.00	17.07	-0.03	-0.06	0.53	r <sub>90</sub>	0.55	
	0.75	0.79	15.29	16.35	-0.05	-0.07	0.68	0.55		
	0.76	0.79	15.69	16.78	-0.03	-0.07	0.48			
	0.78	0.80	15.24	16.28	-0.03	-0.07	0.43			
	0.75	0.78	15.79	16.87	-0.04	-0.07	0.62			

Dirección laminado	Lámina 3									
	w	w <sub>o</sub>	t	t <sub>o</sub>	ε <sub>w</sub>	ε <sub>t</sub>	r	r <sub>prom</sub>	r <sub>m</sub>	Δr
0 grados	11.53	11.95	0.80	0.85	-0.04	-0.07	0.50	r <sub>0</sub>	0.8	-0.3
	11.52	11.97	0.80	0.85	-0.04	-0.07	0.57	0.54		
45 grados	8.56	9.09	0.80	0.85	-0.06	-0.06	0.94	r <sub>45</sub>	0.92	
	8.58	9.04	0.80	0.85	-0.05	-0.05	0.97	0.92		
	8.62	9.06	0.81	0.85	-0.05	-0.06	0.86			
90 grados	11.07	11.49	0.81	0.87	-0.04	-0.07	0.55	r <sub>90</sub>	0.63	
	11.06	11.62	0.81	0.86	-0.05	-0.06	0.78	0.63		
	11.02	11.52	0.80	0.86	-0.04	-0.07	0.63			
	11.00	11.52	0.80	0.86	-0.05	-0.07	0.64			
	11.07	11.51	0.80	0.85	-0.04	-0.07	0.54			

## 5.2.2 Ensayos Erichsen

Lámina 1				
Probeta	Datos de la gráfica		Cálculos a partir de la gráfica	
	Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx. (cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
1.1	8.2	7.6	10.41	1.35
1.2	8.1	7.6	10.29	1.35
1.3	8.15	7.6	10.35	1.35
1.4	8.1	7.55	10.29	1.34
1.5	8.1	7.4	10.29	1.31
1.6	8.2	7.4	10.41	1.31
		<b>Promedio</b>	<b>10.34</b>	<b>1.33</b>
	<b>Desviación estándar</b>		<b>0.058</b>	<b>0.019</b>

Gráfica más representativa, ensayo Erichsen, lámina 1

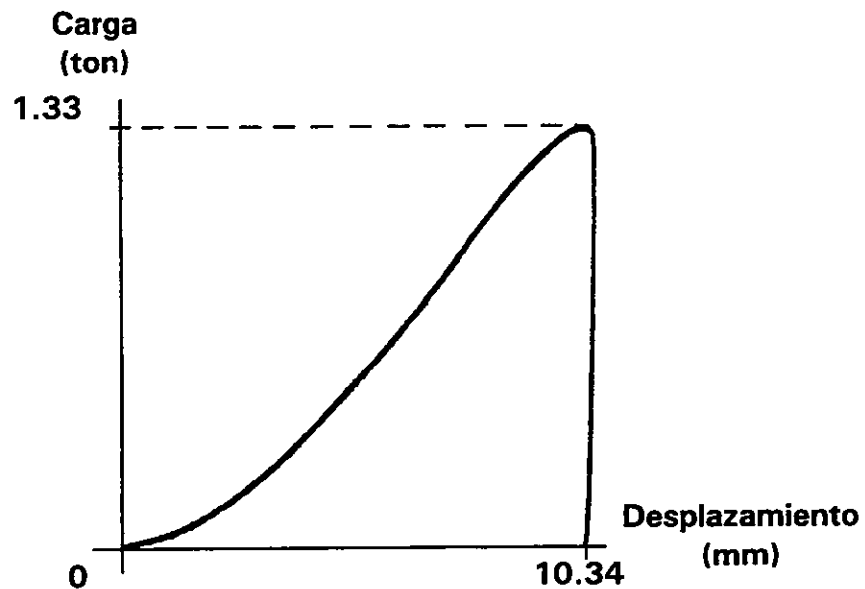
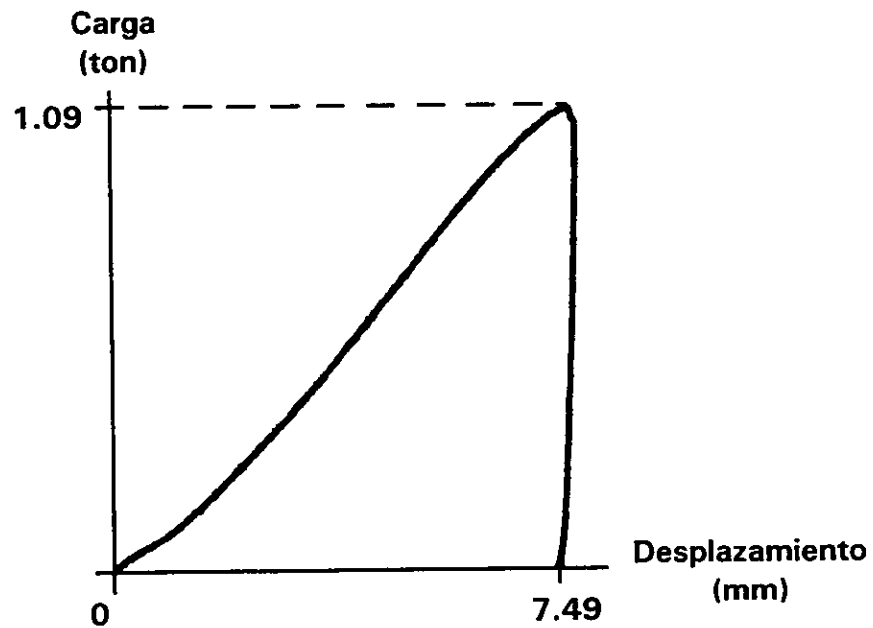


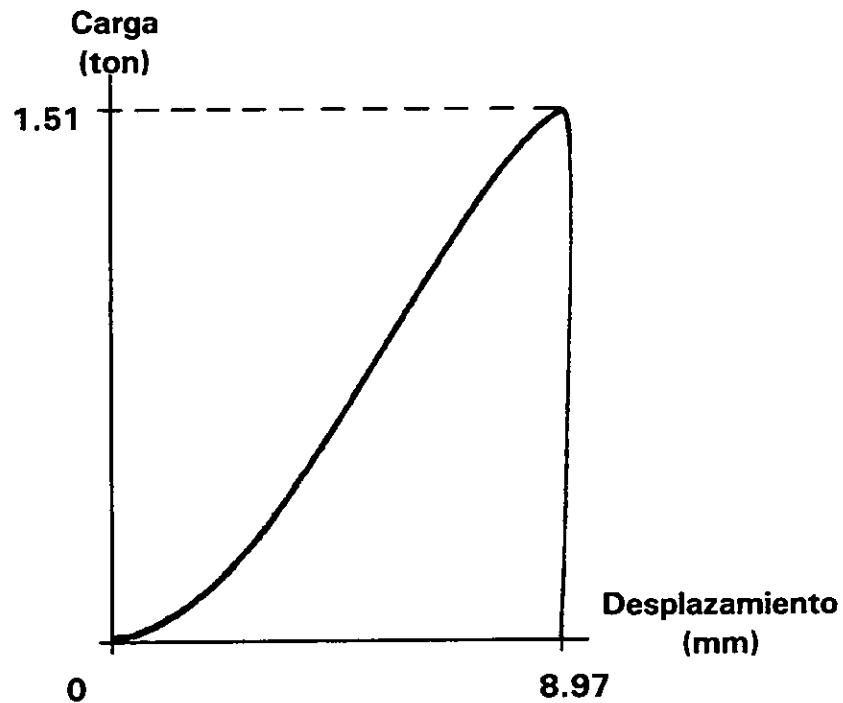
Lámina 2				
Probeta	Datos de la gráfica		Cálculos a partir de la gráfica	
	Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx. (cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
2.1	6	6.2	7.62	1.10
2.2	5.9	6.2	7.49	1.10
2.3	5.6	6.2	7.11	1.10
2.4	5.8	6.2	7.37	1.10
2.5	6.1	6.1	7.75	1.08
2.6	6	6.1	7.62	1.08
		<b>Promedio</b>	<b>7.49</b>	<b>1.09</b>
	<b>Desviación estándar</b>		<b>0.228</b>	<b>0.010</b>

Gráfica más representativa, ensayo Erichsen, lámina 2



<b>Lámina 3</b>				
Probeta	Datos de la gráfica		Cálculos a partir de la gráfica	
	Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx. (cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
3.1	7.3	8.8	9.27	1.56
3.2	6.6	8	8.38	1.42
3.3	7.1	8.7	9.02	1.54
3.4	7.2	8.8	9.14	1.56
3.5	7.3	8.7	9.27	1.54
3.6	6.9	8.2	8.76	1.45
		<b>Promedio</b>	<b>8.97</b>	<b>1.51</b>
	<b>Desviación estándar</b>		<b>0.347</b>	<b>0.060</b>

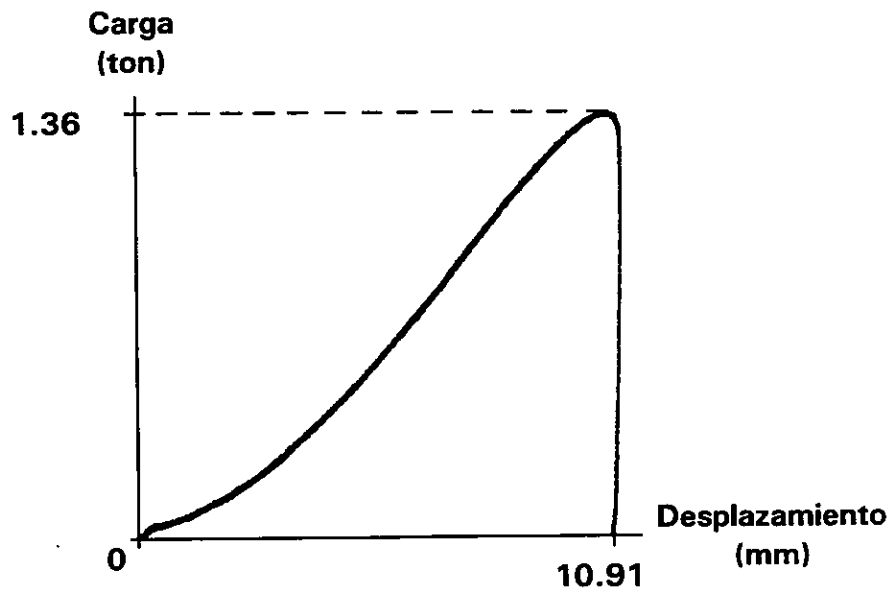
**Gráfica más representativa, ensayo Erichsen, lámina 3**





