



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN DE CHAPA DE  
ACERO DE USO AUTOMOTRÍZ

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ÁREA MECÁNICA)

P R E S E N T A:

ARTURO CERVANTES CABELLO



DIRECTOR DE TESIS  
M. en I. ARMANDO ORTIZ PRADO

Cd. Universitaria

julio, 2000.

280760



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## AGRADECIMIENTOS:

Con gran respecto y admiración al director del presente trabajo.

M.I. Armando Ortiz Prado

Por su apoyo comprensión y ayuda incondicional, ya que con su valiosa colaboración, consejos y enseñanzas fué posible concluir exitosamente este trabajo.

---

Al Jefe de la Sección de Mécanica, de la División de Estudios de Posgrado.

DR. Vicente Borja Ramirez

Por su apoyo y confianza para concluir exitosamente esta etapa de estudios.

---

A mis padres: Remedios y Jesús.

Quienes en todo momento me han brindado su apoyo y cariño haciendo posible mi formación profesional.

A mis hermanos: José G., Ana María, María Elena, Teodora, J. Javier, J. Carlos, Oscar, y Patricia, por haberme brindado su apoyo, comprensión, confianza y paciencia para lograr esta meta. A tí .

Arturo Cervantes Cabello.

## INDICE

	página
Indice	I.
Prólogo	II.
Capítulo 1. Métodos de caracterización de chapa delgada de acero para embutido profundo:	1.
1.1 Ensayos de tracción.	2.
1.2 Otros datos del ensayo de tracción	4.
1.3 Ensayos de embutido	7.
Capítulo 2. Métodos de análisis de deformaciones:	10.
2.1 Análisis por malla de círculos	10.
2.2 Diagrama límite de formado	12.
2.3 Análisis de deformación de espesores	16.
2.4 Análisis propuesto para calcular deformaciones	19.
Capítulo 3. Experimentación:	22.
3.1 Selección de materiales y probetas	22.
3.2 Análisis químico	23.
3.3 Rugosidad	24.
3.4 Grabado de malla de círculos	26.
3.5 Ensayo de tracción	28.
3.6 Índice de anisotropía	30.
3.7 Ensayo de embutido	31.
3.8 Diagramas de límite de formado	34.
Capítulo 4. Resultados y conclusiones:	35.
4.1 Selección de materiales y probetas	35.
4.2 Análisis químico	36.
4.3 Rugosidad	38.
4.4 Grabado de malla de círculos	40.
4.5 Ensayo de tracción e índice de anisotropía	41.
4.6 Ensayo de embutido	46.
4.7 Ensayo de embutido propuesto	51.
4.8 Conclusión.	53.
Referencias.	56.
Apéndice	58.

## PRÓLOGO.

Al parecer la chapa delgada de acero (lámina) es un material barato y fácil de producir, de modo que se podría pensar que no existe razón alguna para llevar a cabo investigación científica sobre este tipo de material.

Sin embargo, la chapa delgada de acero de finales de los años noventas, es un producto que se considera a nivel internacional muy importante y su producción se realiza con maquinaria, equipo y procesos de alta tecnología; es un material de gran demanda, siendo el principal consumidor de este producto la industria automotriz, la cual impone las más altas exigencias a éste material. La industria automotriz tiene la imperiosa necesidad de reducir el peso bruto de los vehículos, con el objetivo de reducir el consumo de combustible, sin reducir la rigidez de las carrocerías y la seguridad integral de los ocupantes de los vehículos en situaciones de colisión.

Para cumplir con estos objetivos, la industria manufacturera de automóviles, ha trabajado muy de cerca con la industria acerera, obteniendo resultados parciales hasta el momento, ya que, para poder reducir el peso se debe disminuir el espesor de la chapa y mejorar su resistencia mecánica, pero al aumentar ésta última, tenemos como consecuencia reducción en la ductilidad y la deformabilidad de la chapa. Lo que provoca problemas importantes durante el proceso de embutido de las partes, que componen la carrocería de los automóviles, ocasionando grandes inversiones de dinero, tiempo y recursos humanos; para el desarrollo, investigación y ajuste de las herramientas de estampado de la industria automotriz.

Es por esto que a nivel internacional la chapa de acero es considerada un material de alto nivel tecnológico. En numerosos laboratorios industriales y/o universitarios se llevan a cabo investigaciones científicas, de modo que varios investigadores profundizan en el estudio teórico práctico de este material. A nivel nacional no se realizan estudios profundos, o publicaciones comparables a los de los países de alto desarrollo siderúrgico como, Japón, Europa, Canadá y Estados Unidos. La consecuencia es que la chapa de acero para embutido profundo que se consume en las estampadoras automotrices nacionales, se compra en su totalidad de los países antes mencionados.

En la búsqueda de técnicas simples, rápidas y económicas, se ha tratado de encontrar correlaciones entre los procesos industriales de estampado de lámina y las pruebas o ensayos de laboratorio. Sin embargo las correlaciones encontradas no son satisfactorias, ya que los ensayos de laboratorio sólo evalúan la capacidad de deformación de la lámina, en estirado, doblado, o embutido, de manera independiente, por lo que no pueden simular procesos complejos de deformación.

El objetivo de este trabajo es correlacionar los datos de las pruebas y ensayos más comunes de los laboratorios, con los procesos reales de deformación de embutido profundo de la industria automotriz.

Para lograr el objetivo se caracterizaron 4 tipos de lámina de uso en la industria automotriz, provenientes de Japón, Canadá, U.S.A y México. Para conocer más de sus propiedades mecánicas y su comportamiento en los procesos de deformación, se desarrollaron varias pruebas y ensayos. Estos proporcionaron referencias comparativas del rango marginal de las propiedades mecánicas entre la chapa de fabricación nacional y sus similares de procedencia extranjera. Para determinar las causas se realizó una evaluación comparativa de los procesos de fabricación de ambas chapas, determinando que en la fabricación nacional existen algunas áreas susceptibles de mejora para lograr obtener un producto competitivo en los mercados mundiales.

Se describen los ensayos más utilizados en la caracterización de chapa, también se describe la metodología para análisis de deformaciones por medio del mallado circular; y la metodología para obtener los diagramas de límite (DLF) de formado, que nos sirven como referencia para conocer las condiciones críticas de deformación que debemos evitar en los procesos de embutido profundo. Se obtuvieron gráficas de límite de formado de diferentes áreas del ancho de rollo para 3 láminas de procedencia extranjera y una de procedencia nacional. Se resaltan algunos inconvenientes de los ensayos, y se proponen consideraciones para usar los datos obtenidos y los diagramas de límite de formado (DLF). Se propone un ensayo que es una variante del ensayo Olsen-Erichsen de embutido, para tratar de aproximar un poco más la simulación de los ensayos de laboratorio, a los procesos reales de deformación.

## 1. METODOS DE CARACTERIZACION DE CHAPA DELGADA DE ACERO PARA EMBUTIDO PROFUNDO.

La posibilidad de producir una gran variedad de formas a partir de la chapa metálica, con velocidades de fabricación muy grandes, es uno de los mayores avances tecnológicos del siglo XX.

La chapa de acero se conforma por diferentes métodos, dependiendo de la geometría, tamaño, número de piezas a fabricar y características del propio material.

En general, el material obtiene su forma final por los procedimientos de:

- a) corte,
- b) dobléz,
- c) embutido (estampado).

El embutido (estampado) se define como la operación mecánica mediante la cual la chapa metálica se transforma en un cuerpo hueco. La operación se realiza colocando la chapa de acero sobre una matriz de forma deseada, para posteriormente prensar el metal contra la matriz, mediante un punzón (figura 1.1).

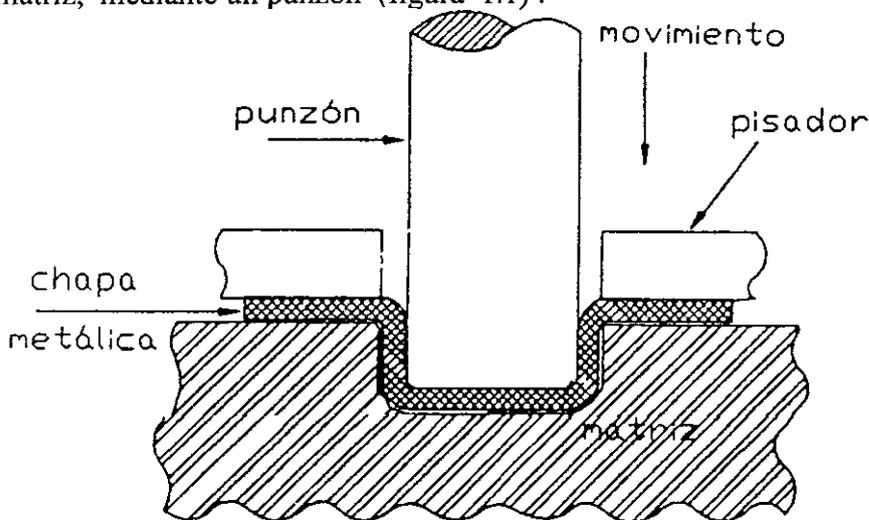


Figura 1.1. Operación de embutido. [Referencia. autor]

La matriz puede tener cualquier forma, desde una simple esfera, hasta las complejas formas de los estampados que componen los automóviles modernos.

Es importante mencionar que el embutido (estampado) puede realizarse en una ó varias etapas denominando a esta última operación, estampado profundo. En este tipo de

estampado la deformación se efectúa por la acción de esfuerzos de tracción en el plano de la hoja, razón por la cual las propiedades de los materiales sometidos a este proceso están regidas por la ductilidad.

Para evaluar la aptitud de los materiales en los procesos de estampado profundo, existen diversos métodos. Sin embargo, la aproximación a la complejidad real de los procesos de estampado varía en forma significativa de unos a otros, en precisión y veracidad, dependiendo de lo complejo de los métodos.

### 1.1 ENSAYO DE TRACCION:

La ductilidad es una de las principales características demandada en los materiales para estampado. Uno de los ensayos que nos permite conocer esta propiedad es el ensayo de tracción. Siendo la zona plástica del diagrama esfuerzo-deformación la fase importante desde el punto de vista de la deformación en los procesos de estampado.

Los ensayos de tracción, para material en chapa, son regidos y normalizados por la norma ASTM E-8, figura 1.2. [Referencia. Norma ASTM, 1992].

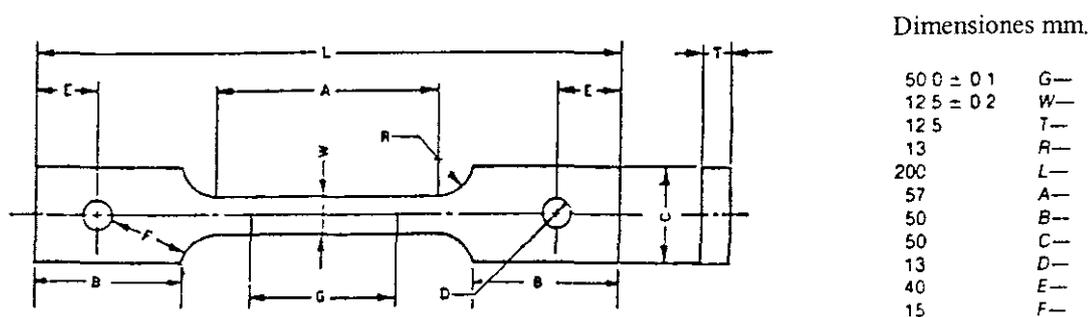


Figura 1.2. Probeta patrón según norma ASTM E-8.

[Referencia. Normas ASTM, 1992].

La ductilidad se puede determinar por dos procedimientos en un ensayo de tracción; el primer procedimiento consiste en determinar el porcentaje de alargamiento o elongación, midiendo la ductilidad en términos de la distancia que se estira el material antes de la ruptura.

El segundo procedimiento consiste en medir el cambio porcentual del área en la sección transversal del punto de fractura antes y después del ensayo. Midiendo la ductilidad en términos de la reducción de área antes de la ruptura.

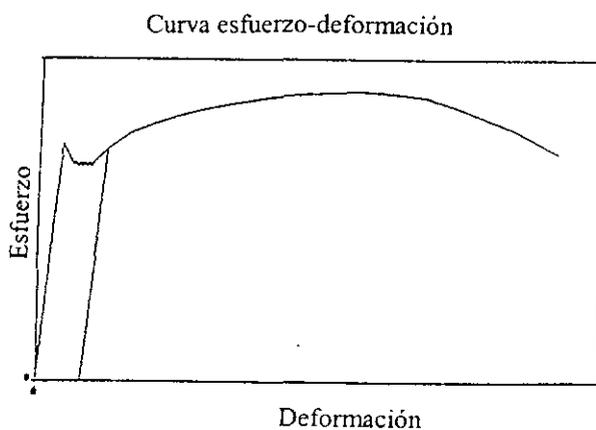
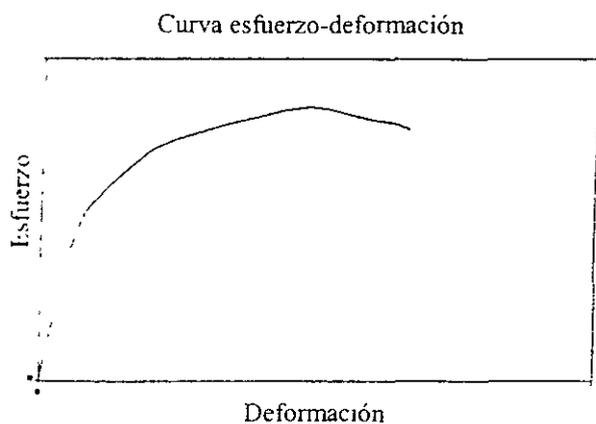
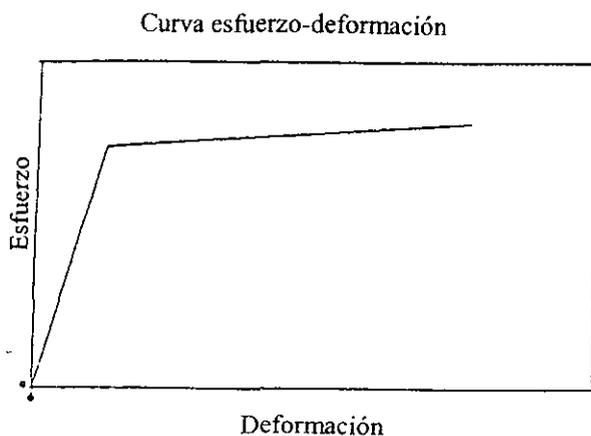
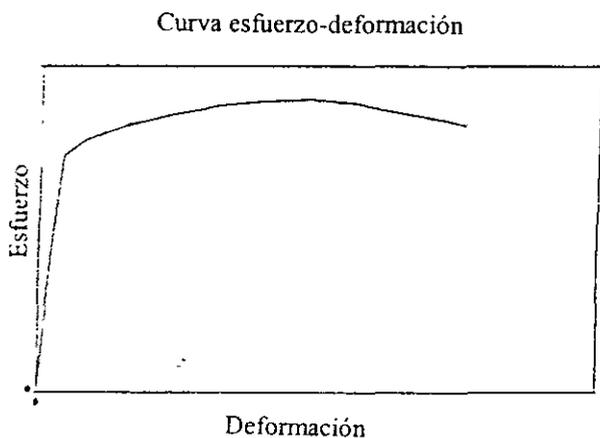


Figura 1.3. Curvas esfuerzo-deformación de ingeniería representativas de materiales elastoplásticos. [Referencia. autor].

Las curvas de deformación verdadera representativas de los comportamientos típicos de los ensayo de tracción se indican a continuación. A la curva de la figura 1.3a corresponde una curva del tipo: [Referencia: 1]

$$\sigma = \sigma_0 (1 + k\varepsilon^n) \quad \text{---1.1}$$

$\sigma$  = esfuerzo de cedencia,     $\sigma_0$  = esfuerzo inicial,     $k$  = módulo elástico,  
 $\varepsilon$  = deformación,     $n$  = índice de endurecimiento

La gráfica y la ecuación son representativas de aceros de alto contenido de carbono que han sido trabajado en frío previamente. La curva esfuerzo deformación real representativa de la figura 1.3b es:

$$\sigma = \sigma_0 (1 + k\varepsilon) \quad \text{---1.2}$$

La gráfica y la ecuación son representativas de un material fuertemente deformado en frío. La curva esfuerzo deformación real representativa de la figura 1.3c es:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad \text{----1.3}$$

Es importante aclarar que el comportamiento parabólico entre los esfuerzos y las deformaciones es particular de la zona plástica. Por último la figura 1.3d. presenta la curva característica de los materiales que tienen un límite de cedencia agudo. Este tipo de comportamiento se presenta en los aceros de bajo contenido de carbono, y en algunos otros materiales como el molibdeno, algunas aleaciones de aluminio y titanio, muestras monocristalinas de cadmio, zinc, aluminio y bronce.