<b>Lámina 4</b>				
Probeta	Datos de la gráfica		Cálculos a partir de la gráfica	
	Desplazamiento máx. (cm)	Carga máx. (cm)	Profundidad de la copa (mm)	Carga máx. (ton)
4.1	8.3	7.7	10.54	1.36
4.2	8.6	7.75	10.92	1.37
4.3	8.45	7.6	10.73	1.35
4.4	8.5	7.6	10.80	1.35
4.5	8.7	7.6	11.05	1.35
4.6	9.0	7.7	11.43	1.36
		<b>Promedio</b>	<b>10.91</b>	<b>1.36</b>
	<b>Desviación estándar</b>		<b>0.307</b>	<b>0.008</b>

**Gráfica más representativa, ensayo Erichsen, lámina 4**



## 5.2.3 Diagramas de conformabilidad límite (mediciones y gráficas)

Lámina 1																	
Erichsen (sin falla)																	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-10	4	-1	1	2	5	4	11	6	22	8	14	10	22	13	22	15	29
-9	5	-1	9	2	9	4	14	6	24	8	23	10	17	13	25	15	29
-8	1	-1	3	2	13	4	12	6	9	8	22	10	28	13	23	15	23
-8	2	0	10	2	14	4	9	6	10	8	9	10	24	13	26	15	41
-7	0	0	5	3	10	4	14	6	9	8	9	10	13	13	25	15	22
-6	6	0	15	3	8	4	14	6	20	8	16	10	14	13	19	15	32
-6	2	0	11	3	5	4	9	6	16	8	12	10	15	13	19	15	24
-6	1	0	15	3	5	4	7	6	16	8	12	11	29	14	25	15	27
-5	4	0	5	3	9	5	15	7	18	8	17	11	20	14	24	15	22
-5	0	0	10	3	11	5	13	7	10	8	16	11	22	14	19	15	30
-5	4	0	11	3	14	5	13	7	29	9	20	11	20	14	29	15	34
-5	1	0	5	3	10	5	7	7	25	9	11	11	22	14	28	15	30
-5	5	0	5	3	10	5	12	7	15	9	14	11	34	14	35	15	25
-5	5	0	10	3	10	5	8	7	16	9	19	11	24	14	25	15	20
-5	2	0	4	3	7	5	17	7	10	9	17	11	16	14	20	15	25
-5	10	0	11	3	4	5	20	7	24	9	24	11	12	14	22	15	19
-4	4	0	15	3	9	5	10	7	17	9	11	11	16	14	24	16	20
-4	0	0	3	3	12	5	15	7	16	9	13	11	13	14	37	16	25
-4	5	1	5	3	14	5	14	7	13	9	29	11	20	14	24	16	21
-3	4	1	3	3	4	5	14	7	14	9	26	11	27	14	18	16	24
-3	5	1	15	3	7	5	13	7	14	9	10	11	21	14	34	16	33
-3	9	1	8	3	7	5	10	7	10	9	20	11	18	14	20	16	25
-3	5	1	5	3	11	5	10	7	11	9	18	11	19	14	18	16	32
-3	5	1	5	3	10	5	14	7	9	9	34	11	19	14	44	16	24
-3	7	1	12	4	9	5	9	7	9	9	24	11	26	14	15	16	20
-3	2	1	4	4	7	5	8	7	15	9	20	11	27	14	23	16	32
-2	0	1	7	4	5	5	5	7	12	9	17	12	13	14	21	16	31
-2	0	1	11	4	15	5	9	7	15	10	25	12	34	14	24	16	23
-2	9	1	8	4	15	5	13	7	11	10	24	12	30	14	19	16	22
-2	0	1	4	4	11	5	14	7	19	10	25	12	17	14	26	16	28
-2	0	1	9	4	9	5	5	7	18	10	15	12	19	14	30	16	29
-2	9	1	2	4	18	5	19	7	18	10	15	12	20	14	27	17	30
-2	7	1	3	4	19	5	8	7	15	10	30	12	18	14	23	17	25
-2	0	1	6	4	8	5	9	8	12	10	25	12	19	14	26	17	24
-2	6	2	7	4	11	5	10	8	24	10	19	12	25	14	31	17	25
-2	10	2	20	4	14	5	10	8	29	10	24	13	25	14	20	17	34
-1	0	2	9	4	13	5	17	8	19	10	16	13	20	14	29	17	29
-1	6	2	5	4	11	6	9	8	14	10	14	13	22	14	18	17	30
-1	5	2	8	4	9	6	19	8	14	10	19	13	22	14	18	17	28
-1	7	2	10	4	11	6	7	8	10	10	20	13	24	15	15	17	33
-1	10	2	11	4	11	6	9	8	12	10	18	13	15	15	30	17	28

Lámina 1																	
Erichsen												Tracción					
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
Sin falla	21	31	14	41	16	41	18	59	22	39	Sin falla	-17	56	-14	36		
17	33	21	24	14	42	16	49	18	59	22	46	-23	52	-17	44	-14	39
17	22	21	32	14	42	16	50	19	33	22	51	-21	50	-17	64	-14	35
17	28	21	42	14	44	16	50	19	42	22	51	-21	52	-17	54	-14	49
17	32	21	27	14	45	16	54	19	44	22	59	-21	50	-16	57	-14	53
17	32	21	33	14	45	16	54	19	44	22	61	-20	57	-16	57	-14	50
17	26	21	45	14	46	16	54	19	49	22	62	-20	61	-16	64	-13	49
17	35	22	39	14	50	16	55	19	50	22	64	-20	64	-16	47	-13	35
18	18	22	41	14	52	16	56	19	50	22	65	-19	56	-16	58	-13	44
18	30	24	37	14	55	16	56	19	51	23	43	-19	53	-16	66	-13	43
18	30	24	29	14	56	16	59	19	53	23	53	-19	56	-16	32	-13	40
18	33	26	34	14	61	16	59	19	55	23	60	-19	48	-16	49	-13	30
18	31	26	42	14	63	16	61	19	58	23	61	-19	52	-16	56	-12	55
18	41	Fallados		14	64	16	63	19	58	23	61	-19	56	-16	49	-12	51
18	33	2	40	14	64	16	65	19	59	23	63	-19	56	-16	46	-12	49
18	27	3	33	14	65	17	33	19	62	23	63	-19	52	-16	67	-12	44
18	28	5	54	15	34	17	35	19	62	23	63	-19	53	-15	63	-12	30
18	24	5	59	15	35	17	41	19	62	25	60	-18	67	-15	52	-12	51
19	37	8	55	15	39	17	43	19	65	25	63	-18	56	-15	54	-12	52
19	30	9	51	15	41	17	46	19	75	25	64	-18	57	-15	46	-11	59
19	35	10	28	15	43	17	53	20	36	25	66	-18	60	-15	40	-11	60
19	26	10	30	15	44	17	53	20	41	26	49	-18	55	-15	55	-11	54
19	38	10	35	15	46	17	54	20	44	26	62	-18	61	-15	41	-11	50
19	37	10	44	15	50	17	56	20	44	28	60	-18	56	-15	52	-11	52
19	32	10	45	15	51	17	56	20	46	29	43	-18	51	-15	74	-11	49
19	22	10	46	15	54	17	57	20	46	29	66	-18	48	-15	59	-11	54
19	32	10	46	15	54	17	58	20	52			-18	55	-15	48	-11	50
19	22	10	50	15	54	17	59	20	54			-18	52	-15	51	-11	40
19	39	10	55	15	55	17	62	20	54			-18	46	-15	43	-10	51
19	29	10	55	15	57	17	62	20	58			-17	60	-15	44	-10	44
20	38	10	64	15	60	17	64	20	59			-17	70	-15	44	-10	55
20	30	12	33	15	68	18	45	20	60			-17	65	-14	45	-9	54
20	32	13	32	15	68	18	45	20	65			-17	57	-14	50	-8	41
20	24	13	44	15	70	18	45	20	65			-17	56	-14	56	-6	50
20	31	13	45	16	30	18	46	21	43			-17	54	-14	56	-5	41
20	42	13	49	16	30	18	47	21	50			-17	52	-14	53	Fallados	
20	43	13	60	16	30	18	49	21	50			-17	53	-14	42	-26	97
20	35	13	75	16	31	18	50	21	53			-17	50	-14	50	-25	98
20	39	14	29	16	34	18	53	21	59			-17	53	-14	74	-25	105
20	42	14	33	16	38	18	58	21	59			-17	55	-14	58	-24	103
21	25	14	34	16	38	18	58	21	59			-17	52	-14	43	-23	70

Lámina 1				Lámina 2															
Tracción				Erichsen												Tracción			
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
Fallados	-16	85		Sin falla	5	10	10	12	16	22	16	42		Sin falla	-4	50			
-23	103	-16	100	-7	8	5	10	10	10	16	19	16	49	-3	30	-3	43		
-23	86	-15	100	-4	0	5	15	10	11	16	23	17	44	-3	7	-3	22		
-22	101	-15	105	-3	0	5	12	11	19	16	19	18	45	-1	14	-3	50		
-22	103	-15	97	-2	0	5	10	11	17	17	20	18	50	-1	15	-3	40		
-22	75	-15	71	-1	2	5	10	11	14	17	17	18	51	-1	12	-2	34		
-22	91	-15	87	0	2	5	7	11	15	17	28	19	21	-1	8	-2	69		
-21	105	-15	90	0	2	5	11	11	20	17	23	19	28	0	0	-2	58		
-21	104	-15	88	0	0	5	8	12	19	17	20	19	40	1	6	-2	49		
-21	86	-14	101	0	4	5	7	12	14	17	27	19	48	1	5	-1	68		
-21	104	-14	101	0	9	6	10	12	16	18	31	20	48	2	19	-1	54		
-21	105	-14	88	0	2	6	8	12	16	19	32	20	49	2	14	-1	46		
-21	102	-14	80	1	2	6	8	12	12	19	25	21	36	2	21	0	57		
-21	95	-14	51	1	3	6	15	12	25	19	42	21	40	2	22	0	29		
-21	99	-12	98	1	2	6	7	12	13	20	26	21	45	2	7	0	42		
-20	105	-12	93	1	8	6	6	13	22	20	20	21	52	3	15	0	34		
-20	73	-12	71	1	6	7	17	13	16	20	24	22	38	3	24	1	48		
-20	73	-9	98	2	5	7	8	13	14	21	26	22	40	3	24	1	55		
-20	95	-6	85	2	3	7	12	13	26	21	25	22	41	3	10	2	30		
-20	71			2	6	7	8	13	16	22	24	22	44	3	13	3	40		
-20	104			2	16	7	12	13	15	22	31	22	44	3	11	4	22		
-20	80			2	6	8	10	14	22	22	31	22	49	4	14	4	48		
-20	65			3	6	8	13	14	24	22	25	22	58	4	15	4	50		
-19	74			4	6	8	13	14	31	22	32	24	55	4	6	5	45		
-19	100			4	7	8	13	14	19	22	35	25	28	5	21	5	53		
-19	99			4	5	8	20	14	26	23	24	25	40	5	14	6	20		
-18	65			4	5	8	9	14	14	24	27	26	47	5	10				
-18	75			4	7	8	23	14	16	24	30	26	48	5	12				
-18	79			4	8	8	13	14	14	25	35	26	55	5	9				
-17	104			4	8	8	9	15	18	Fallados	40	51	5	14					
-17	87			4	14	8	9	15	23	11	45			6	20				
-17	88			4	10	8	15	15	17	11	49			7	15				
-17	80			4	9	8	12	15	24	12	30			8	15				
-17	64			4	11	9	12	15	18	13	26			10	19				
-17	88			4	4	9	10	15	19	13	36			Fallados					
-16	56			5	5	9	17	15	19	14	46			-8	26				
-16	81			5	5	9	12	15	30	14	49			-7	54				
-16	85			5	8	10	15	15	22	14	50			-5	55				
-16	58			5	5	10	15	16	26	15	43			-5	51				
-16	86			5	5	10	23	16	23	15	47			-5	35				
-16	65			5	10	10	15	16	19	16	36			-5	52				