## 1.2 OTROS DATOS DEL ENSAYO DE TRACCION.

Datos menos usuales pero de suma importancia en la caracterización de productos planos, son el coeficiente de endurecimiento, llamado factor “n” y el coeficiente de anisotropía llamado factor “r”.

El índice de endurecimiento, factor “n” mostrado en las ecuaciones 1.1 a 1.3 representa la velocidad con que el material se endurece con la deformación, y corresponde con la posibilidad de que el material se deforme de manera homogénea, es decir, “n” representa la magnitud de la deformación uniforme cuando  $\sigma = k\varepsilon^n$ . El

comportamiento de endurecimiento por deformación esta expresado en la ecuación 1.3, donde:  $\sigma$  es el esfuerzo de cedencia,  $k$  es una constante,  $\epsilon$  es la deformación y “ $n$ ” el índice de endurecimiento por deformación de laminado a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto al eje (figura 1.4) de laminación. El índice medio se calcula como: [Referencia. 1]

$$\bar{n} = \frac{1}{4} (n_{0^\circ} + 2n_{45^\circ} + n_{90^\circ}) \quad \text{-----}(1.4)$$

donde:  $\bar{n}$  = índice de endurecimiento promedio,

$n_{0^\circ}$  = índice de endurecimiento medido a  $0^\circ$ ,

$n_{90^\circ}$  = índice de endurecimiento medido a  $90^\circ$ ,

$n_{45^\circ}$  = índice de endurecimiento medido a  $45^\circ$ .

Por lo anterior, mientras mayor sea el valor de “ $n$ ” mayor será la capacidad del material para ser estampado, sin sufrir fractura. Son deseables altos valores de “ $n$ ” en materiales para estampado profundo.

El valor de “ $n$ ” verdadero corresponde al alargamiento uniforme de la gráfica esfuerzo deformación, siendo éste una indicación de la deformabilidad homogénea del material. Además el valor de “ $n$ ” también proporciona una idea sobre el grado de endurecimiento por trabajo en frío, propiedad importante para la resistencia final del material. La figura 1.4 muestra el comportamiento de “ $n$ ”.

Otra propiedad importante de la chapa de acero laminada en frío es la anisotropía, esta propiedad se debe a la orientación preferencial de los granos. El grado de variación de la ductilidad es función de la dirección específica del ensayo y se mide a través del índice de anisotropía “ $r$ ” también llamado índice de Lankford. [Referencia 1]

Este índice mide la resistencia del material a reducir su espesor. Su expresión matemática es: [Referencia 1]

$$r = \frac{\ln(a_f/a_i)}{\ln(e_f/e_i)} \quad \text{-----}1.5$$

donde:  $a_f$  = ancho final,

$a_i$  = ancho inicial,

$e_f$  = espesor final,

$e_i$  = espesor inicial.

En la práctica resulta difícil medir de manera precisa la variación de espesor, por lo que la ecuación 1.5 se puede expresar en términos de la longitud, considerando que el volumen del material permanece constante. [Referencia. 6]

$$r = \frac{\ln(a_f/a_i)}{\ln(l_i/a_i) / \ln(l_f/a_f)} \quad \text{-----1.6}$$

Donde:  $a_f$  = ancho final,

$a_i$  = ancho inicial,

$l_i$  = longitud inicial,

$l_f$  = longitud final.

El valor del índice de anisotropía “r” es función de la dirección con respecto al eje de (figura 1.4) laminación. Los valores máximos de “r” se encuentran a 0° y a 90° con respecto a la dirección de laminado, esto se debe a la dirección de los cristales. Para obtener el valor “r” Langkford, sugirió la siguiente ecuación: [Referencia.1]

$$\bar{r} = \frac{1}{4} (r_{0^\circ} + r_{90^\circ} + 2r_{45^\circ}) \quad \text{-----1.9}$$

Donde:  $\bar{r}$  = índice de anisotropía media.

$r_{0^\circ}$  = índice de anisotropía medido a 0° con respecto al eje de laminación,

$r_{90^\circ}$  = índice de anisotropía medido a 90° con respecto al eje de laminación,

$r_{45^\circ}$  = índice de anisotropía medido a 45° con respecto al eje de laminación,

De la definición del índice de anisotropía “r”, se desprende la conveniencia de que los materiales utilizados en embutido profundo presenten, valores de “r” mayores a la unidad, para lograr así mayor profundidad de embutido con adelgazamiento mínimo del espesor. Cuando “r” es menor que 1.0 el material no es aplicable para estampado profundo. Por tanto para embutido profundo se prefieren materiales con índices entre 1.5 y 2.2. [Referencia. 13]

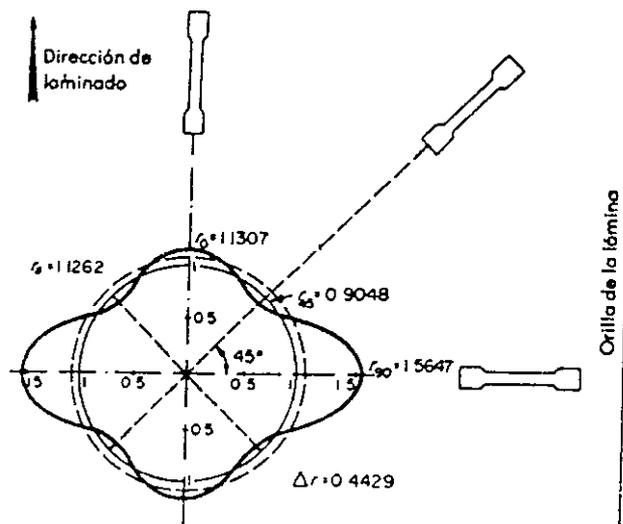


Figura 1.4. Variación típica del índice de anisotropía planar “r”. [Referencia: 13 ].

### 1.3 ENSAYOS DE EMBUTIDO.

El desarrollo de pruebas y ensayos es una herramienta importante para entender la compleja interacción de la chapa de acero, herramientas de estampado (dados), lubricación, temperatura, acabado superficial de las herramientas de estampado, rugosidad de la chapa de acero, etc, en los procesos de estampado.

Entre los ensayos más comunes que se han estandarizado por razones prácticas tenemos: I.- Ensayo de estirado:

Este ensayo es el más ampliamente usado para medir la conformabilidad de los materiales, y consiste en sujetar el espécimen de chapa de acero, entre pisadores de metal, mientras una bola de 22.2 mm de diámetro penetra la chapa de acero para formar una copa, (figura 1.7). La deformación continua hasta que el material presenta un adelgazamiento (cuello) o fractura.

La profundidad de la copa corresponde a la carga máxima soportada y se toma como medida de deformabilidad. Este tipo de ensayos es llamado Olsen (en Europa, Erichsen). Estos ensayos son descritos por la norma ASTM E643. [Referencia 14].

Los ensayos Olsen y Erichsen como indicadores de la capacidad de estirado, se deberían correlacionar satisfactoriamente con el valor "n"; pero no es así; esta deficiencia se atribuye al pequeño tamaño del punzón y a variaciones en la lubricación.

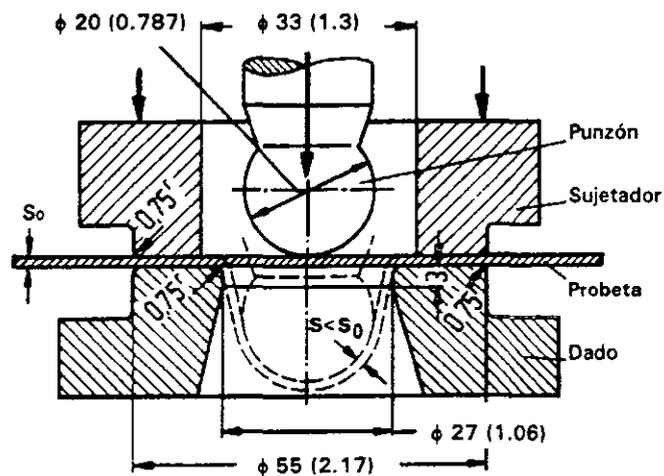


Figura 1.5. Herramental para ensayo Olsen (Erichsen). [Referencia. 14].

Una comparación de resultados de diferentes laboratorios, realizada por "The American Deep Drawing Research Group, Olsen cup test-evaluation", mostró variaciones de (+/- 12 %). Las principales razones de las variaciones son, el tamaño del punzón no representativo, inconsistente lubricación y la falla humana debida al paralaje durante las mediciones y detección del inicio de fractura. En resumen, el grupo definió que este ensayo no simula el complejo estado de esfuerzos que se presenta en los procesos de estampado. [Referencia. 4].

## II.-) Ensayo de embutido:

El ensayo más común es el Swift, en el cual, se prueban piezas circulares de diferentes diámetros, deformandolas en forma de copa, por medio de un punzón cilíndrico, hasta encontrar el máximo diámetro embutible, como se muestra en la figura 1.8.

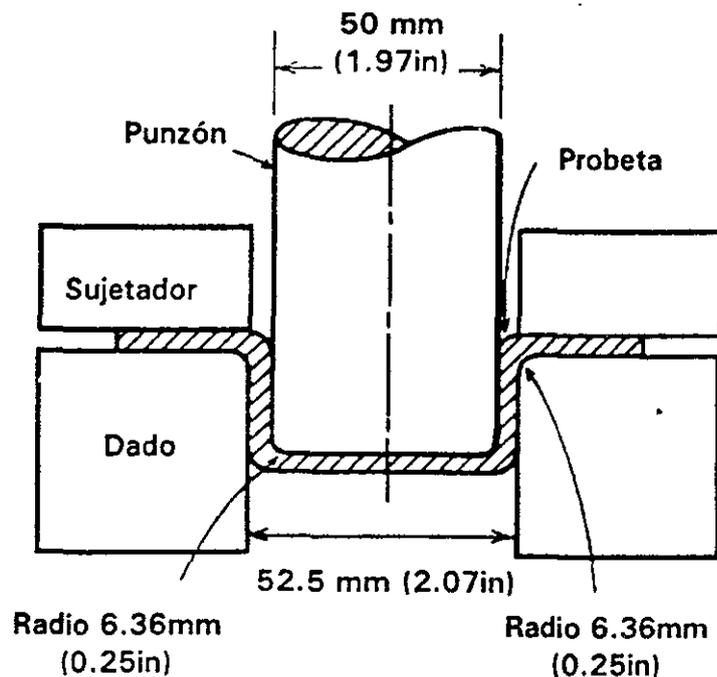


Figura 1.6. Herramental para ensayo Swift.

[Referencia. 7].

La capacidad de embutido se expresa como la relación límite de embutido ó por el porcentaje de reducción

Relación de embutido límite =  $D_o/d$

$R_d (\%) = 100(D_o-d)/D_o$ .

Donde :  $D_o$  = diámetro (máximo embutible) de la pieza inicial,

$d$  = diámetro del punzón.

En general la capacidad de un material para ser embutido, depende primordialmente de la relación entre el diámetro del disco inicial al diámetro del punzón  $D_o/d$ .

Existe otro ensayo llamado Fukui, (figura 1.9.) En éste, probetas circulares son deformadas en forma de copas cónicas. Se mide el diámetro de la base de la copa cónica y se divide entre el diámetro original para obtener el valor Fukui. Es importante mencionar que el punto final del recorrido en el ensayo no es crítico, debido a que el diámetro del cono no cambia después de la fractura. [Referencia. 7].

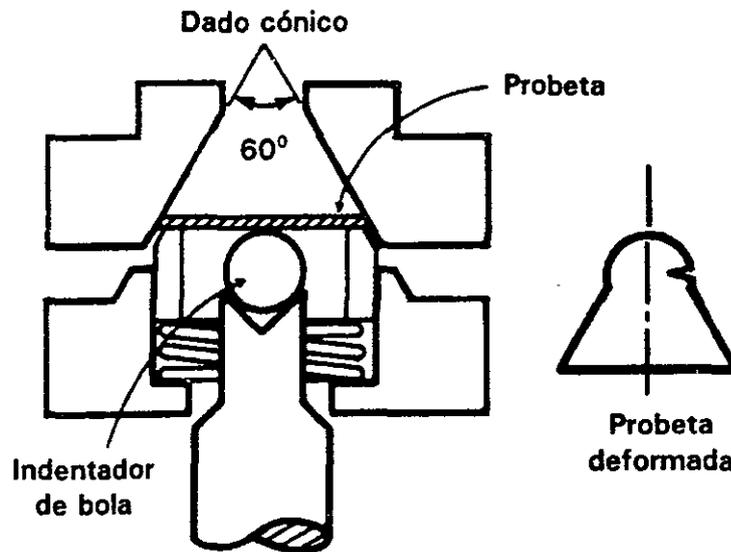


Figura 1.7. Herramental para ensayo Fukui.

[Referencia. 7].

## 2. METODOS DE ANALISIS DE DEFORMACIONES

### 2.1 ANALISIS POR MALLA DE CIRCULOS.

Los ensayos de deformabilidad mencionados anteriormente, se realizan para observar como se deforman plásticamente las probetas, para analizar las deformaciones en diferentes áreas de las mismas, y para evaluar si un material es o no apto para ciertas aplicaciones donde se demandan propiedades relacionadas con la deformación.

Para auxiliar la observación, medición y análisis de las deformaciones, así como para conocer más acerca del flujo del metal durante los procesos de estampado, se ha desarrollado una técnica llamada “análisis por malla de círculos (Circle Grid Analysis) CGA”. Esta técnica ha sido ampliamente aceptada y empleada por las plantas estampadoras, proveedores y constructores de herramientas de estampado para la industria automotriz.

La técnica consiste en marcar un mallado circular en el material. Para imprimir los círculos existen diversos métodos, entintado, fotograbado, rayado, mallado electro-químico, etc. El más ampliamente usado es el mallado electro-químico, éste tiene la ventaja de permanecer en el material aún después de la falla del material.

Algunas técnicas tienen la desventaja de crear superficies concentradoras de esfuerzos (rayado), y otros como el entintado al momento del contacto con las herramientas de estampado se borran, eliminando la posibilidad de las deformaciones después de los ensayos.

La técnica (CGA) se basa en analizar un mallado circular grabado en el material. El patrón se compone de pequeños círculos cuyos diámetros varían según la aplicación, el diámetro de los círculos se selecciona dependiendo del gradiente de deformación. Para áreas donde la deformación es plana es suficiente utilizar círculos de 6.4 mm de diámetro; para áreas de deformación con radios y curvaturas pronunciadas círculos de 2.5 mm, y para áreas con deformación de radios pequeños y curvaturas cerradas, círculos de 1.3 mm. [Referencia. 11]

El tamaño del círculo determina la posibilidad de poder medir con precisión las deformaciones después de los ensayos o pruebas.

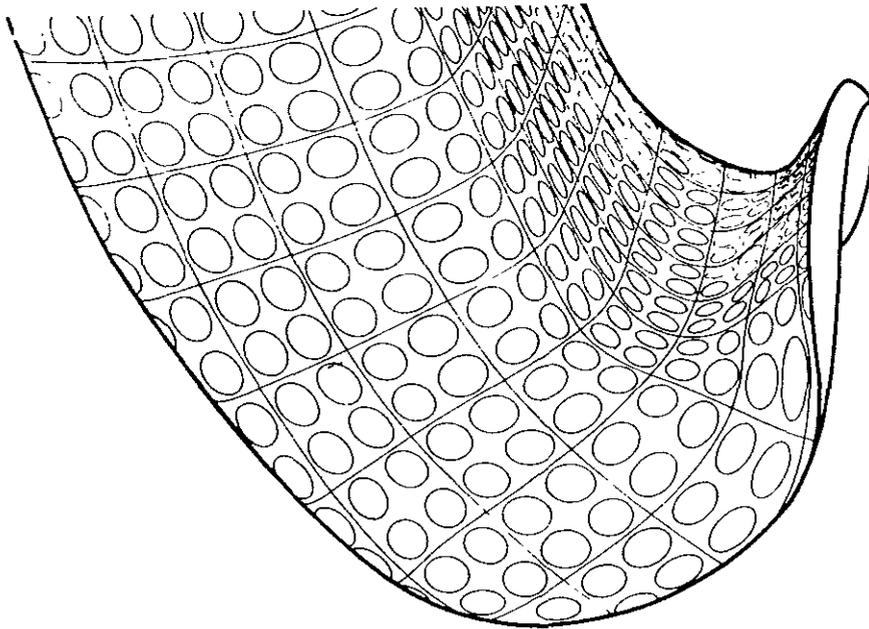


Figura 2.1. Ejemplo de malla circular sobre un parachoques, mostrando la deformación de la malla de círculos.

[Referencia. 10 ].

La principal ventaja del mallado circular es que no presenta orientación preferencial, y las deformaciones se pueden leer en las elipses resultantes de los círculos después de la deformación. Esto significa que no importa cómo el material sea deformado o en que dirección se deforme, el círculo siempre presentará una sección alineada con la dirección de la deformación del material.