Lámina 3														Lámina 4			
Erichsen												Tracción		Erichsen			
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1		
<b>Sin Falla</b>												<b>Sin falla</b>		<b>Sin falla</b>			
0	5	9	12	14	20	17	32	17	46	23	42	-15	57	-16	90	-1	5
1	6	9	28	14	36	18	23	17	46	23	44	-13	60	-15	81	-1	12
2	4	9	32	14	26	18	31	17	48	23	56	-12	55	-15	85	-1	11
3	5	9	21	14	18	18	18	17	51	23	69	-11	65	-13	74	0	1
4	15	9	15	14	16	18	19	18	39	24	49	-11	45	-13	89	0	11
4	11	9	14	14	19	18	20	18	43	24	56	-10	57	-12	85	0	8
5	13	10	15	14	17	18	23	18	46	24	65	-10	56	-12	81	0	7
5	6	10	15	14	21	18	26	18	47	25	55	-10	59	-12	74	1	11
5	8	10	13	15	30	19	35	18	48	25	59	-10	40	-11	70	1	19
5	6	10	12	15	17	19	28	18	48	26	50	-10	62	-11	69	2	10
5	5	10	15	15	19	19	19	18	50	26	54	-9	40	-11	85	2	13
5	6	10	16	15	19	19	34	18	56	27	45	-9	50	-11	86	2	9
5	5	10	14	15	23	19	19	18	57	27	60	-9	42	-11	68	2	15
6	17	11	13	15	22	19	30	18	65	28	46	-9	64	-10	70	2	12
6	10	11	21	15	15	19	21	18	65	28	63	-8	41	-10	75	3	5
6	21	11	23	15	17	19	35	19	39	29	44	-8	50	-10	80	3	4
6	6	11	15	15	32	19	29	19	39			-8	47	-10	80	3	12
6	6	11	22	15	15	20	30	19	40			-8	45	-10	96	3	8
6	9	11	18	15	34	20	20	19	41			-7	44	-9	68	3	24
6	8	11	16	15	18	21	33	19	44			-6	50	-9	78	3	11
6	7	11	14	15	18	21	34	19	44			-6	52	-8	70	4	5
6	12	11	11	15	30	21	37	19	45			-6	56	-8	72	4	5
6	12	12	12	15	26	22	36	19	45			-6	43	-8	70	4	15
7	16	12	21	16	33	22	36	19	52			-5	33	-8	91	4	18
7	11	12	22	16	25	23	28	19	56			-5	40	-8	60	4	15
7	15	12	12	16	19	24	36	19	56			-5	40	-7	68	4	7
7	9	13	23	16	26	<b>Fallados</b>		19	57			-4	36	-6	57	4	18
7	26	13	19	16	18	4	42	19	57			-4	42	-6	71	4	27
7	8	13	19	16	20	9	50	20	41			-4	36	-5	58	4	10
7	7	13	18	16	21	14	46	20	48			-4	38	-5	75	4	8
7	10	13	26	16	21	14	54	20	51			-3	43	-5	60	5	5
8	15	13	19	16	19	14	57	20	54			-3	41	-5	72	5	10
8	15	13	26	16	30	15	34	20	55			-3	32	-4	73	5	15
8	17	13	19	17	24	15	40	20	55			-3	35	-4	58	5	12
8	30	13	18	17	30	15	43	20	60			-2	30			5	14
8	9	14	24	17	29	15	59	21	55			-1	34			5	15
8	9	14	16	17	31	16	45	21	56			-1	35			5	20
8	10	14	35	17	26	16	58	21	57			<b>Fallados</b>				5	14
9	12	14	22	17	26	17	36	22	43			-22	92			5	21
9	13	14	14	17	37	17	43	22	62			-22	93			6	13

Lámina 4																	
Erichsen												Tracción					
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
Sin falla		9	19	15	29	19	21	16	69	20	68	-24	60	-16	44	-25	105
6	16	9	15	15	21	19	19	17	44	20	73	-24	54	-16	48	-25	72
6	15	9	12	15	27	19	27	17	51	21	46	-24	74	-16	56	-25	101
6	11	9	24	15	24	19	32	17	52	21	49	-24	64	-16	46	-25	92
6	20	9	13	15	25	19	35	17	53	21	50	-23	61	-15	43	-25	95
6	10	10	15	15	31	19	29	17	54	21	57	-22	62	-15	44	-25	64
6	14	10	12	15	39	19	48	18	45	21	59	-22	65	-15	49	-25	104
6	21	10	29	15	20	19	35	18	47	21	64	-22	53	-15	46	-25	105
7	9	10	20	15	44	19	27	18	54	21	65	-22	58	-14	42	-25	77
7	10	10	24	15	35	19	29	18	55	21	65	-22	77	-14	42	-25	79
7	19	10	29	15	27	19	34	18	57	21	66	-22	79	Fallados		-25	85
7	15	10	31	15	33	19	27	18	65	21	67	-22	75	-38	75	-25	105
7	16	11	16	16	26	19	25	18	67	21	69	-21	89	-36	105	-24	83
7	15	11	15	16	31	20	41	18	67	21	75	-21	84	-36	86	-24	83
7	21	11	25	16	39	20	36	19	45	22	53	-21	65	-30	105	-24	88
7	19	11	21	16	35	20	21	19	49	22	63	-21	51	-30	105	-24	70
7	10	11	15	16	25	21	32	19	52	22	71	-21	53	-30	99	-24	54
7	21	11	19	16	21	22	47	19	56	23	59	-21	59	-30	105	-24	80
7	14	11	29	16	37	22	41	19	56	23	64	-21	56	-30	101	-23	99
7	14	11	16	16	30	22	25	19	59	23	65	-21	74	-30	99	-23	104
8	13	11	19	16	39	23	29	19	60	23	69	-21	78	-29	105	-23	73
8	12	11	28	17	45	Fallados		19	62	23	71	-20	50	-29	102	-23	104
8	11	12	17	17	32	6	58	19	62	24	53	-20	51	-29	105	-23	85
8	10	12	21	17	39	9	40	19	62	24	60	-19	52	-29	55	-22	75
8	14	12	24	17	25	10	77	19	63	24	68	-19	46	-29	105	-22	79
8	12	12	20	17	20	11	46	19	64	25	65	-19	49	-28	100	-22	96
8	20	12	19	17	37	12	50	19	65	28	57	-19	36	-27	88	-22	95
8	18	12	36	17	23	14	41	19	65	Tracción		-19	64	-27	105	-22	98
8	21	12	29	18	26	14	42	19	65	sin falla		-19	55	-27	89	-22	76
8	10	13	15	18	25	14	45	19	66	-32	20	-19	66	-26	104	-22	94
8	15	13	31	18	29	14	49	19	70	-31	69	-19	59	-26	96	-21	69
8	14	13	31	18	34	14	50	20	47	-26	75	-19	54	-26	71	-21	70
8	15	13	32	18	32	15	38	20	51	-25	64	-19	51	-26	105	-21	69
8	20	14	37	18	29	15	42	20	55	-25	64	-19	58	-26	90		
9	10	14	22	18	34	15	43	20	58	-25	74	-18	38	-26	105		
9	13	14	25	18	25	15	52	20	63	-25	55	-18	63	-26	95		
9	18	14	38	18	38	15	58	20	65	-25	75	-18	52	-26	58		
9	15	14	25	18	36	15	64	20	65	-25	74	-18	48	-26	105		
9	15	14	31	18	36	16	54	20	66	-25	56	-17	42	-26	105		
9	18	15	42	18	25	16	56	20	66	-25	86	-17	45	-26	90		
9	16	15	36	19	31	16	59	20	66	-24	67	-16	40	-26	99		