Las magnitudes de las deformaciones se obtienen midiendo los ejes mayor y menor de la elipse resultante, denominándose respectivamente deformación mayor y deformación menor.

En algunos casos de deformación el eje menor de la elipse es menor que el diámetro original del círculo, denominándose a este tipo de deformación negativa. Cuando la deformación del eje menor es igual a cero (eje menor de elipse igual al diámetro original del círculo) se denomina deformación plana. En otros casos de deformación los círculos se agrandan, (no forman elipses) y la deformación del eje mayor y menor son iguales y positivas, se denomina deformación balanceada. [Referencia. 11].

En la práctica se utiliza una regla de acetato flexible (figura 2.2) diseñada para leer directamente el porcentaje de deformación.

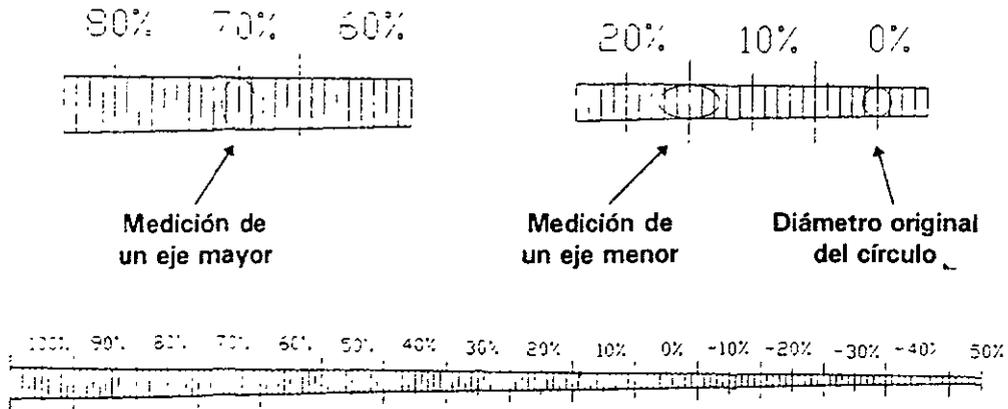


Figura 2.2. Regla flexible para medir el porcentaje de deformación.

[Referencia. autor]

## 2.2 DIAGRAMA LIMITE DE FORMADO.

Keeler y Goodwin propusieron graficar el estado de deformación local de la chapa, con la deformación mayor  $\epsilon_1$  en el eje vertical y la deformación menor  $\epsilon_2$  en el eje horizontal, (Figura 2.3). [Referencia 13].

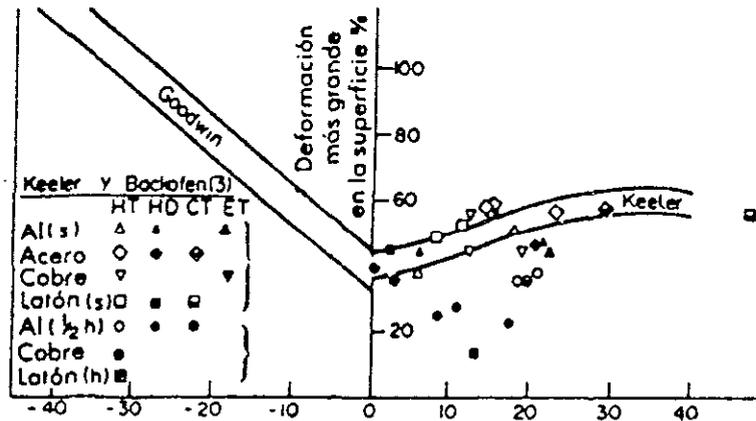


Figura 2.3. Diagrama límite de formado típico.

[Referencia. 13].

La figura 2.4 muestra la distribución de las deformaciones para los diferentes ensayos de lámina de acero. Se muestra el ensayo Swift , Erichsen y el ensayo de copa cónica (Fukui) que es una combinación de ambos.

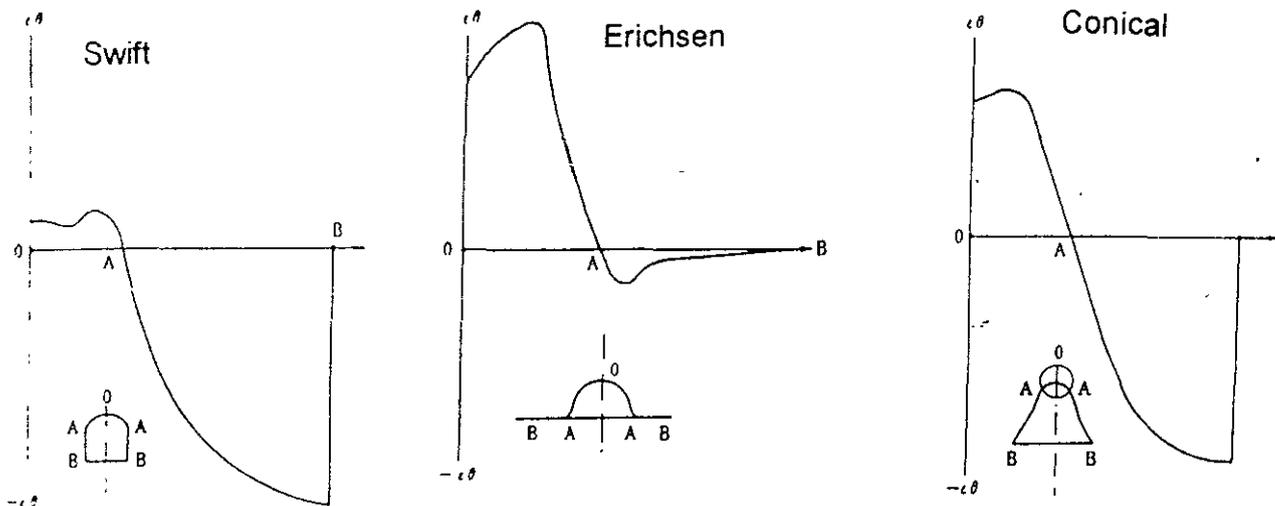


Figura 2.4. Distribución de las deformaciones en "DLF" para diferentes ensayos.

El eje de las abscisas indica el punto de la muestra, y las ordenadas son las deformaciones.

[Referencia. 7].

El diagrama límite de formado DLF, divide todas las posibles combinaciones de deformación en dos grupos, el primer grupo donde la falla o fractura (adelgazamiento) suceden durante la deformación y el segundo grupo donde las deformaciones se pueden llevar a cabo, de manera segura, sin que la falla o fractura (adelgazamiento) se presenten.

El adelgazamiento en cualquier área de la pieza es no deseable, debido a que es indicativo de que con pequeños incrementos de carga o viaje del punzón se presentará la falla y por ende el desperdicio de la parte.

Para obtener condiciones de deformación seguras, se deben seleccionar combinaciones de deformación mayor y menor, como la mostrada con el punto "A", de la figura 2.5.

En práctica se ha comprobado que dejando una banda de margen de seguridad por debajo de la curva (figura 2.5) límite de formado, en la selección de la combinación

de las deformaciones se contemplan y absorben las variables de proceso como: condiciones de superficie de herramientas de estampado, lubricación temperatura, etc.; obteniendo piezas sin fracturas o adelgazamientos.

El punto denominado DLFo, donde las deformaciones menores son cero, es siempre el punto inferior de la curva de límite de formado y representa la condición de “deformación plana”. Este punto se muestra en la figura 2.5. [Referencia 10].

Para obtener el punto DLFo con precisión, exactitud y veracidad se requiere aplicar varias pruebas, con procedimientos y equipos especiales que consideren todas las variables que intervienen en el proceso de estampado.

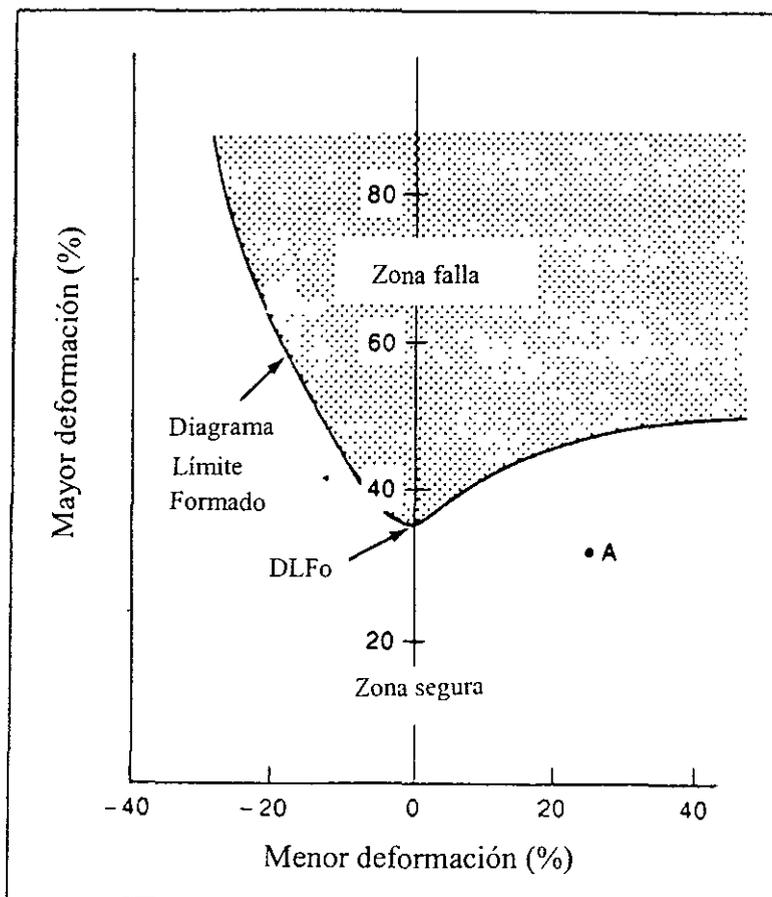


Figura 2.5. Representación de coordenada de deformación plana DLFo.

[Referencia. 10 ].

Como se describió anteriormente, para determinar el diagrama límite de formado de un material a determinadas condiciones se imprime la malla de círculos, sobre varias probetas, se realizan las pruebas de embutido de copa y se analizan, para posteriormente obtener la gráfica deseada. Este procedimiento demanda mucho tiempo de preparación y realización de varias pruebas.

En la industria el tiempo es crítico y representa dinero, por esto muchas decisiones se toman sin análisis previos durante el trabajo en planta. Esto ha obligado a desarrollar correlaciones teóricas y prácticas, para obtener respuestas rápidas y aproximadas.

Para obtener las correlaciones se hacen algunas consideraciones prácticas:

W. G. Brazier, propone que para aceros de bajo contenido de carbono, la gráfica de límite de formado es constante, varía muy poco, y los efectos de lubricación, diseño de herramientas, orientación de pieza de trabajo y espesor de material, no afectan.

Obteniendo la representación matemática siguiente. [Referencia 11].

$$DLFo = (a + (b * t))A \quad \text{-----2.1}$$

Donde:  $DLFo$  = combinación de deformaciones que determinan la deformación planar.

$a = 23.3$  = constante que representa el 23 % de alargamiento,

$b = 359.0$  = constante,

$t$  = espesor de material

$A$  = variable que depende del índice de endurecimiento "n".

el índice de endurecimiento puede ser obtenido, de ensayos de tracción, y/o evaluando la ecuación 1.4, ó considerar los valores propuestos por varios investigadores:

$A = 1$  cuando los valores de  $n \geq 0.21$ , y

$A = "n"/0.21$  para valores de  $n < 0.21$ .

Algunos investigadores han determinado que el  $DLFo$  no se incrementa cuando "n" excede el valor de 0.21, por lo que consideran práctico el uso de " $A$ " = 1.

El espesor del material afecta directamente al  $DLFo$ , ya que, al incrementar el espesor del material, se incrementa la formabilidad. Sin embargo, esta última capacidad empieza a disminuir si se sobrepasa el espesor de 5.0 mm, como se muestra en la figura 2.6.

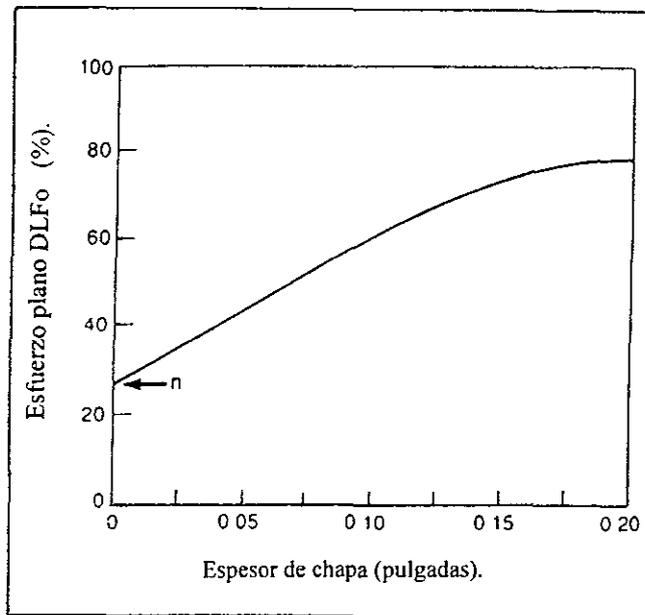


Figura 2.6. Efecto del espesor de material en el DLFo.

[Referencia. 10].

### 2.3 ANALISIS DE DEFORMACION DE ESPESORES.

Existe otra técnica basada en la tecnología de ultrasonido, para determinar espesores críticos, esta técnica utiliza un equipo de ultrasonido que contiene un emisor y un receptor de señales sonoras, el emisor se desliza sobre una superficie de aceite que previamente se aplica a la lámina de forma manual, obteniendo así los datos iniciales del espesor del material muestra. Posteriormente, el material es sometido al proceso de embutido o estampado. Después del ensayo de deformación, la pieza es sometida a medición para obtener la diferencia de espesores:

$$t_f / t_0.$$

Donde:  $t_f$  = espesor final después del ensayo.

$t_0$  = espesor inicial del material antes del ensayo.

Estas relaciones de espesores pueden referenciarse a la deformación mayor.

Considerando que el volumen de la pieza es constante, por tanto tenemos:

$$\epsilon_L + \epsilon_w + \epsilon_t = 0 \quad \text{-----2.2.}$$

donde:  $\epsilon_L$  = deformación longitudinal.

$\epsilon_w$  = deformación en el ancho.

$\epsilon_t$  = deformación en el espesor.

En la actualidad los equipos modernos de ultrasonido cuentan con equipo digital en base a microprocesadores, realizando los cálculos de manera rápida para obtener resultados y gráficas (figura 2.7) de forma directa.

Es importante mencionar que la aplicación de este método está restringida a radios de gran amplitud y partes abiertas, debido a que, para radios pequeños o piezas pequeñas y cerradas, el dispositivo emisor-receptor no tiene contacto directo y las mediciones pierden precisión y exactitud.

La tabla mostrada en la figura 2.8 muestra las correlaciones  $t_f/t_0$  obtenidas en pruebas y ensayos. Para determinar si es factible la falla o no y para encontrar el DLFo, se entra a leer la tabla a partir de las ordenadas con la relación obtenida de  $(t_f/t_0)$ . Posteriormente situar en la diagonal el DLFo calculado o determinado por ensayos.