Diagrama de conformabilidad límite, lámina 1

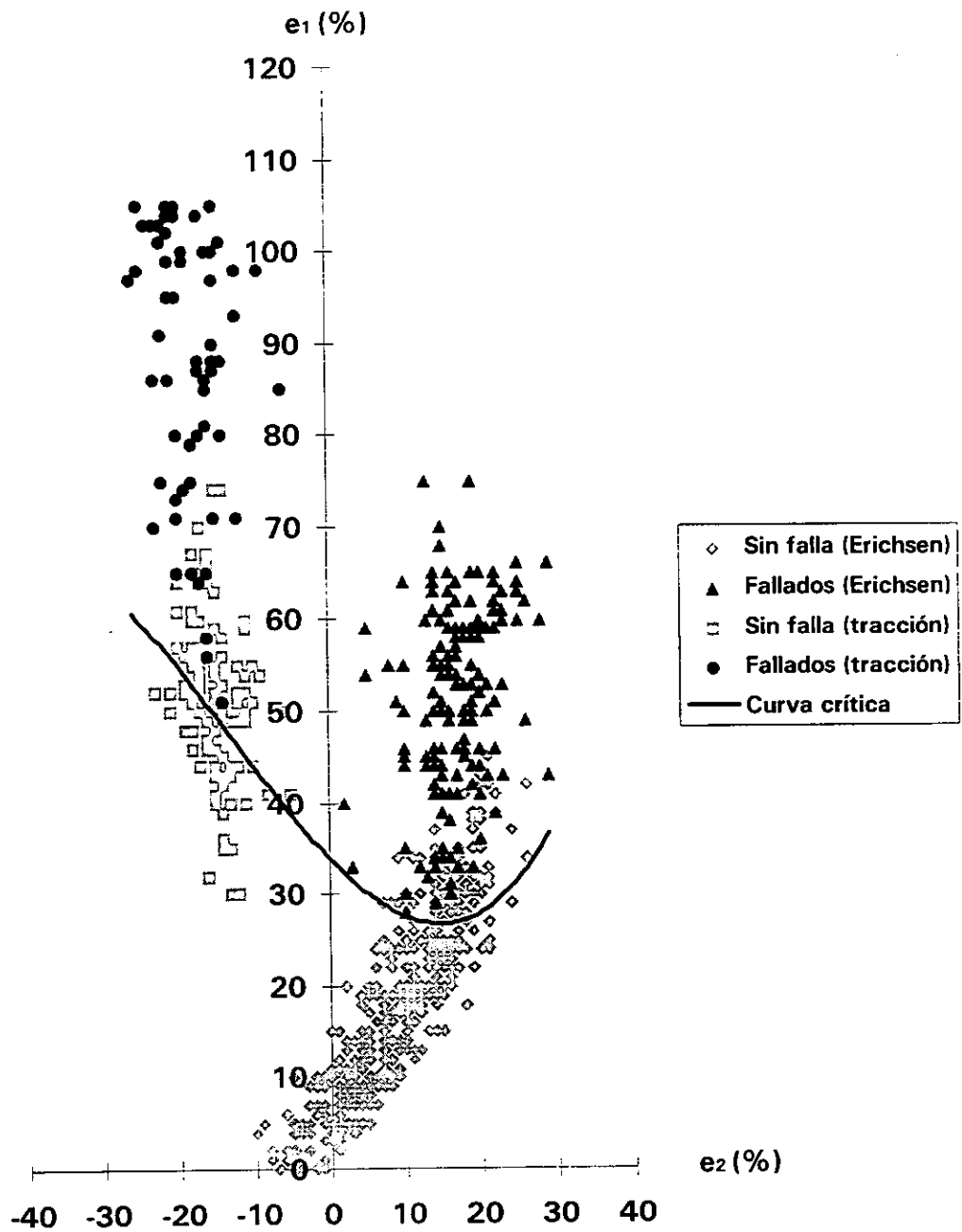


Diagrama de conformabilidad límite, lámina 2

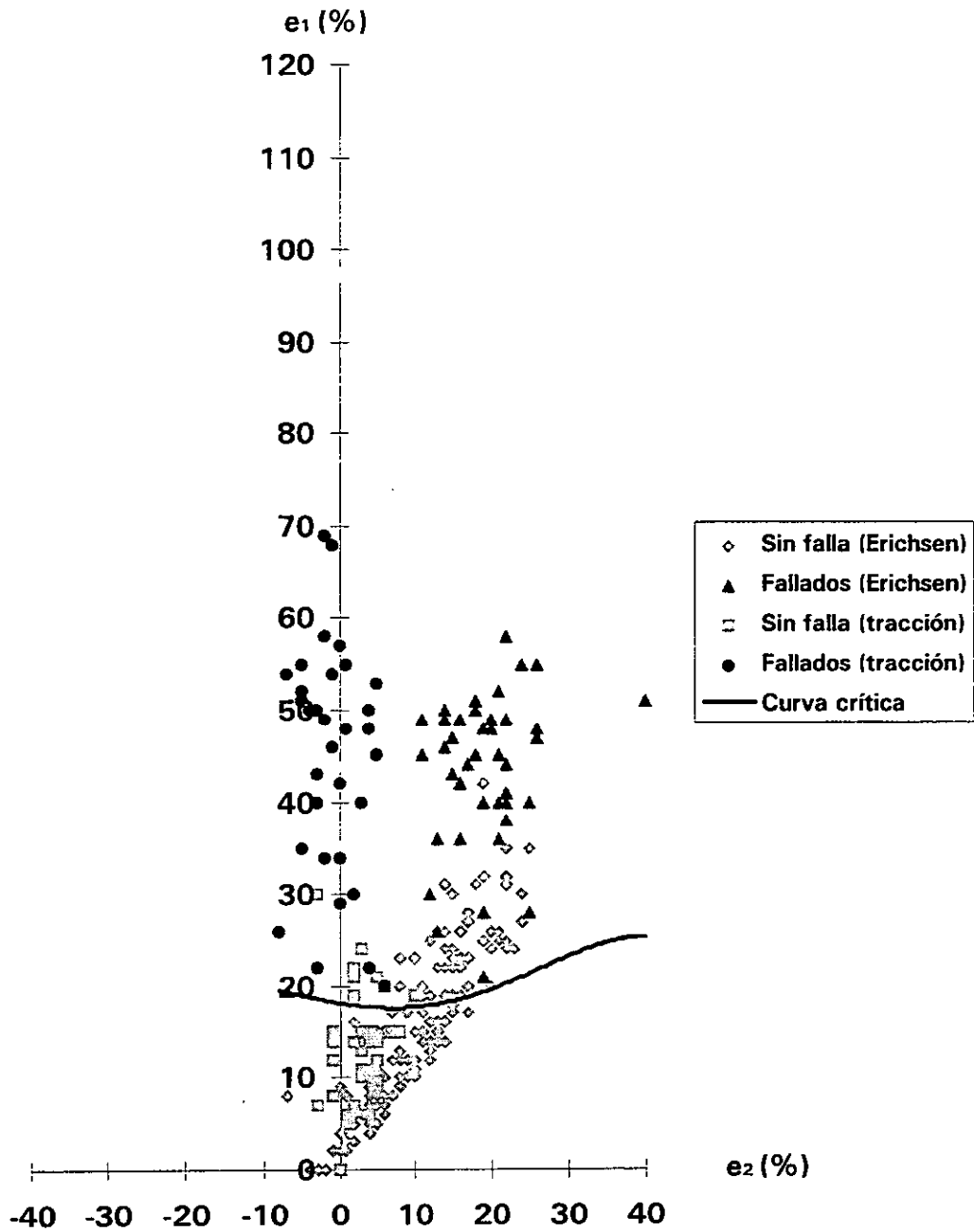




Diagrama de conformabilidad límite, lámina 3

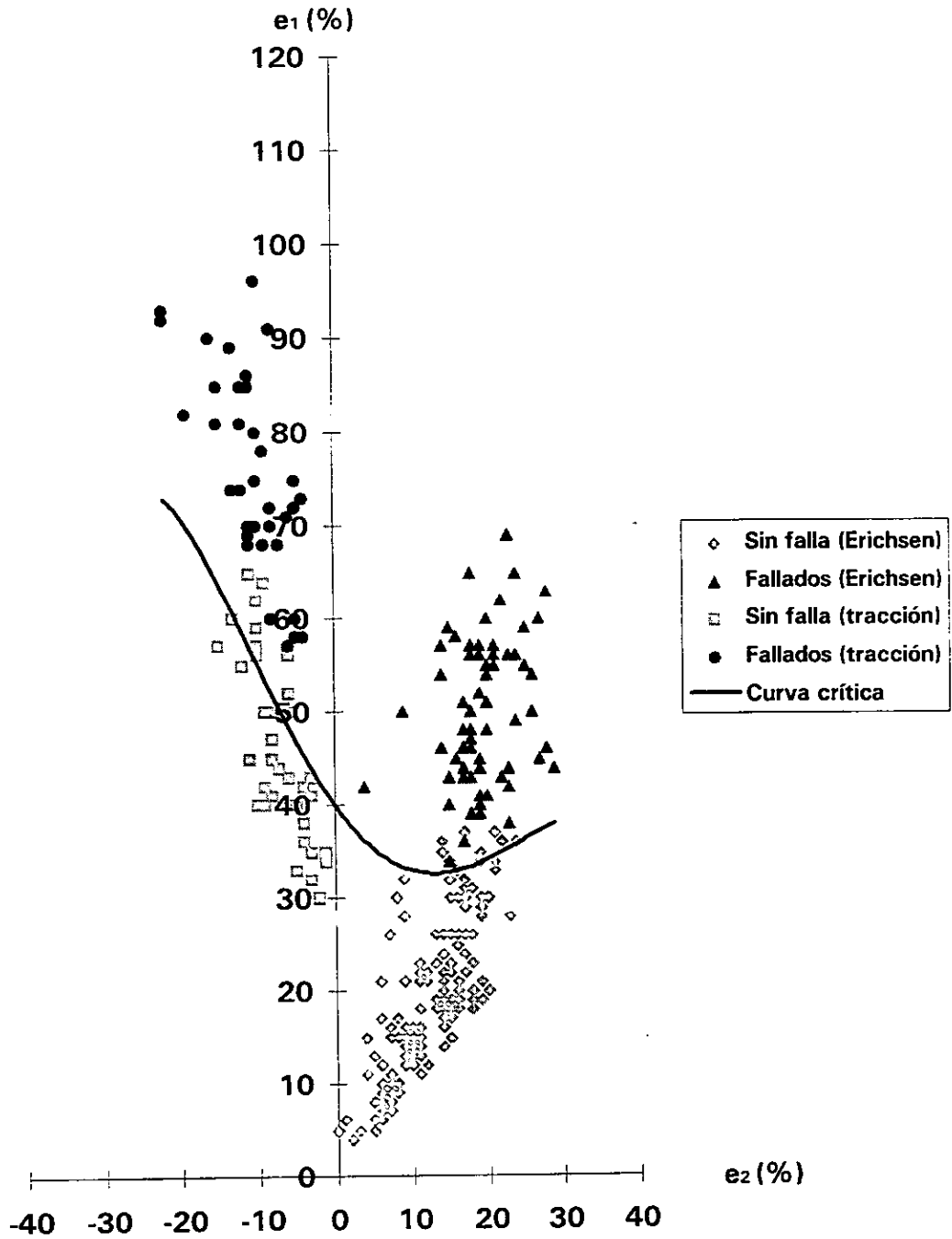
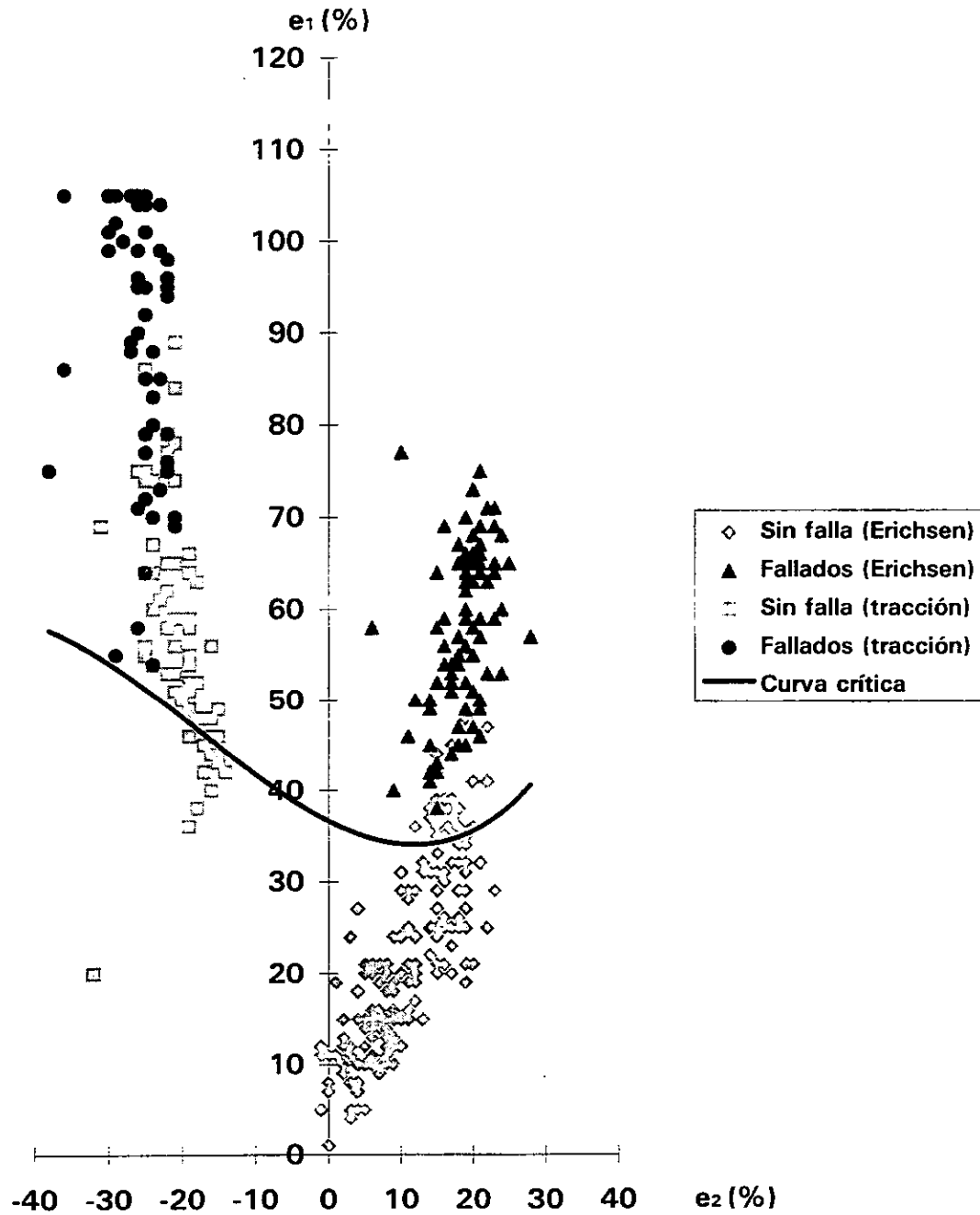