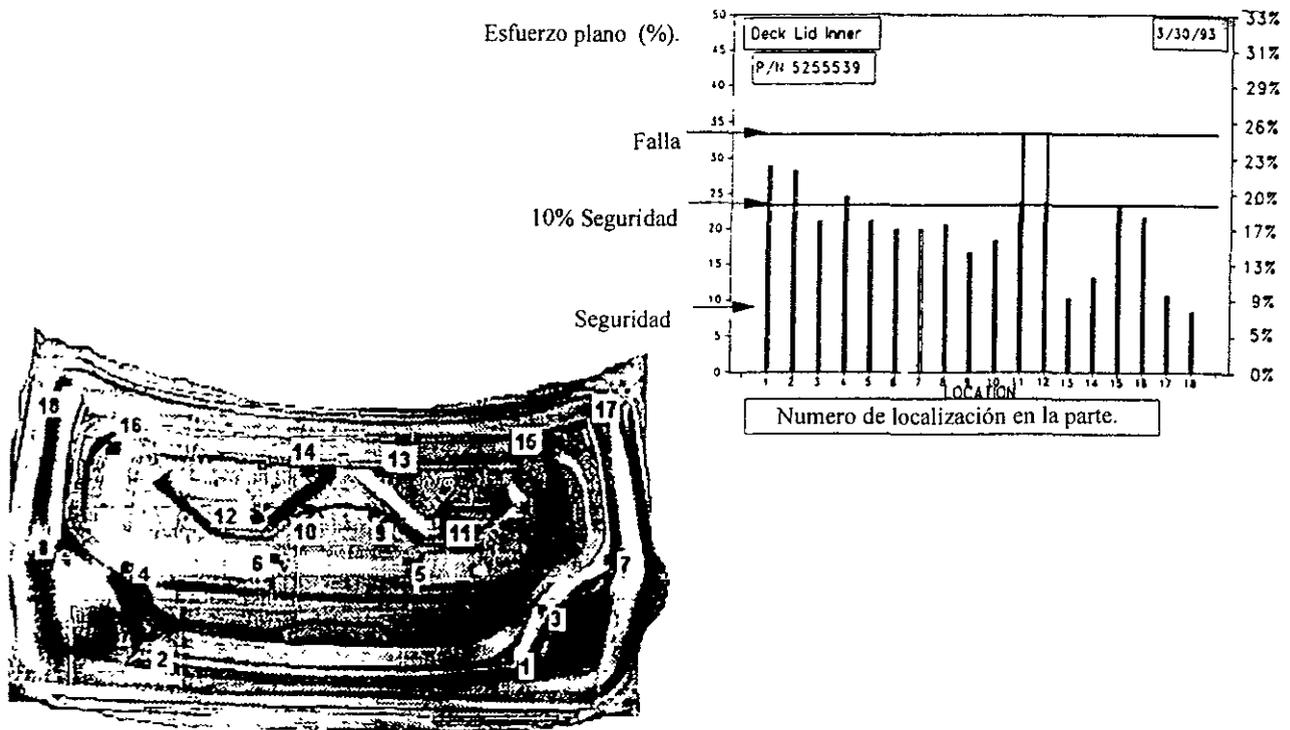


Figura 2.7. Gráfica de análisis de espesores, en las abscisas con números se identifican los puntos estudiados, de la parte, y en las ordenadas las líneas de esfuerzo y relación de espesor, que limitan las zonas de seguridad y falla. [Referencia. autor]



## 2.4 ANALISIS PROPUESTO PARA EL CALCULO DE DEFORMACIONES.

El siguiente análisis, representa un método simple y aproximado para calcular las deformaciones de un material de prueba, en un proceso de estirado. Para el desarrollo de este método, se asume que el material de la chapa a analizar, en el plano medio, se enrolla ó envuelve uniformemente sobre la geometría del punzón; y que la chapa de metal o espécimen de prueba se deforma como una membrana, figura 2.9.

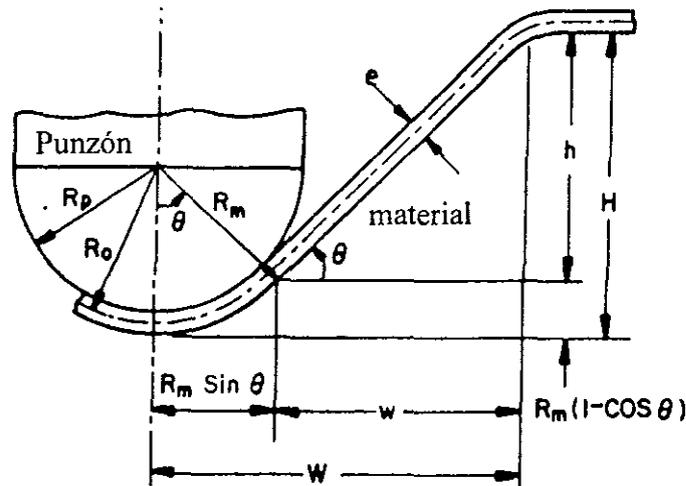


Figura 2.9. Análisis de la deformación, por el método de la membrana.

[Referencia. 8].

O.S. Narayanaswamy - M.Y. Demeri, obtienen las siguientes ecuaciones a partir, de la figura 2.9: [Referencia 8].

$$W = R_m \sin \Theta + w \quad \text{-----2.3}$$

$$h = w \tan \Theta \quad \text{-----2.4}$$

$$H = R_m (1 - \cos \Theta) + h \quad \text{-----2.5}$$

Donde:  $W$  = radio de apertura de matriz.

$H$  = altura de alargamiento de la probeta

$\Theta$  = ángulo formado entre punzón y matriz.

$w$  = proyección horizontal de la pared.

$h$  = proyección vertical de la pared.

$R_m$  = radio del punto más exterior de la chapa bajo efecto del punzón.

$R_o$  = radio del punto medio de la chapa bajo efecto del punzón.

$R_p$  = radio del punto de contacto de la chapa con el punzón.

$t$  = espesor de la chapa.

La relación de variables para la elongación en el plano medio es: [Referencia autor]

$$\epsilon_0 = (l_f - l_0) / l_0$$

Y sustituyendo los datos de la figura 2.9 tenemos.

$$\epsilon_0 = ((R_o \Theta + (w^2 + h^2)^{1/2}) - W) / W \quad \text{-----2.6}$$

donde:  $l_f = R_o \Theta + (w^2 + h^2)^{1/2}$  = longitud del material después de la deformación.

$l_0 = W$  = longitud del material sin deformación.

Obteniendo la relación de variables para la elongación, en el punto mas lejano de la chapa, que también corresponde al punto donde la deformación es máxima, tenemos:

$$\epsilon_m = ((R_o + \frac{1}{2}t) \Theta - l_0) \quad \text{-----2.7}$$

La ecuación 2.6, representa la elongación en el punto medio de la chapa.

Escribiendo la ecuación 2.7 también en términos de la elongación en el punto medio:

$$\epsilon_m = \epsilon_0 + (\frac{1}{2} t \Theta) / l_0 \quad \text{-----2.8}$$

por tanto:

$$\epsilon_0 + (\frac{1}{2} t \Theta) / l_0 = ((R_o + \frac{1}{2}t) \Theta - l_0)$$

$$\epsilon_0 + (\frac{1}{2} t \Theta) / l_0 = (R_o \Theta + (\frac{1}{2}t\Theta)) / l_0 - l_0 / l_0$$

$$1 + \epsilon_0 = R_o \Theta / l_0 \quad \text{-----2.9}$$

Sustituyendo la ecuación 2.9 en 2.8 para eliminar  $\Theta / l_0$ , tenemos: [Referencia 8]

$$\epsilon_m = \epsilon_0 + \frac{1}{2} (1 + \epsilon_0) t / R_o \quad \text{-----2.10}$$

La deformación debida al embutido es la diferencia entre la deformación máxima obtenida en el punto más lejano del punzón y la deformación del plano medio, por tanto:

$$\epsilon_b = \epsilon_m - \epsilon_0 = \frac{1}{2} (1 + \epsilon_0) t / R_o \quad \text{-----2.11}$$

Todas las variables de interés están expresadas en términos de  $\Theta$  (ecuaciones 2.3 a 2.5). Por lo que las deformaciones  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_0$  y la altura  $H$  pueden ser calculados para diferentes ángulos. El cálculo de la deformación se termina cuando la altura del modelo, es igual a la medida de la altura del ensayo fracturado, este dato es obtenido de pruebas de tracción. La deformación máxima debe tomarse como límite de la deformación.

Es difícil modelar exactamente el efecto de la fricción entre el punzón y la pieza, sin embargo, se propone un camino que hace uso de una ecuación empírica para determinar el efecto de la fricción. O.S. Narayanaswamy - M.Y. Demeri, proponen el siguiente método, asumiendo que la fricción reduce el alargamiento de la chapa de metal que esta en contacto con el punzón. Por lo que la ecuación 2.6 se ve afectada por un factor  $X$  que varia linealmente con la relación  $t/R_0$ , por lo que : [Referencia 8]

$$X = X_1 + X_2 (t/R_0) \quad \text{-----2.12}$$

Entonces el alargamiento bajo el punzón es:

$$\epsilon_{0P} = (1-X) \epsilon_0$$

El alargamiento, ecuación 2.11 es modificado por otro factor llamado  $Y$ , el cual es también función de  $t/R_0$ ,

$$Y = Y_1 + Y_2 (t/R_0) \quad \text{-----2.13}$$

y el alargamiento bajo el punzón es :

$$\epsilon_{bP} = (1-Y) (1+\epsilon_0) (t/R_0) \quad \text{-----2.14}$$

Por lo que la ecuación modificada para la ecuación 2.14 debe contar con los dos efectos arriba mencionados además de una distribución no lineal que va a ocurrir a grandes valores de  $t/R_0$ . Por tanto la máxima deformación para un punto más lejano de la chapa en contacto con el punzón es:

$$\epsilon_m = (1-X) \epsilon_0 + (1-Y) (1+\epsilon_0) (t/R_0) \quad \text{-----2.15}$$

Con la introducción del efecto de fricción, la probeta no se estira ó deforma uniformemente. El estiramiento en el área bajo el punzón es menor que en las áreas que no tienen contacto con el punzón. Es importante considerar que existen otras áreas que son afectadas, por el contacto de las paredes de la matriz. Para considerar la fricción en estas áreas se tiene:

$$\epsilon_{0w} = ((l_p + l_w) \epsilon_0 - l_p \epsilon_{0P}) / l_w \quad \text{-----2.16}$$

donde:  $l_p$  = longitud de la probeta en contacto con el punzón

$l_w$  = longitud de la pared sin contacto .

Es importante mencionar que la fractura ocurre a un valor de esfuerzo-deformación que depende únicamente del material, y de la localización de la fractura ó la geometría de las herramientas del ensayo.

### 3. EXPERIMENTACION.

Para caracterizar la lámina de uso automotriz en estudio se realizaron pruebas de tracción, análisis de composición química, mediciones de rugosidad, y ensayos de embutido.

#### 3.1 SELECCION DE MATERIALES Y PROBETAS.

Se realizaron pruebas a 4 diferentes tipos de lámina: 3 de procedencia extranjera y una lámina de procedencia nacional. Las láminas de procedencia extranjera tienen aplicación en las partes exteriores de los vehículos, éstas fueron seleccionadas debido a que los estampados exteriores en su mayoría son las piezas más críticas, por sus formas complejas y por la profundidad de estampado. La lámina de procedencia nacional tiene aplicación en algunos refuerzos interiores de los vehículo.

Otro parámetro de selección es que para deformar estas láminas se requiere de más de un golpe de prensa para lograr la pieza final deseada. Además de que son las partes que reciben la mayor parte de las fuerzas de impacto en situaciones de colisión. A la vez que son las que proporcionan la apariencia de los vehículos, siendo la apariencia muy importante en muchos casos para la selección de compra de vehículos.

Se obtuvieron muestras de los cuatro tipos de lámina, las cuales fueron seleccionadas de rollos de chapa de acero de 30 y 35 toneladas de peso, después de ser desenrolladas, lubricadas y antes de ser procesadas en los prensas de estampado.

Con la finalidad de estudiar mejor el comportamiento del ancho del rollo, se aplicó el criterio mostrado en la figura 3.1 (zona orilla inferior, zona media y zona orilla superior).

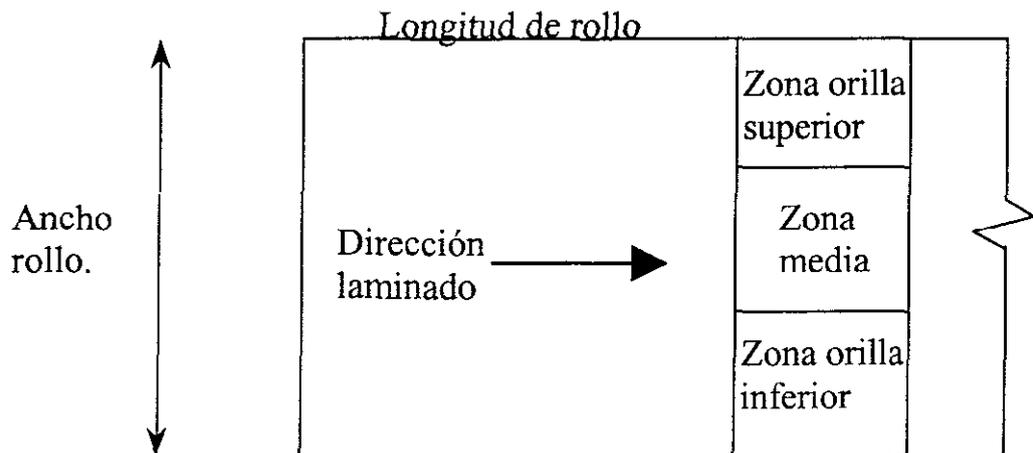


Figura 3.1. Criterio de selección de muestras de rollo de chapa de acero. [Referencia autor]

### 3.2 ANALISIS QUIMICO.

La tabla 3.1 muestra el resultado de los análisis químicos y estados metalúrgicos de los cuatro tipos de chapa de acero bajo estudio.

DATOS METALURGICOS DE LAS LAMINAS EN ESTUDIO				
Lámina #	Descripción	Composición Química %	Espesor Promedio (mm)	Estado metalúrgico
1	Lámina para costados vehículo compacto	0.02%C, 0.16%Mn, 0.07%P, 0.09%S, 0.07%Si, 0.02%Cu, 0.03%Ni, 0.03%Cr, 0.01%Mo, 0.048%Al.	0.736	Recocido
2	Lámina para puertas vehículo compacto	0.03%C, 0.18%Mn, 0.09%P, 0.06%S, 0.08%Si, 0.02%Cu, 0.02%Ni, 0.03%Cr, 0.01%Mo, 0.031%Al.	0.787	Recocido
3	Lámina para costado vehículo largo	0.01%C, 0.01%Si, 0.18%Mn, 0.17%P, 0.14%S	0.838	Recocido
4	Lámina interiores nacional	0.06%C, 0.13%Si, 0.53% Mn.	0.762	Recocido

Tabla 3.1. Composición química y estado metalúrgico de las muestras.

La composición química de las láminas se evaluó con espectrómetro de chispa, corroborando la información obtenida, contra los datos proporcionados por el fabricante, siendo ambas informaciones muy próximas, tabla 3.1

Condición superficial: Lámina 1 y 2 presentan acabado superficial de electrogalvanizado (baño de Zinc-hierro al, 12-15% de hierro) de acuerdo a la norma ASTM

especificación A560 para chapa de acero, de alta soldabilidad y excelente para pintura, y ASTM especificación A879 para acabado superficial. La lámina 3 electro-galvanizada de acuerdo a la norma JIS (Japanese Industrial Standard) especificaciones 3101, 3113, 3134, y 3135 para chapa de acero y JIS 3141 para acabado superficial.<sup>2</sup>

La tabla 3.2 muestra los datos de reportes de pruebas y análisis entregados por los proveedores de chapa de acero al cliente para aceptación, registro y rastreabilidad de acuerdo a ISO9000.

TABLA 3.2. DATOS DE PROPIEDADES ENTREGADAS CON LOS ROLLOS.					
Lámina #	Esfuerzo máximo (Mpa)	Elongación %	Dureza Rockwell (B)	Rugosidad	País de origen
1	302.47	41.6	42.6	-----	U.S.A
2	303.85	41.9	45.1	-----	Canada
3	317.40	42.0	47.8	Ra = 1.9µm	Japón
4	317.2	32.20	-----	-----	México

Tabla 3.2. Datos proporcionados por fabricantes de chapa de acero.<sup>2</sup>

### 3.3 RUGOSIDAD

La rugosidad de la lámina de estampado profundo es sumamente importante, ya que ésta debe ser tal que permita la adherencia de los productos de lubricación (generalmente solución base agua-aceite al 10:2) pero no mayor para evitar que la chapa de acero se “agarre” a las superficies de las herramientas de estampado, provocando la ruptura prematura del material.

Los parámetros más representativos de la rugosidad son: la media aritmética de las desviaciones del perfil de la muestra a partir de la línea media (Ra), el promedio de alturas de pico a valle (Rz), y la altura máxima de rugosidad (Rmáx). Estos parámetros fueron obtenidos en las muestras, de acuerdo a las normas DIN 4760, 4761, 4762 y 4763, con un rugosímetro

<sup>2</sup> Reportes de entrega de rollos.

marca MITUTOYO, modelo SURFTEST-402 portátil. Los datos se muestran en la siguiente tabla 3.3, las gráficas de rugosidad son mostradas en las figuras 3.1 y 3.2.

DATOS DE RUGOSIDAD				
Lámina #	Ra. (μm)	Rmáx. (μm)	Rz. (μm)	Observaciones
1	1.2	8	7	Mediciones a 90° con respecto a direc. Lam.
2	1.5	11	9	Mediciones a 90° con respecto a direc. Lam.
3	1.1	11	8	Mediciones a 90° con respecto a direc. Lam.
4	3.1	30	22	Mediciones a 90° con respecto a direc. Lam.

Tabla 3.3. Datos de rugosidad de la chapa de acero en estudio.  
Mediciones transversales a la dirección de laminación.

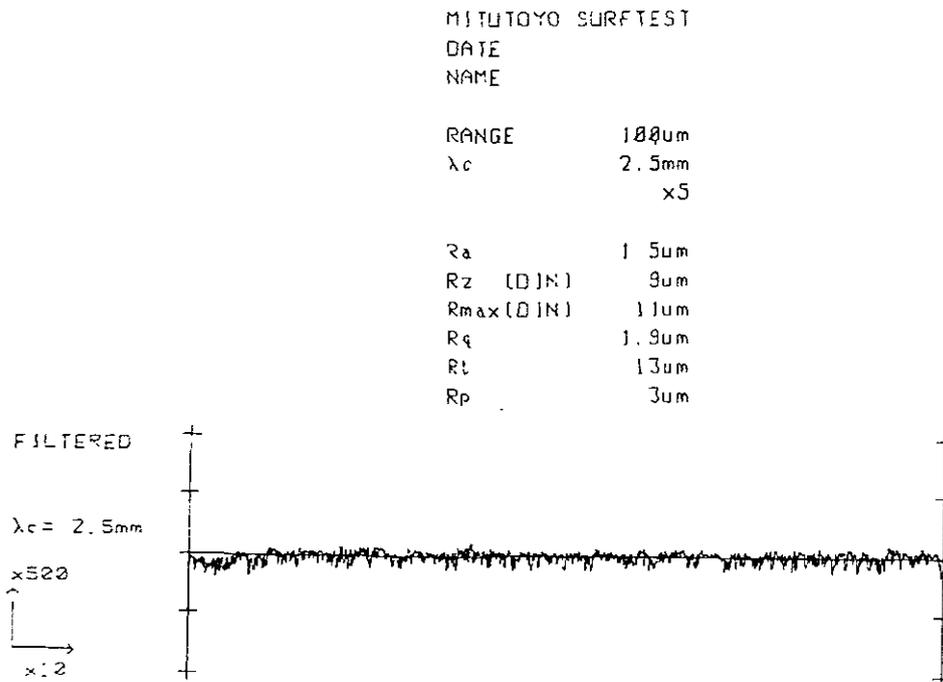


Figura 3.1. Gráfica del perfil de rugosidad, lámina #2 para puertas vehículo compacto.

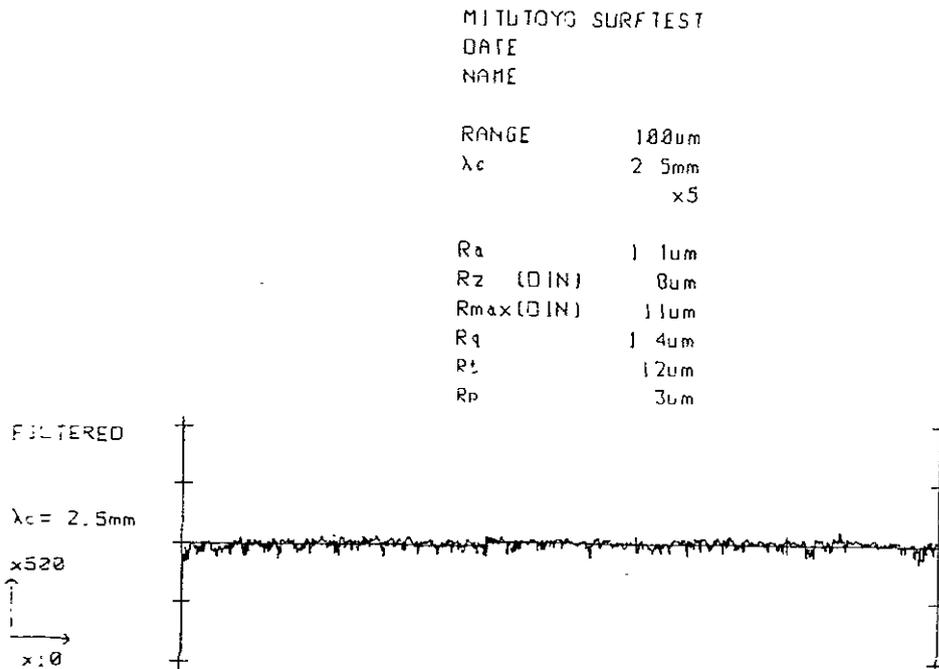


Figura 3.2. Gráfica de perfil de rugosidad, lámina #3 para costado vehículo largo.

La práctica ha demostrado que la chapa de acero aceptable para procesos de embutido profundo, debe presentar rugosidad media aritmética ( $R_a$ ) de 1.2 a 2.4 $\mu$ m.

### 3.4 GRABADO DE MALLA DE CIRCULOS.

Muestras del material de prueba fueron grabadas para el análisis de deformaciones por malla de círculos, en el grabado se utilizó un equipo marca LECTROETCH, modelo V45A. de corriente alterna, fabricado en U.S.A.. El rango de operación es 0-100 (Ohms) y rango de 0-30 (Volts). Se utilizó solución limpiadora marca LECTROETCH “cleaner for ferrous and corrosion resisting, formula 2, lot 7456” limpiador para materiales ferrosos y resistencia a la corrosión después del grabado, fórmula 2, lote 7456; para eliminar grasa y materiales ó sustancias que impidan fluir la corriente a través del paño (stencil) de patrón de círculos y rodillo de aplicación de corriente. Como medio electrolítico se utilizó electrolito marca

LECTROECH “electrolyte for etching, formula 112A, LOTE 747.”, para materiales ferrosos con electroplaca de Zinc y Cadmio. Equipo y soluciones recomendadas y proporcionadas por proveedor de acero de U.S.A. para hacer pruebas.

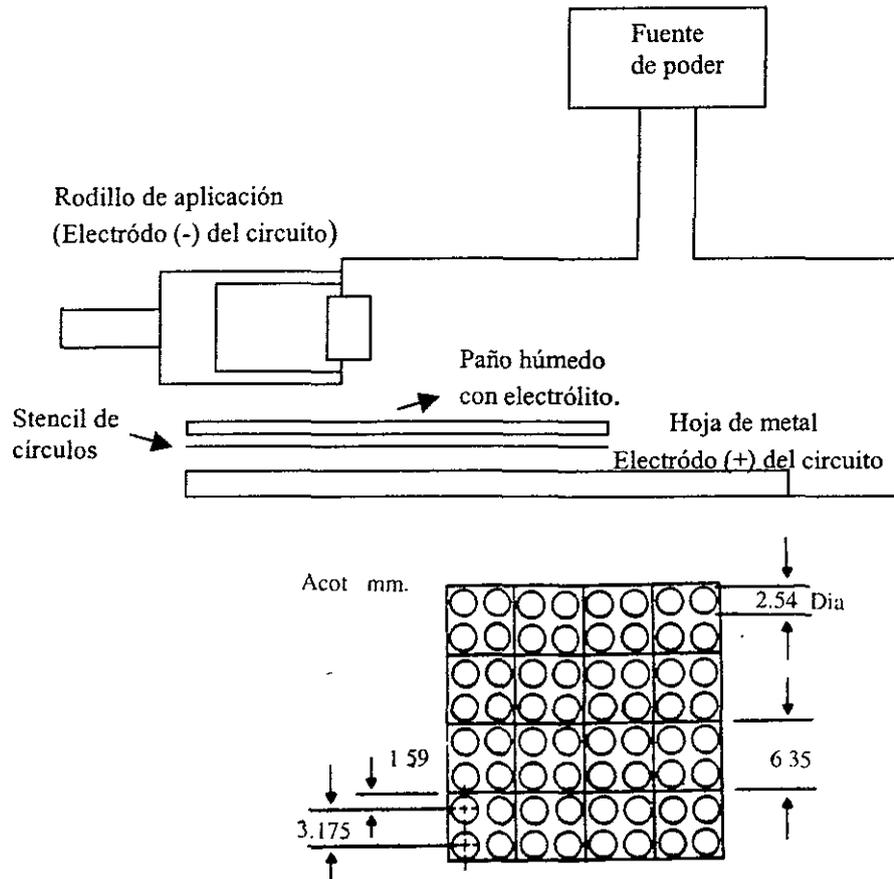


Figura 3.3. Diagrama del equipo para grabar la malla de círculos.  
Ejemplo de malla empleada en las pruebas. [Referencia. autor]

Se realizaron pruebas en los materiales muestra, variando los parámetros del equipo, determinando que el rango óptimo de operación para evitar quemar la superficie de la muestra, o evitar marcar tenuemente la malla de círculos, es 15-18 (Ohm) y 14-16 (Volts). Las muestras quemadas o marcadas tenuemente imposibilitan la lectura de las deformaciones después de los ensayos de embutido.

El tamaño de la hoja del patrón de círculos es de 29 cm X 22.5 cm. Las muestras fueron cortadas de este tamaño para su fácil manejo y aplicación del grabado. La malla utilizada en las pruebas consiste de cuadros de 6.35 mm dentro de los cuales existen 4 círculos de 2.54 mm, como se muestra en la figura 3.3.

### 3.5 ENSAYOS DE TRACCION.

Para realizar los ensayos de tracción se obtuvieron muestras de las diferentes áreas del ancho de rollo, zona orilla inferior, zona media, y zona orilla superior, con las que posteriormente se obtuvieron probetas a diferentes ángulos con respecto a la dirección de laminado, probetas en dirección paralela a la dirección de laminado 0°, probetas a 45° con respecto a la dirección de laminado, y probetas a 90° con respecto a la dirección de laminado.

Esto con la finalidad de conocer más de las propiedades anisotrópicas del material y caracterizar la chapa de acero, por áreas del ancho de rollo.

Se realizarón 63 ensayos de acuerdo a la norma ASTM E-8, en una máquina de pruebas dinámicas, marca INSTRON servohidráulica, modelo 1331, con las condiciones siguientes:

- 1.-) Velocidad de carrera = 10 (mm/min).
- 2.-) Temperatura = 23.0 grados Celsius.
- 3.-) Húmedad = 50%.

Se muestra una tabla y una gráfica esfuerzo deformación a manera de ejemplo de los datos obtenidos de éstas pruebas, el resto de las tablas y gráficas se pueden consultar en el apéndice.

Lámina 1: zona orilla inferior, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	22.2	26.0	3.0	305.2	33.9	39.8
2	23.4	27.5	3.1	305.6	33.9	39.9
3	23.4	28.0	3.1	309.6	37.8	44.5
Prom.	23.0	27.2	3.1	306.8	35.2	41.4
Des std	0.7	1.0	0.06	2.4	2.3	2.67

Tabla 3.4. Lámina #1 para costado vehículo compacto, probeta orilla inferior, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

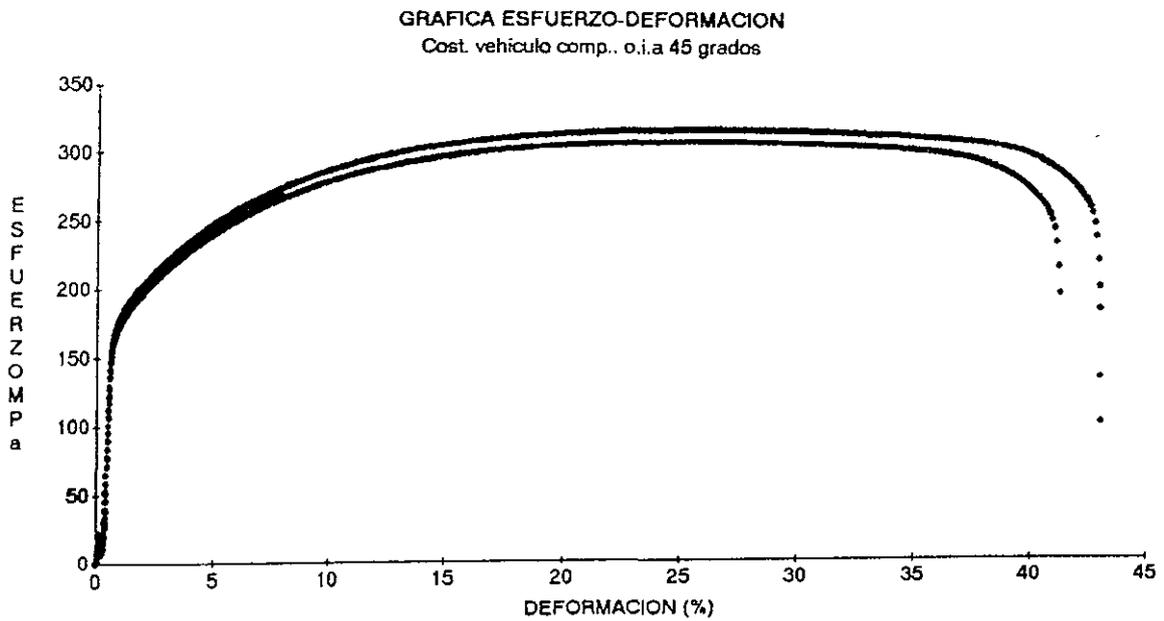


Figura 3.4. Gráfica esfuerzo-deformación, lámina #3 para costado vehículo compacto, esquina inferior, a 45° con respecto al eje de laminación.

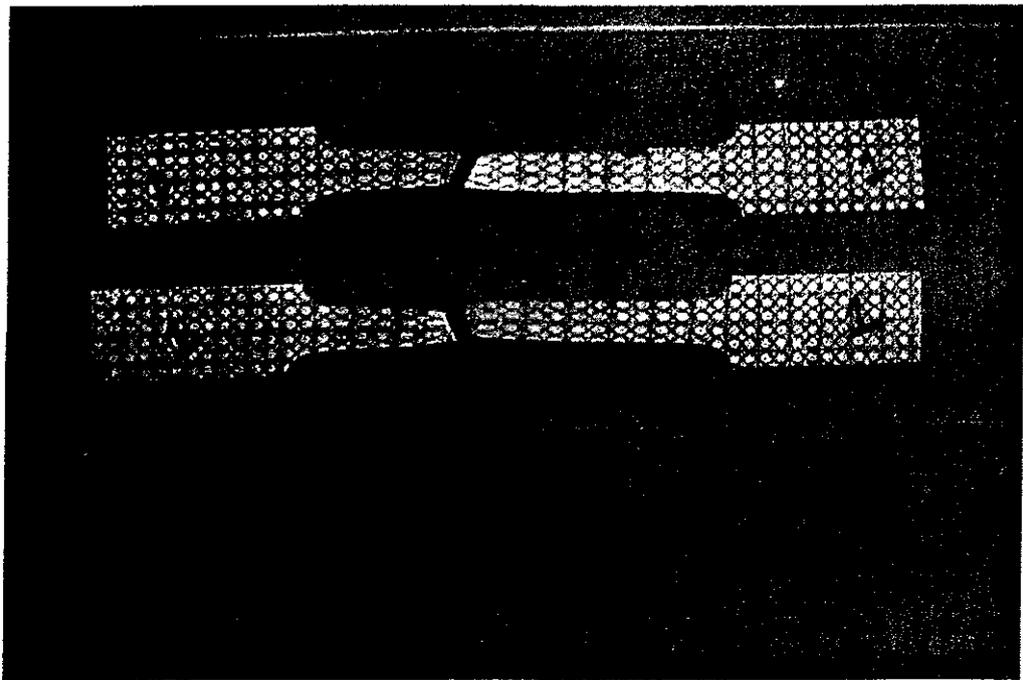


Figura 3.5. Probetas de tracción después del ensayo.

### 3.6 INDICE DE ANISOTROPIA.

Con el propósito de conocer cómo es la variación de las propiedades mecánicas, para tener la caracterización adecuada de las láminas, se cálculo de manera teórica el índice de anisotropía.

El índice se cálculo al finalizar las pruebas de tracción midiendo de forma manual las deformaciones en el largo y ancho de las probetas después de la fractura.

Es importante resaltar que la medición en el ancho y largo de las probetas se realizó en la zona de deformación homogénea de las probetas.

Este método de medición no es el más recomendado debido a que se pueden producir grandes errores de paralaje en las mediciones, por la dificultad de las lecturas en el ancho de las probetas y a la dificultad para determinar de manera precisa donde inicia el cuello de fractura. Idealmente las mediciones se deben de realizar de forma automática con extensómetros que se instalan en los equipos de pruebas de tracción.

Se muestra una tabla de resultados del índice de anisotropía a manera de ejemplo. El resto de los datos se puede consultar en el apéndice.

Lámina 1 ( índice de anisotropía) : zona orilla inferior.					
Probeta	1	2	3	$r_{Desv. st}$	$r_{prom}$
Orilla inferior a $0^\circ$ ( $r_{0^\circ}$ )	1.30	1.29	1.32	0.02	1.30
Orilla inferior a $45^\circ$ ( $r_{45^\circ}$ )	1.32	1.28	1.30	0.02	1.30
Orilla inferior a $90^\circ$ ( $r_{90^\circ}$ )	1.29	1.30	1.26	0.02	1.28

Tabla 3.5. Índice de anisotropía “r”, lámina #1 para costado vehículo compacto, probetas orilla inferior, a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  con respecto al eje de laminación.