Diagrama de conformabilidad límite, lámina 4



### 5.3 Análisis de resultados

Para este análisis utilizaremos los datos de la sección 5.2 y tablas comparativas de resultados.

En 5.2.1 (reportes de los ensayos de tracción), se pueden observar las propiedades mecánicas de las láminas estudiadas.

La deformación promedio de cada lámina, obtenida de los promedios de las deformaciones máximas a tracción en las direcciones longitudinal, a 45 grados y transversal, se muestra en la siguiente tabla:

Nombre	Deformación promedio a tracción
Lámina 1	31.90 %
Lámina 2	6.142 %
Lámina 3	20.60 %
Lámina 4	33.60%

Tabla 5.2. Tabla comparativa de la deformación en los ensayos de tracción.

Los resultados de la anisotropía (ver 5.2.1.1) comprueban que el estado metalúrgico de las láminas 1 y 3 es de recocido (por lo que sus propiedades son similares en cualquier dirección), ya que según la ref. 7.6 valores de " $r_m$ " de 0.8 a 1.0 son característicos de aceros laminados en

caliente, de 1.0 a 1.4 de aceros laminados en frío y de 1.4 a 2.0 de aceros pasivados con aluminio trabajados en frío. Los valores de anisotropía planar ( $\Delta r$ ) indican que la lámina 1 es mejor que la 3 para conformarse, porque es menor la tendencia a formar "orejas" en el borde de la lámina (si  $\Delta r$  es cercano a cero no se formarán, ref. 7.6).

La tabla siguiente (5.3) contiene los valores promedio de la profundidad de la copa Erichsen, para cada lámina, calculados a partir de seis probetas (ver sección 5.2.2).

Nombre	Profundidad de la copa Erichsen
Lámina 1	10.34 mm
Lámina 2	7.49 mm
Lámina 3	8.97 mm
Lámina 4	10.91 mm

Tabla 5.3. Tabla comparativa de la profundidad de la copa Erichsen.

Esta tabla muestra que la lámina con mayor capacidad de deformación es la 4, seguida de la 1; luego la 3, y la menos deformable es la 2. El parámetro comparativo es la profundidad de la copa Erichsen. (Para la lámina 1, la profundidad de la copa fue mayor que para la 2; no obstante ser del mismo material, porque esta última tiene una cantidad considerable de trabajo mecánico previo).

Las tablas de la sección 5.2.3 contienen las mediciones realizadas de estados de deformación en las probetas Erichsen y en las de tracción, distinguiendo los puntos fallados de los sin falla.

Los puntos se graficaron, en un diagrama de estados de deformación, para obtener la conformabilidad límite de cada lámina.

El procedimiento utilizado -y que se propone en este trabajo- para ubicar la curva límite es el siguiente:

Hacer una regresión estadística con los puntos de menor ordenada ( $e_2$  mínima) para cada conjunto de estados de deformación fallados de igual abscisa ( $e_1$ ). Luego, desplazar la curva resultado de la regresión, disminuyendo únicamente sus ordenadas en múltiplos de cinco por ciento, hasta que todos los puntos fallados se encuentren por encima de la curva desplazada.

Las cuatro tablas siguientes contienen los estados de deformación que se utilizaron para obtener las regresiones estadísticas, el porcentaje en que se disminuyeron las ordenadas y las ecuaciones de las curvas críticas o límite resultantes.

Lámina 1																	
Estados de deformación para la obtención de la regresión estadística																	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-26	97	-21	86	-16	56	-9	98	5	54	12	33	16	30	20	36	25	60
-25	98	-20	65	-15	71	-6	85	8	55	13	32	17	33	21	43	26	49
-24	103	-19	64	-14	51	2	40	9	51	14	29	18	45	22	39	28	60
-23	70	-18	65	-12	71	3	33	10	30	15	35	19	33	23	43	29	43
-22	75	-17	64														
Disminución de las ordenadas para obtener la curva crítica: 30%																	
Ecuación (curva crítica): $y = 5 \times 10^{-4} x^3 + 0.0189 x^2 - 0.8743 x + 33.918$																	

Lámina 2																	
Estados de deformación para la obtención de la regresión estadística																	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-8	26	-3	22	1	48	5	45	12	30	15	43	18	45	21	36	25	28
-7	54	-2	34	2	30	6	20	13	26	16	36	19	21	22	38	26	47
-5	35	-1	46	3	40	11	45	14	46	17	44	20	48	24	55	40	51
-4	50	0	34	4	22												
Disminución de las ordenadas para obtener la curva crítica: 50%																	
Ecuación (curva crítica): $y = -9 \times 10^{-6} x^4 + 4 \times 10^{-4} x^3 + 7.1 \times 10^{-3} x^2 - 0.1456 x + 18.138$																	

Lámina 3																	
Estados de deformación para la obtención de la regresión estadística																	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-22	92	-13	74	-9	68	-5	58	14	46	17	36	20	41	24	49	27	45
-19	82	-12	74	-8	60	-4	58	15	34	18	39	22	43	25	55	28	46
-16	90	-11	68	-7	68	4	42	16	47	19	39	23	38	26	50	29	44
-15	81	-10	70	-6	57	9	50										
Disminución de las ordenadas para obtener la curva crítica: 20%																	
Ecuación (curva crítica): $y = 2 \times 10^{-7} x^5 - 3 \times 10^{-5} x^4 + 6 \times 10^{-4} x^3 + 0.0435 x^2 - 1.1721 x + 40.112$																	

Lámina 4																	
Estados de deformación para la obtención de la regresión estadística																	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-38	75	-28	100	-24	54	6	58	11	46	15	38	18	45	21	46	24	53
-36	86	-27	88	-23	73	9	40	12	50	16	54	19	45	22	53	25	65
-30	99	-26	58	-22	75	10	77	14	41	17	44	20	47	23	59	28	57
-29	55	-25	64	-21	69												
Disminución de las ordenadas para obtener la curva crítica: 30%																	
Ecuación (curva crítica) $y = 2 \times 10^{-4} x^3 + 0.013 x^2 - 0.4134 x + 36.662$																	

El procedimiento seguido -y propuesto- para definir la curva crítica, en los diagramas de conformabilidad límite, tiene las siguientes ventajas:

Es sencillo y práctico; evita recurrir a apreciaciones subjetivas o arbitrarias (como, por ejemplo, trazar la curva "a ojo"); para aplicarlo sistemáticamente no se requiere experiencia previa (sólo cuidado), y, sobre todo, mediante la regresión, refleja la respuesta de la lámina (en los intervalos en que hay estados de deformación obtenidos experimentalmente) permitiendo, además, obtener una ecuación para la curva crítica.

Los criterios que comprende el procedimiento son:

La curva de la regresión se desplaza gradualmente hacia abajo en magnitudes relativas o porcentuales, hasta que comprenda o envuelva todos los puntos de falla (criterio explícito).

Entre las posibles curvas de regresión, se escoge la que con la menor cantidad de puntos de inflexión -polinomio de menor grado- tenga la forma más adecuada para que, al desplazarla y convertirse en crítica, los puntos fallados queden por encima (criterio implícito).