### 3.7 ENSAYOS DE EMBUTIDO

El propósito de los ensayos de embutido es determinar el índice de embutido, comunmente conocido como altura de copa, que está definido por la profundidad de trayectoria del punzón, otra información de relevante importancia obtenida a partir de estos ensayos, es el análisis de deformaciones, con el que se obtiene la relación de deformación mayor y menor en las diferentes áreas de la copa, con ayuda del mallado de círculos.

El ensayo de embutido de copa está estandarizado por la norma ISO-DIN 8490 "Sheet and Strip Modified Erichsen Lapping" esta norma tiene su equivalente nacional en la DGN B131-1964.

EL ensayo Erichsen estandarizado utiliza un punzón en forma de esfera de 22.0 mm de diámetro, con una matriz de cilindro hueco, se utiliza un prensa chapa para controlar el flujo del metal durante la deformación ocasionada por la carga que se aplica al punzón .

Para nuestros ensayos se utilizó una máquina servo mecánica marca INSTRON, modelo 1331, para pruebas de tracción y compresión. Se utilizó herramental para pruebas de embutido disponible en el laboratorio de pruebas mecánicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, de la UNAM. Este herramental tiene el inconveniente de que el punzón empleado esta fuera de norma, ya que mide 20 mm de diámetro en lugar de 22 mm como lo indica la norma.

Para preparar las muestras se realizaron las actividades siguientes, se cortaron las muestras de lámina de las diferentes zonas del rollo en estudio, orilla inferior, zona media y orilla superior, de 300 mm de largo y 90 mm de ancho para poder colocarlas dentro del sujetador de chapa, se grabaron las muestras con la malla de círculos. Posteriormente se lubricaron las áreas donde pudiera existir contacto entre punzón y matriz con la chapa muestra.

A continuación se aplicó la carga para deformarlas hasta el inicio inminente de la fractura, momento donde se detiene la carga y se procede a leer los parámetros de carga y profundidad de copa, los cuales se obtienen del gráfico de carga contra altura de copa que la máquina genera.

Se procedió a medir físicamente la altura de copa y a leer los porcentajes de deformación de los círculos originales ahora transformados en elipses. Las lecturas de las deformaciones se realizaron con ayuda de la escala construida con anterioridad (mostrada en sección 2).

Otro inconveniente encontrado en el ensayo es que sólo se producen deformaciones positivas, y para obtener un diagrama de límite de formado se requiere de información en los dos cuadrantes de los ejes coordenados, por lo que resulta necesario obtener deformaciones negativas, para lo que se procedió a preparar y ensayar muestras de tracción, grabadas con la malla de círculos.

El equipo y las condiciones de estos últimos ensayos fueron los mismo descritos en la sección de ensayos de tracción.

A continuación se muestran las condiciones de las pruebas y a manera de ejemplo se muestra una tabla de los datos de carga y altura de copa de los ensayos. El resto de los resultados se puede consultar en el apéndice.

Velocidad de carga = 0.4 mm/seg. (de acuerdo a norma)

Húmedad 50%

Temperatura 220° C.

Díametro de punzón 20 mm.

Lámina #1 (Ensayos embutido) orilla inferior.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.87	11.30
2	1.86	11.30
3	1.86	11.27
4	1.85	11.30
5	1.84	11.27
6	1.85	11.27
Promed	1.85	11.28
Desv.	0.01	0.01

Tabla 3.6. Resultados de ensayos de embutido de lámina #1 para costado vehículo compacto.  
Probetas de orilla inferior del rollo.

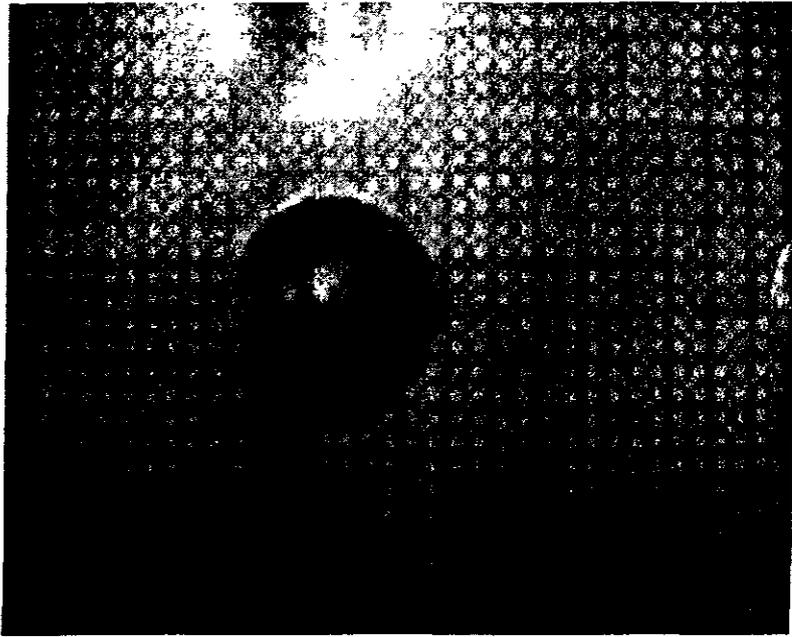


Figura 3.5. Ensayo de embutido mostrando la malla de círculos deformada.



Figura 3.6. Medición de las deformaciones.

### 3.8 DIAGRAMAS LIMITE DE FORMADO.

Una vez obtenidos los porcentajes de deformación del eje mayor y menor de las elipses se procedió a graficarlos, de acuerdo a la propuesta de Keeler y Goodwin [Referencia 13], para así obtener los diagramas límite de formado. A continuación a manera de ejemplo se muestra un diagrama límite de formado, el resto de los diagramas se puede consultar en el apéndice.

Los diagramas límite de formado se obtuvieron para cada zona de estudio del ancho de rollo de cada lámina.

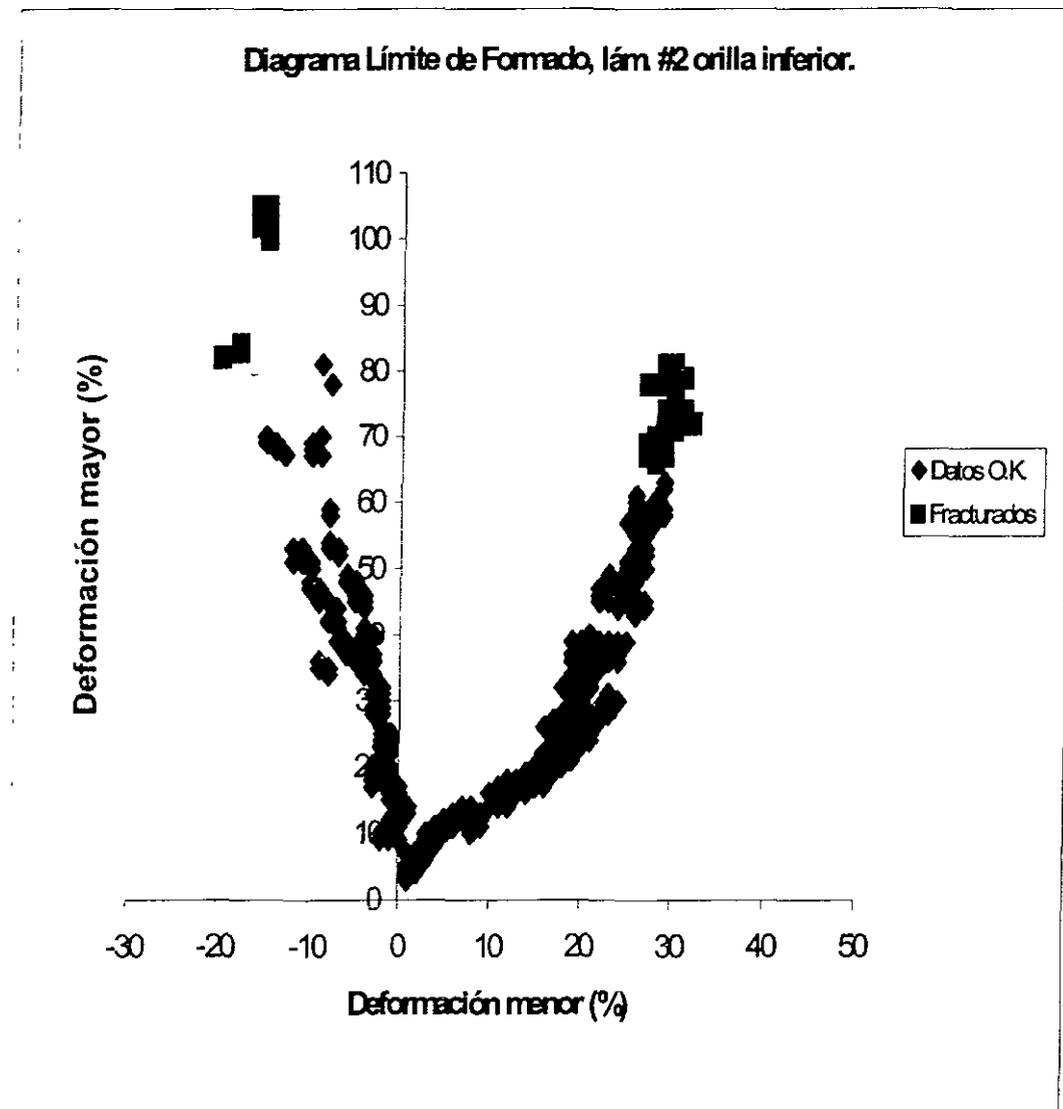


Figura 3.7. Diagrama límite de formado, lámina #2 para puertas vehículo compacto. Probetas de orilla inferior del rollo.

## 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

### 4.1 SELECCION DE MATERIALES Y PROBETAS.

La selección de los materiales para pruebas se realizó con base en la observación de los procesos de estampado en visitas a plantas del ramo automotriz, en México, U.S.A y Canadá, donde se determinó someter a estudio y análisis los materiales que sufren las deformaciones más severas durante los procesos de estampado.

También se consideró a los materiales que requieren de más de 4 golpes de prensa (2,500- 4,000 toneladas de carga en cada golpe) para obtener la pieza final.

Con base en estas dos consideraciones, los materiales a analizar fueron: lámina para costados y lámina para puertas, de dos modelos de vehículos diferentes, a saber auto semicompacto y auto largo.

Un parámetro adicional en la selección de materiales es que dos de las láminas seleccionadas, son provenientes de dos grandes potencias siderúrgicas mundiales, Japón y U.S.A. La tercer lámina es proveniente de Canadá, que no es considerada potencia siderúrgica pero sus productos tienen buena aceptación en el mercado mundial. Con fines de referencia competitiva se analizó la lámina proveniente de México.

Un aspecto final de selección de éstos materiales, coincidió con que las láminas que se utilizan para manufacturar los costados y puertas seleccionadas conforman la parte exterior de los vehículos, que a la vez representa la estética exterior de los mismos, y que en la mayoría de los casos determina la selección de compra de los vehículos para los consumidores.

El criterio seguido para obtener las muestras de lámina en el ancho (orilla inferior, zona media y orilla superior) del rollo, proporciona información de la variación de propiedades en el ancho de rollo de forma eficiente.

Resulta necesario obtener probetas en diferentes direcciones ( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ ) con respecto al flujo de laminación, para obtener información referente a la anisotropía del material.

Esta selección de probetas permite obtener información basta y confiable del comportamiento de las láminas en los procesos de deformación de embutido profundo.

## 4.2 ANALISIS QUIMICOS.

Los análisis químicos realizados en la lámina #1, lámina #2 y lámina #3, de procedencia extranjera, muestra valores muy próximos al rango de valores especificados por la norma para dichos aceros, concluyendo que el control de la composición química en los proveedores extranjeros de U.S.A., Canadá y Japón, es muy bueno, satisfaciendo así los valores exigidos por las corporaciones automotrices para los actuales procesos de estampado.

El análisis químico realizado a la lámina #4 para partes interiores (de procedencia nacional) indica, que algunos de sus porcentajes de los elementos estan fuera de las exigencias de la industria automotriz, y se aproximan bastante a los valores de la norma AISI-SAE, para aceros 1008.

A manera de referencia se ilustra la composición química típica de este acero.

C%	Mn%	P%	Si%
0.10 máx.	0.3-0.5 máx	0.04 máx	0.05 máx.

Se concluye que al parecer en la lámina nacional el control se dirige sólo al porcentaje de C debido a que es el único componente que se mantiene dentro de norma, mientras que el Mn y el Si son significativamente altos comparados con la norma. Esto no es bueno para las propiedades del acero, debido a que altos porcentajes de Si ( del análisis químico 0.13%) afectan la ductilidad del acero, provocando que su resistencia a la tracción disminuya.

De esto se desprende la necesidad de evaluar los procesos y métodos de fabricación de la chapa de acero nacional, para compararlos con sus similares de la industria siderúrgica de U.S.A. y Japón.

Durante la evaluación de los procesos siderúrgicos nacionales y extranjeros, se encontró que estamos en total desventaja. Se proponen algunas mejoras al proceso:

◆ **Fusión:** durante el proceso de desoxidación con aluminio pueden existir deficiencias, debido a que altos niveles de FeO en el convertidor generan cantidades apreciables de alúmina  $Al_2O_3$  cuando se desoxida el acero con aluminio. La alúmina permanece como inclusiones reduciendo la ductilidad de la chapa. Para eliminar esto se recomienda la inyección de gases inertes desde el fondo del convertidor.

◆ **Pre calentamiento:** Para mejorar en este proceso lo ideal sería cambiar los convencionales hornos “empujadores” por hornos más eficientes, como los llamados de “viga móvil”. Sin embargo, estos últimos son muy costosos por lo que se recomienda para los hornos empujadores actuales, controlar de manera más eficiente y precisa la temperatura, así como, el tiempo de permanencia del material en el horno, para garantizar la disolución de los nitruros de aluminio, y evitar la formación excesiva de capa de óxido.

◆ **Laminación en caliente:** En esta etapa se recomienda mayor control en la temperatura de enrollado. Este parámetro debe controlarse en rangos más cerrados para evitar que a temperaturas altas (700° C) se precipiten nitruros, evitando así el envejecimiento; y a temperaturas bajas (300° C) para evitar mantener grandes cantidades de nitrógeno en soluciones sobresaturadas, evitando así que se precipite éste durante el recocido, y forme nitruros que fragilizan la estructura del acero en algunas áreas específicas del material.

◆ **Laminación en frío:** Se recomienda un control más preciso de las deformaciones y número de pasadas de los trenes laminadores, para eficientar éste proceso se deben instalar sistemas de control de malla cerrada a base de tecnología laser para controlar eficientemente las deformaciones.

◆ **Recocido de recristalización:** Para mejorar en este aspecto lo ideal sería cambiar los actuales hornos de recocido por lotes del tipo campana (Batch Annealing Furnace) por hornos de recocido continuo (Continuos Annealing and Processing Line). Pero esto no es posible por el alto costo de las instalaciones de recocido continuo, sin embargo, se recomienda que a los hornos de recocido por lotes del tipo campana se les instalen sistemas infrarrojos automáticos de control de temperatura, para conocer y determinar de forma precisa los ciclos de recocido adecuados.

◆ **Paso acabador:** En esta etapa lo más importante es controlar el grabado de los cilindros de los trenes de laminación, para lograr que la rugosidad y el espesor de la chapa sean uniformes. Para este proceso se recomienda emitir normas que regulen y estandaricen los métodos para grabar los cilindros de los trenes acabadores de laminación.

### 4.3 RUGOSIDAD.

Considerando como referencia los valores de rugosidad exigidos a la lámina de acero por la industria automotriz, determinados en la práctica, tenemos que el valor más característico es el parámetro Ra (rugosidad media aritmética) debe estar comprendida entre 1.2 y 2.4  $\mu\text{m}$ .

Cuando la superficie de la chapa de acero presenta grandes valores de rugosidad (mayor a 2.5  $\mu\text{m}$ ) la superficie del material tiende a “agarrarse” a las herramientas de embutido provocando la ruptura prematura del material. Por otro lado cuando la rugosidad es menor a 1.2  $\mu\text{m}$ , el material no permite la adherencia de los productos de lubricación empleados durante los procesos de embutido profundo.

Se realizaron 10 ensayos de rugosidad a cada tipo de lámina. A continuación se presentan los valores promedio de las mediciones para un análisis final.