La tabla 5.4 muestra las áreas bajo la curva límite, en cada uno de los diagramas de conformabilidad. Son el resultado de integrar las ecuaciones de la curva límite de cada lámina, en su intervalo correspondiente, y restarle el área bajo la recta  $e_1 = e_2$  en dicho intervalo (por definición en esta área no pueden existir estados de deformación).

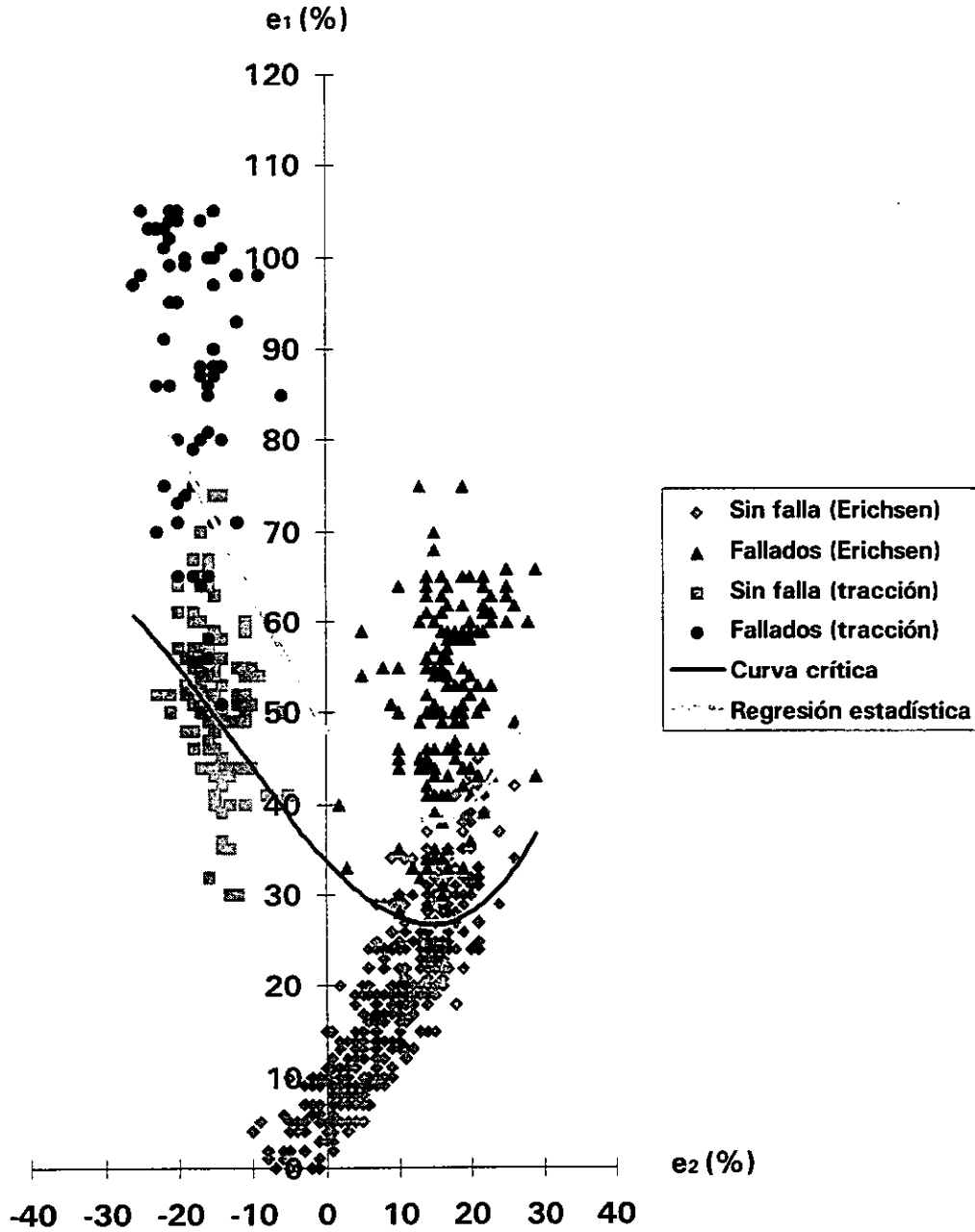
Nombre	Área bajo la curva límite	Intervalo ( $e_2$ )
Lámina 1	1669	-26 a + 29
Lámina 2	313	-8 a + 20
Lámina 3	1857	-22 a + 29
Lámina 4	2423	-38 a + 28

Tabla 5.4. Tabla comparativa del área bajo la curva límite de los DCL.

Las cuatro gráficas siguientes ilustran la aplicación del procedimiento propuesto. La quinta, es el diagrama comparativo de la conformabilidad límite de las cuatro láminas estudiadas.



Diagrama de conformabilidad límite, lámina 1  
(regresión estadística y curva crítica)



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Diagrama de conformabilidad límite, lámina 2  
(regresión estadística y curva crítica)

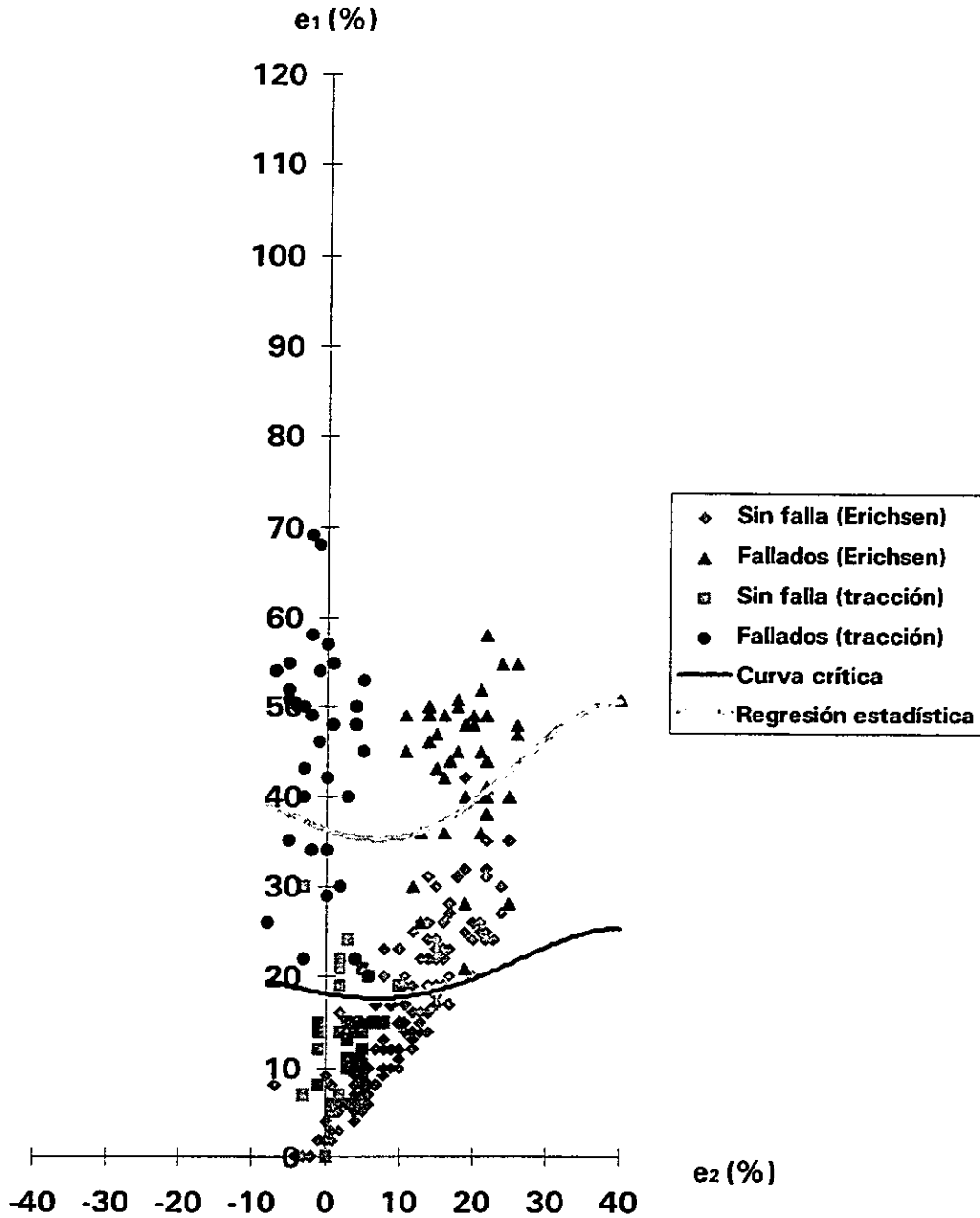


Diagrama de conformabilidad límite, lámina 3  
(regresión estadística y curva crítica)

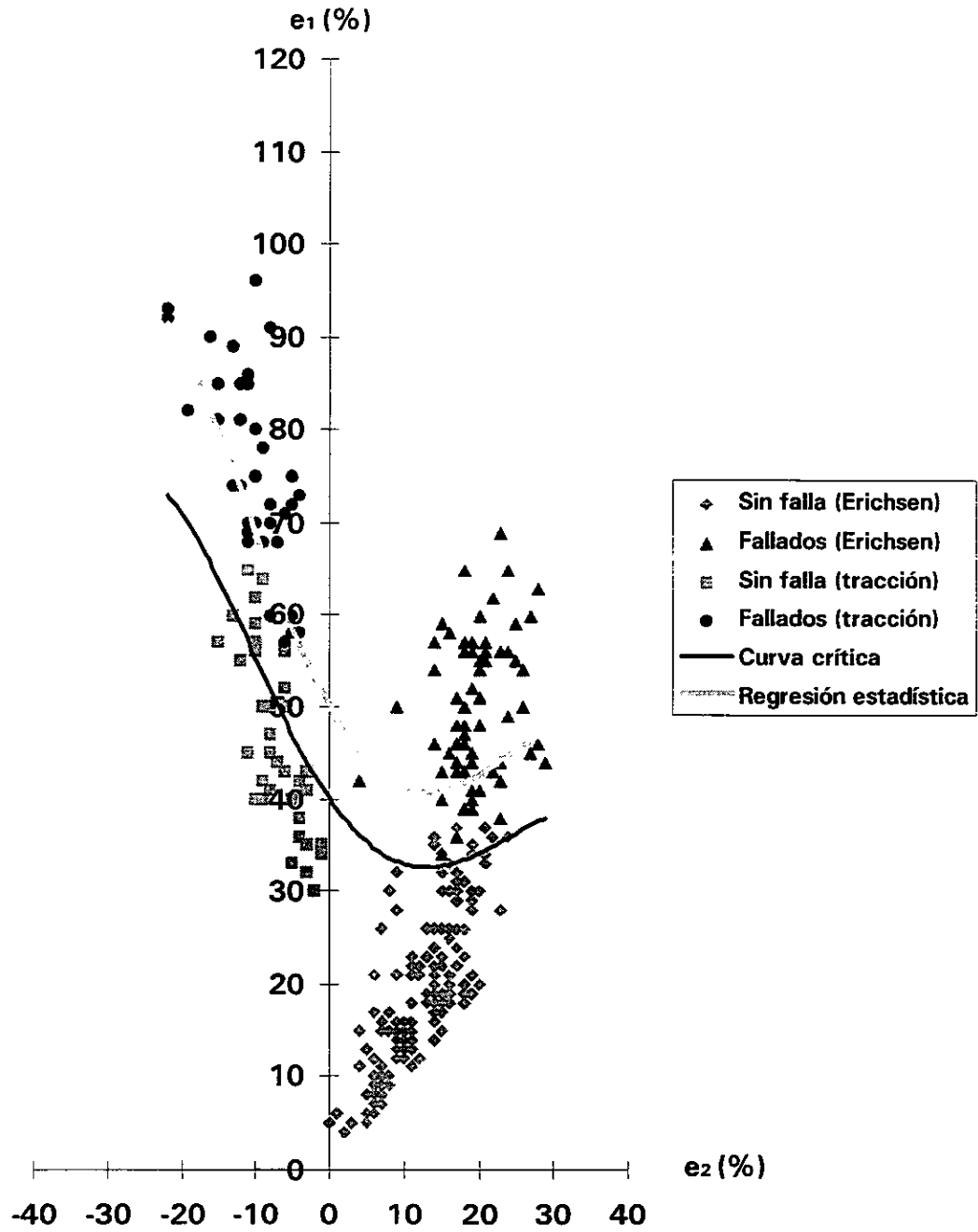


Diagrama de conformabilidad límite, lámina 4  
(regresión estadística y curva crítica)

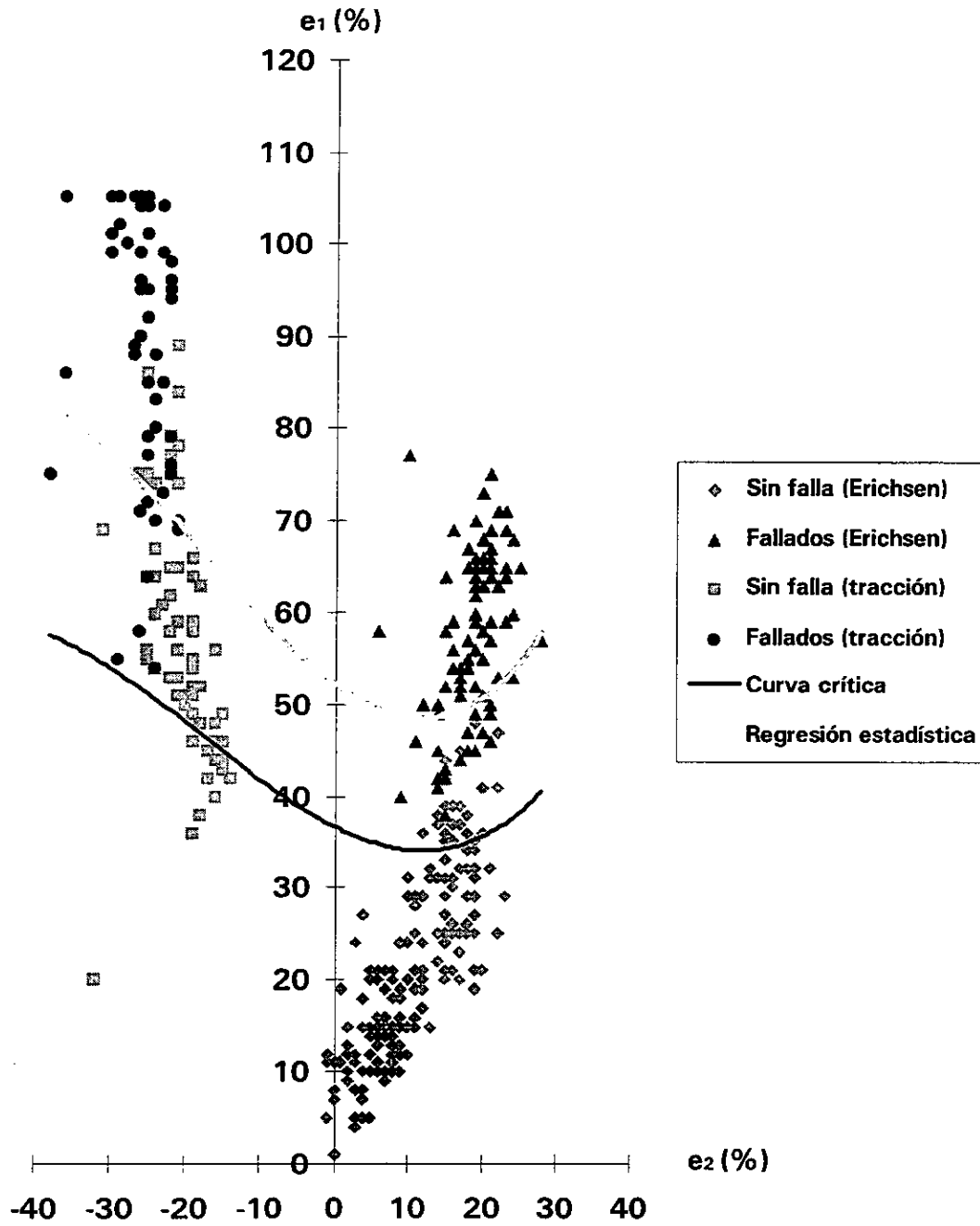
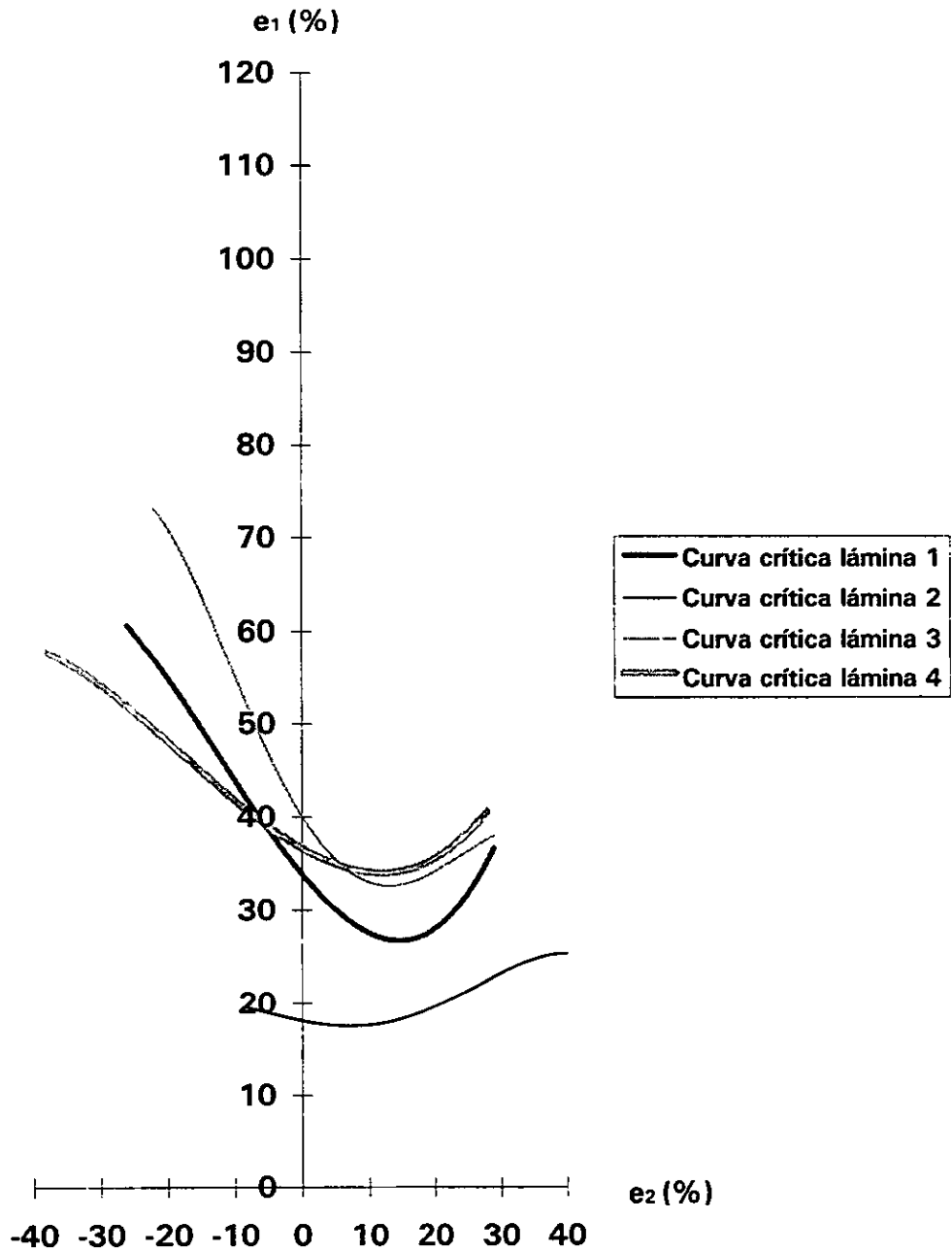


Diagrama de conformabilidad límite, comparativo



Cabe mencionar que, comparando los resultados de los tres parámetros utilizados (la deformación máxima promedio en el ensayo de tracción, la profundidad de la copa Erichsen y el área bajo la curva límite de los DCL), resulta, como es lógico, que las tres láminas en estado de recocido son más deformables que la trabajada en frío. Además, se confirma que la lámina menos apta para usarse en procesos de conformado es la 2. Ver tablas 5.2, 5.3 y 5.4.

El área bajo la curva límite permite evaluar, con mayor utilidad práctica, la conformabilidad de láminas. Es el parámetro para hacer consideraciones, cuantitativas y cualitativas, referentes a los distintos estados de deformación (embutido, tracción, estirado) a que puede ser sometido el material durante la manufactura de productos específicos. Supera las limitaciones de los otros parámetros ligados, más bien, a la respuesta del material llevado a estados de máxima deformación (que, siendo indeseables, deben evitarse en el diseño y fabricación de partes).