TABLA 4.1 RESUMEN COMPARATIVO DE RUGOSIDAD PROMEDIO DE LAMINAS:	
Lámina #1 (procedencia U.S.A)	El valor promedio de rugosidad de superficie obtenido en los ensayos es $Ra=1.2 \mu\text{m}$ . (ver tabla 3.3, página 27) variación de 8.3% con respecto a la medición mínima $Ra=1.1 \mu\text{m}$ y de 15% con respecto a la medición máxima $Ra=1.38 \mu\text{m}$ . Por lo que se concluye que cumple con la exigencias del mercado automotriz y de embutido profundo.
Lámina #2 (procedencia Canadá)	El valor promedio de rugosidad de superficie obtenido en los ensayos es $Ra=1.5 \mu\text{m}$ . (ver tabla 3.3 página 27) variación de 18% con respecto a la medición mínima $Ra=1.23 \mu\text{m}$ y de 12% con respecto a la medición máxima $Ra=1.68 \mu\text{m}$ . Por lo que se concluye que cumple con la exigencias del mercado automotriz y de embutido profundo.
Lámina #3 (procedencia Japón)	El valor promedio de rugosidad de superficie obtenido en los ensayos es $Ra=1.1 \mu\text{m}$ . (ver tabla 3.3 página 27) variación de 6% con respecto a la medición mínima $Ra=1.06 \mu\text{m}$ y

de 11% con respecto a la medición máxima $Ra=1.22 \mu\text{m}$ . Por lo que se concluye que cumple con la exigencias del mercado automotriz y de embutido profundo.
Lámina #4 (procedencia México) El valor promedio de rugosidad de superficie obtenido en los ensayos es $Ra=3.1 \mu\text{m}$ . (ver tabla 3.3 página 27) variación de 20% con respecto a la medición mínima $Ra=2.5 \mu\text{m}$ y de 26% con respecto a la medición máxima $Ra=3.9 \mu\text{m}$ . Por lo que se concluye que No cumple con la exigencias del mercado automotriz y de embutido profundo.
Donde: $Ra$ = promedio de alturas de pico a valle.

Tabla 4.1. Resumen de rugosidad de superficie y conclusiones.

Como se observa en los parámetros  $Ra$ ,  $Rz$  y  $R_{\text{máx}}$  de la tabla 3.3, las tres láminas de procedencia extranjera presentan un comportamiento muy uniforme (ver tablas y gráficas de rugosidad de superficie, sección 3) y dentro de las exigencias de la industria automotriz.

De acuerdo a la práctica la rugosidad media aritmética debe estar entre  $1.2 \mu\text{m}$  y  $2,4 \mu\text{m}$ , y las tres láminas provenientes del extranjero cumplen con ésta exigencia.

Por lo que se concluye que las tres láminas del extranjero cumplen con las exigencias de los procesos de embutido profundo, y por consecuencia debido a su rugosidad controlada mantendrán partículas de lubricación entre su superficie y las herramientas de embutido, evitando así adelgazamientos de espesor y fracturas prematuras.

La lámina de procedencia nacional presenta gran variación y falta de continuidad en la rugosidad de la superficie. Esto debe ser resultado del proceso de fabricación y grabado de los rodillos acabadores de los laminadores nacionales. Estos generalmente son grabados mediante el proceso de granallado, el cual no es controlable y por tanto difícilmente reproducible.

Para mejorar en este aspecto es necesario planear, diseñar y publicar normas que estandarizen la fabricación y proceso de grabado de los rodillos mencionados, para disminuir las desventajas ante los mercados siderúrgicos mundiales.

#### **4.4 GRABADO DE MALLA DE CIRCULOS.**

En este concepto el comentario es para las plantas de estampado automotriz nacionales, que no cuentan todavía con equipo para el grabado de malla circular, para que adquieran equipo y entrenamiento para grabado de malla circular para análisis de deformaciones, y el análisis de resultados. Para que las decisiones que se realicen en los procesos de estampado, sea con base en información veraz y oportuna.

La situación actual es que sólo algunas de las estampadoras automotrices ubicadas en México ha invertido en equipo y desarrollo de su personal en esta importante área. Mientras que la mayoría de las estampadoras nacionales no cuenta con él equipo y por tanto ha desaprovechando el gran potencial y ayuda que éste método representa.

En las plantas estampadoras nacionales la opinión referente al equipo y al método es que la inversión es alta y que se requiere de bastante tiempo para el entrenamiento de los recursos humanos, así como, los resultados de esta prueba no se obtienen inmediatamente, debido a que requiere de un análisis de deformaciones posterior a los ensayos o pruebas.

Tratando de obtener mayor información sobre los equipos se investigó también el coste del equipo, fabricado en U.S.A. el cual es \$46,000 U.S.A dólares, incluye 4 juegos de stencils, líquido limpiador, electrólito y entrenamiento por 4 días en planta del comprador.

Se debe de considerar que la inversión requerida para adquirir el equipo y entrenamiento no representa un monto significativo, comparado con las ventajas que se pueden obtener de él. También es importante recordar que la calidad cuesta pero ser el mejor en el mercado competitivo no tiene costo, por que toda inversión bien planeada siempre representa ganancia máxima.

#### 4.5 ENSAYO DE TRACCION E INDICE DE ANISOTROPIA.

Se realizarón 63 ensayos de tracción de acuerdo a la norma ASTM E-8. A continuación se muestran los valores promedio de un ensayo realizados a las láminas, en sus direcciones 0°, 45 ° y 90° con respecto a la dirección de laminado (ver tablas, apéndice).

En las tablas de resultados siguientes se identificarón los valores máximos de cada columna en “negritas” para su fácil identificación.

##### ◆ Resultados y conclusiones de lámina #1:

TABLA 4.2. COMPARATIVA LAMINA #1, ORILLA INFERIOR DEL ROLLO.				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice “r”
Probeta a 0°	23.09	27.20	3.10	<b>1.31</b>
Probeta a 45°	<b>24.38</b>	<b>28.70</b>	<b>3.20</b>	1.30
Probeta a 90°	23.60	27.80	3.15	1.28
Promedio	23.69	27.90	3.19	1.30
Desv. Estandard	0.6	0.8	0.1	0.02

Tabla 4.2. Resultados de tracción promedio, lámina #1 probetas orilla inferior del rollo.

TABLA 4.3 COMPARATIVA LAMINA #1, ZONA MEDIA DEL ROLLO.				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice “r”
Probeta a 0°	24.87	29.26	3.13	<b>1.33</b>
Probeta a 45°	24.67	29.02	<b>3.20</b>	1.29
Probeta a 90°	<b>25.98</b>	<b>29.39</b>	3.03	1.28
Promedio	24.84	29.22	3.12	1.30
Desv. Estandard	0.7	0.2	0.9	0.03

Tabla 4.3. Resultados de tracción promedio, lámina #1 probetas zona media del rollo.

Analizando los datos promedios de 18 ensayos realizados a la lámina #1 (tablas 4.2 y 4.3) de dos zonas distintas (orilla inferior y zona media) del ancho del rollo, se observa que las propiedades mecánicas del material presentan isotropía plana, es decir, sus propiedades no cambian o dependen de las direcciones.

Se concluye que la zona media del rollo (deformación promedio 29.22%) presenta propiedades mecánicas más homogéneas, y más altas en valor que su similar de la orilla inferior (deformación 27.90%).

La teoría explica que la dirección con mejores propiedades debe ser la dirección 0° o dirección de laminación. De lo que se concluye que la ligera tendencia de los valores altos en la dirección 45° debe ser provocada por errores de paralaje en las mediciones.

El que el índice de anisotropía sea mayor en valor en la dirección 0° para ambas zonas del ancho de rollo y mayor a 1.0 en todas las direcciones, confirma que el material no tenderá a reducir su espesor de manera prematura, y no tenderá a formar defectos conocidos como “orejas”, en el embutido profundo.

La condición en conjunto de las propiedades del material nos proporciona bases para decir que la lámina se deformará de manera homogénea, concluyendo que es \_ recomendada y adecuada para embutido profundo.

◆ Resultados y conclusiones de lámina #2:

TABLA 4.4 COMPARATIVA LAMINA #2, ORILLA INFERIOR DE ROLLO				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice “r”
Probeta a 0°	<b>22.80</b>	<b>26.80</b>	<b>3.48</b>	1.23
Probeta a 45°	21.52	25.26	3.41	1.20
Probeta a 90°	21.81	25.68	3.32	<b>1.26</b>
Promedio	22.04	25.91	3.4	1.23
Desv. Estandard	0.7	0.8	0.4	0.03

Tabla 4.4. Resultados de tracción promedio, lámina #2 probetas orilla inferior del rollo.

TABLA 4.5. COMPARATIVA LAMINA #2, ORILLA SUPERIOR DE ROLLO				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice “r”
Probeta a 0°	<b>22.32</b>	<b>26.27</b>	<b>3.53</b>	1.22
Probeta a 45°	22.12	26.03	3.50	<b>1.26</b>
Probeta a 90°	21.81	25.65	3.32	1.21
Promedio	22.08	25.98	3.45	1.23
Desv. Estandard	0.3	0.3	0.1	0.03

Tabla 4.5. Resultados de tracción promedio, lámina #2 probetas orilla superior del rollo.

Para analizar la lámina #2 se realizaron 17 ensayos de tracción en dos zonas diferentes del ancho de rollo, a saber, orilla inferior y orilla superior con el objetivo de estudiar el comportamiento y las propiedades de las orillas del rollo.

De los resultados promedio (tablas 4.4 y 4.5) obtenidos para ambas zonas de la lámina bajo estudio, y de las diferentes direcciones analizadas en cada zona, se concluye que las propiedades mecánicas del material presentan isotropía plana, es decir, sus propiedades no cambian o dependen de las direcciones.

La ligera tendencia de las propiedades con valores máximos en la dirección 0°, confirma la teoría que explica que la dirección con mejores propiedades es la dirección 0°.

El que el índice de anisotropía sea mayor en valor en la dirección 45° para ambas zonas, puede ser debido a la difícil identificación del inicio del cuello de fractura en las probetas y en general a errores de paralaje en la medición de las deformaciones.

Como el índice de anisotropía es mayor a 1.0 en todas las direcciones de ambas zonas. Indica que el material no tenderá a reducir su espesor de manera prematura, y no tenderá a formar defectos del tipo “orejas”, en el embutido profundo.

Se concluye que ambas orillas de la lámina #2 presentan propiedades mecánicas similares, con deformaciones homogéneas promedio proximas al 26.0%. El material presenta un buen control de las propiedades, lo que es reflejo de un buen control del proceso de fabricación.

La condición en conjunto de las propiedades del material nos proporciona bases para decir que se deformará de manera homogénea en el plano, y que es recomendado y adecuado para embutido profundo.

◆ Resultados y conclusiones de lámina #3:

TABLA 4.6. COMPARATIVA LAMINA #3, ZONA ORILLA INFERIOR DE ROLLO				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice “r”
Probeta a 0°	<b>25.8</b>	<b>30.4</b>	<b>3.3</b>	<b>1.4</b>
Probeta a 45°	25.2	29.7	3.1	1.3
Probeta a 90°	24.4	28.7	3.2	1.3
Promedio	25.1	29.6	3.2	1.3
Desv. Estandar	0.7	0.9	0.1	0.1

Tabla 4.6. Resultados de tracción promedio, lámina #3 probetas orilla inferior del rollo.

TABLA 4.7. COMPARATIVA LAMINA #3, ZONA MEDIA DE ROLLO				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice "r"
Probeta a 0°	<b>25.0</b>	<b>29.4</b>	3.0	1.3
Probeta a 45°	24.5	28.9	<b>3.2</b>	<b>1.3</b>
Promedio	24.8	29.1	3.1	1.3
Desv. Estandard	0.2	0.3	0.1	0.0

Tabla 4.7. Resultados de tracción promedio, lámina #3 probetas zona media del rollo.

TABLA 4.8. COMPARATIVA LAMINA #3, ZONA ORILLA SUPERIOR DE ROLLO				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice "r"
Probeta a 90°	24.40	28.71	3.22	1.248
Promedio	24.40	28.71	3.22	1.248
Desv. Estandard	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 4.8. Resultados de tracción promedio, lámina #3 probetas orilla superior del rollo.

Para caracterizar la lámina #3 en tres zonas diferentes (orilla inferior, zona media, orilla superior) del ancho de rollo, se realizarán 15 ensayos.

La lámina #3 presenta propiedades mecánicas homogéneas en las tres zonas del ancho del rollo analizadas, las propiedades tampoco se ven afectadas por las direcciones analizadas, por lo que se puede decir que el material presenta isotropía plana en el ancho del rollo.

El que el índice de anisotropía sea mayor en valor en la dirección 45° para la zona media, es debido a errores de paralaje en la medición de las deformaciones. Sin embargo, el que el índice sea mayor a 1.0 en todas las direcciones, confirma que el material no tenderá a reducir su espesor de manera prematura en el embutido profundo.

Se concluye que las tres zonas de la lámina presentan propiedades mecánicas similares, por lo que se deduce que este material presenta un buen control de las propiedades, lo que es reflejo de un buen control del proceso de fabricación.

La condición en conjunto de las propiedades del material nos proporciona bases para concluir que se deformará de manera homogénea, y que es recomendado para embutido profundo.

◆ Resultados y conclusiones de lámina #4:

TABLA 4.9. COMPARATIVA LAMINA #4, ZONA MEDIA DE ROLLO				
Dirección	Desplazam.(mm)	Deform. (%)	Carga (KN)	Indice "r"
Probeta a 0°	<b>20.21</b>	<b>25.38</b>	<b>3.51</b>	1.17
Probeta a 45°	19.78	24.72	3.51	<b>1.18</b>
Probeta a 90°	18.42	23.03	3.45	1.16
Promedio	19.47	24.34	3.49	1.17
Desv. Estandard	0.76	0.96	0.04	0.01

Tabla 4.9. Resultados de tracción promedio, lámina #4 probetas zona media del rollo.

Para ésta lámina sólo se tienen datos de la zona media. Se realizaron 9 ensayos de tracción para caracterizar la zona media del material.

En ésta lámina la variación de las propiedades con respecto a la dirección de estudio es más sensible ( variación del 2.35% entre la dirección 0° y 90°) en referencia con las láminas provenientes del extranjero.

El que el índice de anisotropía sea mayor en la dirección 45°, podría ser debido a la falta de equipo para medir la deformación real o a errores de paralaje. Sin embargo, el que el índice sea mayor a 1.0 en todas las direcciones, confirma que el material no tenderá a reducir su espesor de manera prematura.

Por lo que teóricamente éste material es recomendable para embutido profundo. Sin embargo, comparando éste con sus similares extranjeros, existe una clara y gran diferencia en los valores de las propiedades, ya que mientras los valores de deformación para esta lámina no sobrepasan el 24.34% y 20.0 mm de desplazamiento, sus similares provenientes del extranjero alcanzan hasta 29.6% de deformación y 25.2 mm de desplazamiento..

De esto se deduce que éste material debe ser sometido a condiciones menos críticas de deformación, que sus similares provenientes del extranjero, es por esto que es utilizado para embutir refuerzos de formas no complicadas.

#### 4.6 ENSAYO DE EMBUTIDO:

Considerando como parámetros más representativos de éste ensayo con fines comparativos de conformabilidad de la chapa, a la medida de la altura de copa que las probetas alcanzan antes de la fractura, y la carga que se requiere para deformar la chapa hasta que la fractura se presente.

El razonamiento para elegir estos parámetros es basado en que la altura de copa proporciona información de los porcentajes y límites máximos que la chapa se puede deformar antes de la fractura, y la carga nos indica que tan fácilmente se puede deformar la chapa, este parámetro es muy importante para el diseño de las capacidades de carga de las prensas de embutido profundo.

El parámetro de carga nos indica que cuando la carga para deformar la lámina es pequeña la resistencia de la lámina es mínima, e implica que no se alcancen niveles adecuados de seguridad en los vehículos.

Para obtener las lecturas de las deformaciones se dibujó una escala en donde se representan, los diferentes porcentajes de deformación, posteriormente se imprimió sobre un material plástico transparente flexible, para que durante las lecturas la escala se pueda adaptar fácilmente a la forma de la copa y así realizar de manera directa las lecturas de las deformaciones, eliminando así un porcentaje el error debido a paralaje.

Un inconveniente observado en la experimentación es detectar la proximidad de la fractura, para detener la carga y evitar mayor deformación en las probetas, así como, no es sencillo realizar las lecturas de las deformaciones aun si se utiliza la regla graduada flexible, debido a que la escala no se adapta a los cambios bruscos de dirección de las probetas.

Adicionalmente el brillo natural de la chapa en conjunto con el reflejo del plástico, y el tono grisáceo de la malla de círculos, se conjuntan para perder o equivocar fácilmente la lectura por el brillo, además la fatiga visual se sucede rápidamente, provocando mediciones con error debidas a paralaje. Un inconveniente más es que el tiempo de ejecución de lectura es muy prolongado, aproximadamente 3 horas por cada copa a analizar.

Análisis de resultados:

◆ Resultados y conclusiones de lámina #1:

TABLA 4.10. COMPARATIVA LAMINA #1.		
Zona del rollo.	Carga (Ton.)	Altura copa (mm.)
Orilla inferior.	1.85	11.287
Zona media.	1.86	11.23
Promedio	1.86	11.26
Desv. Estandard	0.007	0.04

Tabla 4.10. Resultados de ensayo embutido promedio, lámina #1.