Así, en una consideración general, es válido afirmar que la lámina 4 supera a las otras en conformabilidad ya que el área bajo la curva y la amplitud del intervalo son mayores (ver tabla 5.4). Es decir, que la cantidad de posibles estados de deformación o pares de valores ( $e_1$ ,  $e_2$ ) es

mayor. Sin embargo, y por ejemplo, se puede afirmar, en lo particular: que tratándose de estados de deformación producto de tracción (zona a la izquierda del eje vertical, en el diagrama comparativo) la lámina 3 superaría a las otras en su capacidad para soportar, sin falla, deformaciones relativas o porcentuales ( $e_1$ ) mayores, y que, análogamente, en la zona de estados de deformación producidos por estiramiento biaxial (a la derecha del eje vertical) la lámina 1 tendría menor capacidad que la 4 y la 3.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos al desarrollar este trabajo se concluye lo siguiente:

1. De acuerdo al objetivo, se logró evaluar la conformabilidad de productos planos (láminas) nacionales y para uso automotriz utilizando, además de los ensayos habituales (tracción y Erichsen) y sacándoles mayor provecho (probetas con mallado), un método sencillo y rápido.
  
2. Ese método básico -y que se propone en este trabajo- para evaluar la conformabilidad de láminas es el del diagrama de conformabilidad límite (que define y muestra gráficamente los estados de deformación que no producen falla, separándolos de los que la producen). El procedimiento y los criterios descritos en este trabajo para obtener la curva crítica y su ecuación, se definieron a partir de la propia experimentación realizada (ya que en la literatura accesible no se especificaba el método a seguir; sino sólo ejemplos de DCL de algunos materiales y sus aplicaciones).



3. El procedimiento propuesto para ubicar la curva límite en el DCL es útil, sencillo y objetivo; pero si se realizan más pruebas (con otras láminas y materiales) y se relacionan con resultados de aplicaciones reales en la industria, se puede enriquecer y perfeccionar.

Para finalizar este trabajo, se incluyen algunas observaciones y recomendaciones:

Al determinar el DCL de un material, se puede prevenir que falle cuando sea estampado para manufacturar una pieza en particular. Así, se reducen las pérdidas por defectos o fracturas durante la producción. Además, ayuda a evitar que se tomen decisiones subjetivas durante las pruebas de estampado con los datos provisionales. Las láminas de prueba se marcan con el mallado circular, se estampan y se ubican en el DCL los estados de deformación resultantes. De esta manera, se pueden hacer, oportunamente, ajustes o modificaciones.

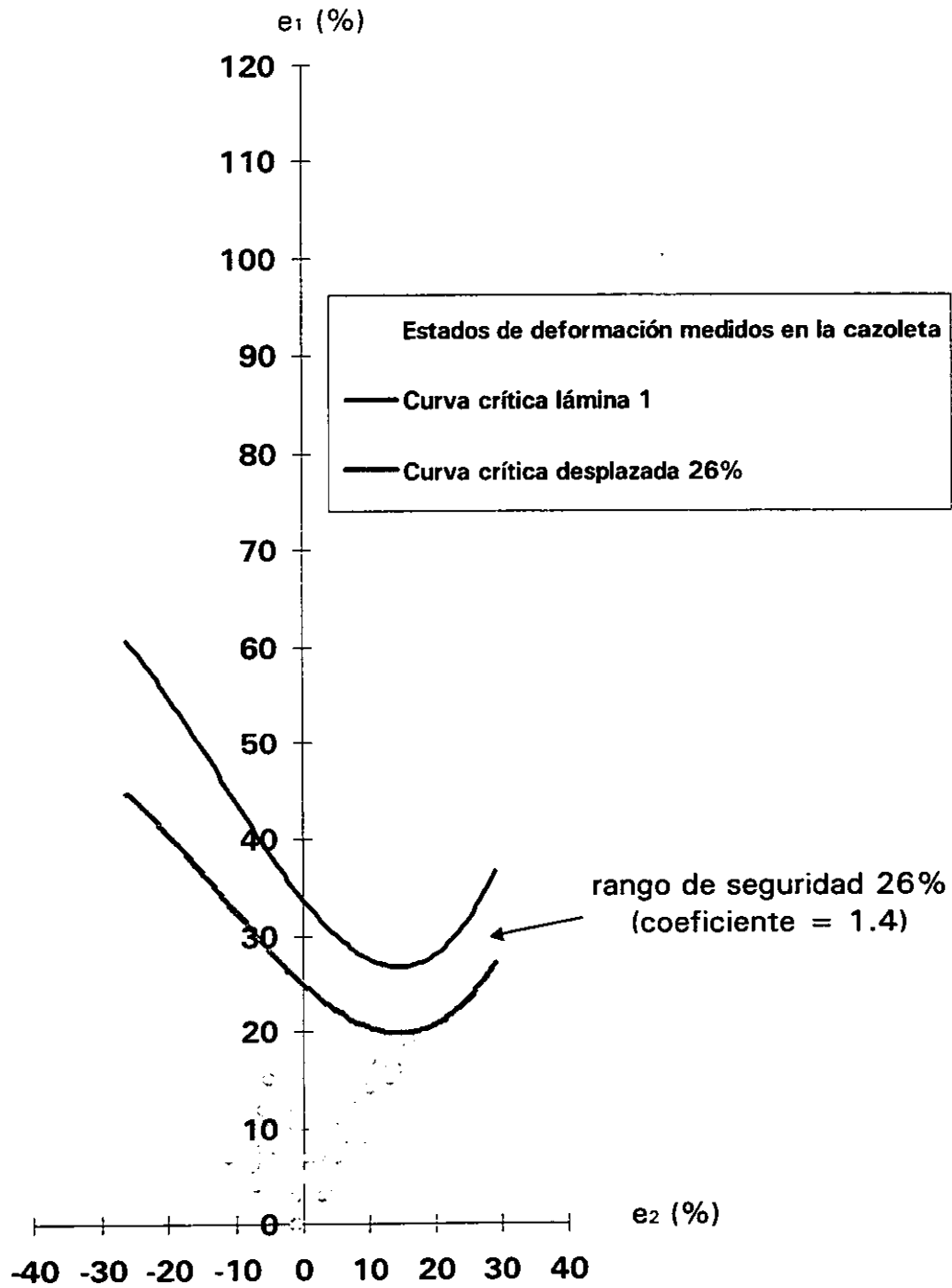
Una parte, manufacturada mediante estampado, presenta un patrón definido de estados de deformación reales en el DCL de la lámina correspondiente. Esto permite evaluar el rango o los coeficientes de seguridad implícitos en su proceso de producción.

Por ejemplo, simulamos lo anterior al "manufacturar", en un trozo de lámina del tipo 1, al que se le grabó el mismo patrón de mallado, una cazoleta en forma de cucharilla (utilizando el instrumental del ensayo Erichsen y el de la prueba de tracción). El resultado se muestra en la gráfica siguiente, realizada con la curva crítica obtenida de dicha lámina y los puntos correspondientes a los estados de deformación medidos en la cazoleta (tabla 6.1).

Cazoleta elaborada con lámina 1																	
Estados de deformación																	
e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1	e2	e1
-11	7	-4	7	-1	5	2	5	4	9	5	5	6	8	7	7	10	14
-7	5	-4	6	-1	3	3	9	4	6	5	7	6	8	8	13	10	17
-7	4	-3	9	-1	5	3	3	4	6	5	9	6	8	8	8	10	12
-6	12	-2	12	-1	0	3	5	4	4	5	10	6	10	8	10	13	16
-6	8	-2	6	-1	6	3	5	4	7	5	5	7	9	9	9	13	15
-6	6	-2	9	0	5	3	6	4	5	5	8	7	11	9	9	13	15
-5	15	-2	6	1	7	3	5	4	10	5	5	7	10	9	10	14	16
-5	11	-1	11	2	5	3	5	4	11	5	7	7	9	9	10	15	19
-5	15	-1	10	2	10	3	9	4	9	5	8	7	11	10	10	16	19
-5	7																

Tabla 6.1. Estados de deformación medidos en la cazoleta.

**Ejemplo**  
**Estados de deformación medidos en la cazoleta**  
**elaborada con lámina 1**



El DCL puede utilizarse como un elemento más para control de calidad tanto de la materia prima como de la producción de partes: realizando monitoreos a los lotes de materia prima (elaborando su DCL) y revisando, periódicamente, si el estampado sigue produciendo los mismos estados de deformación (los dados, por el uso, se desalinean y desgastan alterando el estampado).

La realización de este trabajo, con el muy valioso apoyo del Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Facultad, permite proponer ideas para darle continuidad:

- Adquirir o elaborar el herramental necesario para realizar estudios que incluyan ensayos de embutido y permitan diversificar los de estirado (tipo Erichsen), con otros tipos de punzón y dado (por ejemplo, con el de punzón semiesférico).
- Obtener diagramas de conformabilidad límite comparativos, donde se distingan las variaciones de las curvas críticas al cambiar, por ejemplo: patrones de mallado, lubricación, estados metalúrgicos, velocidades de prueba, acabados y rugosidades y, así, poder hacer recomendaciones útiles y establecer estándares o criterios.

- Trabajar en colaboración con industrias que se dediquen al conformado de lámina, para aplicar, en manufacturas reales, los resultados obtenidos en el Laboratorio.

## CAPÍTULO 7

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 7.1 Dieter, George. *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw-Hill, Singapur, 1988, 751 pp.
- 7.2 Beer, Ferdinand; Johnston, Russell. *Mecánica de Materiales*. Mc Graw-Hill, Colombia, 1993, 2a Ed., 738 pp.
- 7.3 Askeland, Donald. *La Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Mc Graw-Hill, México, 1985, 556 pp.
- 7.4 Schärer, Ulrich, et al. *Ingeniería de Manufactura*. Edit. CECSA, México, 1984, 735 pp.
- 7.5 Mikell, Groover. *Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, procesos y sistemas*. Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1997, 1062 pp.

7.6 S. L. Semiatin, et al. *Metals Handbook, Vol 14, Forming and Forging.*

Edit. ASM International, USA, 1988, 9a Ed., 978 p.

7.7 Kurt, Lange. *Handbook of Metal Forming.* Mc Graw-Hill,

USA, 1985.

7.8 Keeler, St. P. *Determination of Forming Limits in Automotive*

*Stamping.* "Sheet Met. Ind.", 46, 1969, p. 683-691.

7.9 Keeler, St. P. *Circular Grid System -A Valuable Aid for Evaluating*

*Sheet-Metal Formability-*. "Sheet Met. Ind.", 45, 1968, p. 633-641.