De los datos de resultados de la tabla 4.10 referentes a la lámina #1 de las dos zonas de la lámina del ancho de rollo bajo estudio, se observa que los valores de carga y altura son homogéneos para las dos zonas analizadas. Esto confirma la isotropía plana y el índice de anisotropía determinados en el ensayo de tracción.

Comparando la carga aplicada en el ensayo y la altura de copa alcanzada al deformar la lámina #1 antes de la fractura, con sus similares obtenidos de ensayos en lámina de consumo nacional de uso general del mismo calibre tenemos:

Carga promedio para ensayo de embutido, lámina nacional de uso general=1.09Ton.

Altura de copa antes de la fractura, lámina nacional de uso general = 9.19 mm.

Por lo que se concluye que la carga requerida en el ensayo para deformar la lámina #1 de uso automotriz es mayor en 763 Kg (41.08%).

De forma análoga, se concluye que la altura de copa de la lámina #1 de uso automotriz es superior en 2.07 mm. (18.40%).

El que la chapa de uso automotriz requiera de mayor carga para deformarse se explica en la necesidad de que en las colisiones de los vehículos por razones de seguridad de sus ocupantes, se requiere que la lámina absorba grandes cantidades de carga con grandes deformaciones, para evitar que el impacto llegue a lesionar a los ocupantes de los vehículos.

En resumen, esta lámina se deforma de manera homogénea en las dos zonas del ancho del rollo analizadas, la reducción de espesor debido a la deformación es homogénea logrando así alturas de copa aceptables, y tampoco forma defectos del tipo "orejas". Por lo que se concluye que el material es adecuado para procesos de embutido profundo.

◆ Resultados y conclusiones de lámina #2:

TABLA 4.11. COMPARATIVA LAMINA #2.		
Zona del rollo.	Carga (Ton.)	Altura copa (mm.)
Orilla inferior.	1.86	11.33
Zona media.	1.90	11.44
Promedio	1.88	11.39
Desv. Estandard	0.02	0.06

Tabla 4.11. Resultados de ensayo embutido promedio, lámina #2.

La tabla 4.11 resume los datos de los 12 ensayos de embutido realizados a la lámina #2. Se observa que los datos de carga y altura de copa son muy similares para ambas zonas analizadas del material.

Este ensayo confirma la conclusión obtenida en los ensayos de tracción, “las propiedades mecánicas del material no varían en el ancho del rollo y se deforma de manera uniforme”.

Comparando la carga y la altura de copa de la lámina #2 antes de la fractura, con los de la lámina de consumo nacional de uso general del mismo calibre tenemos:

Carga promedio para ensayo de embutido, lámina nacional de uso general=1.09Ton.

Altura de copa antes de la fractura, lámina nacional de uso general = 9.19 mm.

Por lo que se concluye que la carga requerida en el ensayo para deformar la lámina #2 de uso automotriz es mayor en 790 Kg (42.02%).

De forma análoga, se concluye que la altura de copa de la lámina #2 de uso automotriz es superior en 2.2 mm. (19.31%).

La lámina de uso automotriz requiere de mayor carga para deformarse por que su resistencia mecánica es mayor. Por razones de seguridad de los ocupantes de los vehículos se requiere que la lámina absorba grandes cantidades de carga, con grandes deformaciones, para evitar que el impacto llegue a lesionar a los ocupantes de los vehículos.

En conclusión esta lámina presenta ligeras mejoras en sus propiedades que la anterior analizada, lámina #1. Se deforma de manera homogénea en las dos zonas del ancho del rollo analizadas y no tiende a reducir su espesor de manera prematura, tampoco se presentan los defectos del tipo “orejas”. Por lo que se concluye que el material es adecuado para procesos de embutido profundo.

◆ Resultados y conclusiones de lámina #3:

TABLA 4.12. COMPARATIVA LAMINA #3.		
Zona del rollo.	Carga (Ton.)	Altura copa (mm.)
Orilla inferior.	1.94	11.44
Zona media.	1.98	11.33
Promedio	1.96	11.39
Desv. Estandard	0.03	0.06

Tabla 4.12. Resultados de ensayo embutido promedio, lámina #3.

De los datos de resultados referentes a la lámina #3 de las dos zonas del ancho de rollo analizadas, se observa que los valores de carga y altura son similares en las dos zonas analizadas. Esto confirma la isotropía plana y el índice de anisotropía determinados en el ensayo de tracción.

Comparando la carga aplicada y la altura de copa alcanzada por la lámina #3 antes de la fractura, con sus similares de lámina de consumo nacional de uso general del mismo calibre tenemos:

Carga promedio para ensayo de embutido, lámina nacional de uso general=1.09Ton.

Altura de copa antes de la fractura, lámina nacional de uso general = 9.19 mm.

Se concluye que la carga aplicada en el ensayo para deformar la lámina #3 de uso automotriz es mayor en 829 Kg ( 44.11%).

De forma análoga, se concluye que la altura de copa de la lámina #1 de uso automotriz es superior en 2.2 mm. (19.31%).

El que la chapa de uso automotriz requiera de mayor carga en el ensayo es debida, a que en las colisiones de los vehículos por razones de seguridad de sus ocupantes, se requiere que la lámina absorba grandes cantidades de carga con grandes deformaciones, para evitar que el impacto llegue a lesionar a los ocupantes de los vehículos.

En resumen esta lámina presenta mayor resistencia (requiere de más carga en el ensayo) que las analizadas anteriormente, manteniendo buena ductilidad. Se deforma de manera homogénea en las dos zonas del ancho del rollo analizadas, no reduce su espesor prematuramente y no forma defectos del tipo “orejas”. Por lo que se concluye que el material es adecuado para procesos de deformación de embutido profundo.

◆ Resultados y conclusiones de lámina #4:

TABLA 4.13. COMPARATIVA LAMINA #4.		
Zona del rollo.	Carga (Ton.)	Altura copa (mm.)
Zona media.	1.34	10.30
Promedio	1.34	10.30
Desv. Estandard	0.0	0.0

Tabla 4.13. Resultados de ensayo embutido promedio, lámina #4.

De los datos analizados de la lámina (ver sección 3.4) de procedencia nacional se concluye que la deformabilidad del material es homogénea en la zona media del rollo.

Se observa que las propiedades mecánicas son inferiores a las de sus similares de procedencia extranjera, pero si realizamos la comparación con respecto a la lámina nacional de uso general del mismo calibre, las propiedades son relevantes:

Carga promedio para ensayo de embutido, lámina nacional de uso general=1.09Ton.

Altura de copa antes de la fractura, lámina nacional de uso general = 9.19 mm.

Se concluye que la carga aplicada en el ensayo para deformar la lámina #3 de uso automotriz es mayor en 240 Kg ( 17.92%).

De forma análoga, se concluye que la altura de copa de la lámina #1 de uso automotriz es superior en 1.2 mm. (10.77%).

Pero estos los valores superiores mostrados por la lámina nacional para embutido profundo, no son tan significativos si los comparamos con los porcentajes de sus similares del extranjero. Sin embargo, una importante ventaja de ésta lámina es que su deformación es homogénea y no presenta tendencia a reducir su espesor de manera prematura, los defectos del tipo “orejas” son imperceptibles.

Estas condiciones proporcionan bases para concluir que la lámina de procedencia nacional para embutido profundo, debe ser sometida a condiciones de deformación menos severas que sus similares del extranjero, esto explica por qué su aplicación se limita a refuerzos de partes interiores de formas no complicadas.

## 4.7 ENSAYO DE EMBUTIDO PROPUESTO

A partir de los resultados previamente analizados y con base en observaciones y los datos obtenidos del ensayo de embutido, se propone un ensayo que intenta eficientar los tiempos y los datos de la prueba, ya que actualmente en los laboratorios de pruebas, nacionales sólo se cuenta con herramental para ensayos Erichsen (Olsen).

El ensayo Erichsen (Olsen) presenta la problemática que únicamente genera deformaciones positivas en las muestras, es decir, el eje menor de las elipses siempre es mayor que el diámetro del círculo original, por lo que sólo se cubre la porción positiva del diagrama de límite de formado. Por esto siempre es necesario realizar ensayos de tracción para encontrar las deformaciones negativas del material.

En conjunto éstos dos ensayos demandan el doble de tiempo en preparación de muestras, ejecución de ensayos y análisis de resultados. El ensayo que se propone intenta obtener deformaciones positivas y negativas en un mismo ensayo, es decir, se intenta formar la copa que se produce en el ensayo Olsen-Erichsen, combinandola con procesos de deformación a tracción biaxial en las zonas inclinadas y zonas planas (ver figura 4.1).

El ensayo propuesto intenta ser más complejo que los ensayos actualmente utilizados en los laboratorios de pruebas, para aproximar en la medida de lo posible a los ensayos de laboratorio con las deformaciones de los procesos reales de embutido, aunque debemos de ser realistas, no existe actualmente ningún ensayo que simule fielmente el comportamiento de la chapa de acero, en la etapa de deformación dentro de las herramientas de embutido. Los modelos matemáticos más completos creados para simular el comportamiento del material, en su etapa de deformación, tampoco han llegado al nivel de representar fielmente la realidad.

Es por esta razón que se gastan miles de millones de dolares, y años o meses en los ajustes de las herramientas para estampado, para dar mayor eficiencia al flujo de material y evitar las fractura prematuras del material. Los modelos matemáticos más completos creados para simular el comportamiento del material, en su etapa de deformación, tampoco han llegado al nivel de representar fielmente la realidad.

Es por esto que este ensayo intenta ser una ayuda adicional durante la etapa de laboratorio para pruebas de caracterización de la chapa, pero no intenta ser la solución a todos los problemas de los procesos de deformación de la chapa de acero.

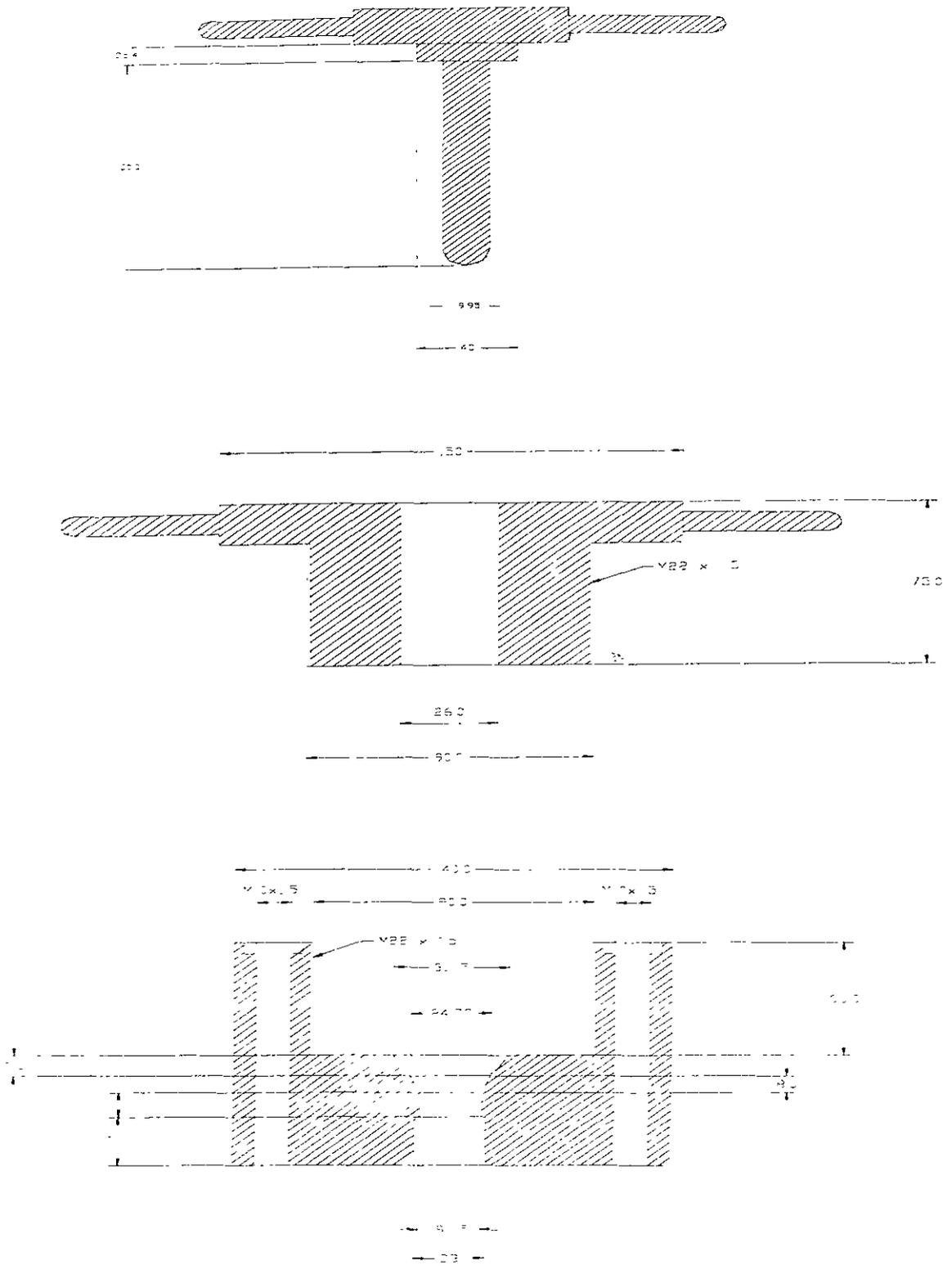


Figura 4.1. Dimensionamiento del herramental propuesto.

## 4.8 CONCLUSION:

◆ El caracterizar y determinar los diagramas de límite de formado para lámina de uso automotriz, nos permite entender más acerca del comportamiento de las propiedades mecánicas de éstas, así como para entender el por qué de su aplicación.

◆ De acuerdo a los ensayos y pruebas realizadas a las diferentes láminas provenientes del extranjero, a saber: lámina #1 (procedencia U.S.A.), lámina #2 (procedencia Canada), lámina #3 (procedencia Japón), se concluye de las propiedades observadas y de los datos obtenidos; que las tres láminas analizadas presentan propiedades muy similares, y aceptables para los procesos de embutido profundo.

◆ La lámina #3 (procedencia Japón) presenta propiedades mecánicas ligeramente superiores, en tanto que la lámina #4 (procedencia México) presenta deficiencias en comparación de sus similares del extranjero. Esto es atribuible tanto al rezago tecnológico de los equipos como al deficiente control del proceso de fabricación de lámina nacional.

◆ Simular procesos por medio de ensayos de laboratorio es una herramienta poderosa e importante para entender la compleja interacción de los materiales en los procesos. Este trabajo nos ayuda a entender la compleja interacción de la chapa de acero con las herramientas de embutido durante los procesos de deformación de la chapa.

◆ Para la prueba de tracción no se tiene extensómetro para medir de manera exacta la deformación real del ancho y largo de las probetas, por lo que el índice de anisotropía se cálculo de manera teórica con posible error de paralaje.

◆ Durante los ensayos de embutido (Erichsen) se encontraron algunos inconvenientes que limitan la simulación de los procesos reales de estampado. Uno de estos inconvenientes es que el punzón es esférico y de dimensiones pequeñas, por lo que no representa la compleja forma y geometría de las herramientas reales de estampado, así como, la falla del material siempre se presenta en la misma zona; por lo que se deduce que el punzón presenta áreas de concentración de esfuerzos en el área denominada “línea de impacto de herramienta”. Para evitar esto se recomienda incrementar los radios de punzón y matriz, y mejorar la lubricación.

◆ Otro inconveniente es que el inicio de la fractura es muy difícil de apreciar, en consecuencia en algunos ensayos la carga aplicada se detiene hasta que la fractura se presentó. Esto provoca que exista una abertura en el material que evita la medición directa de las deformaciones.

◆ En los ensayos de embutido, debido a la geometría del punzón el material de lubricación se escurre fuera del área de contacto, provocando que por efecto de fricción la lámina se “agarre” al herramental y se produzca la fractura. En los procesos reales de estampado, el material de lubricación se escurre hacia los radios beneficiando estas áreas que es donde precisamente más lubricación se requiere.

◆ Debido a las reducidas dimensiones del punzón (22 mm en ensayo estandar y 20 mm en nuestro laboratorio) se dificulta medir las deformaciones, que en conjunto con la reflexión de los materiales, provocan variaciones debidas a errores de paralaje. De hecho el grupo de investigación de estampado profundo (Deep Drawing Research) ha encontrado variación de hasta +/- 12% en la comparación de resultados de diferentes laboratorios para un mismo lote de material. [Referencia. 4].

◆ En el ensayo Erichsen sólo se obtienen deformaciones positivas, por lo que resulta necesario ensayar probetas a tracción para obtener deformaciones negativas, para completar así el gráfico de límite de formado. Esto duplica el tiempo de ensayos y obtención de resultados, tiempo que es crítico y valioso para la industria.

◆ Por lo anterior se resume que este ensayo no simula las condiciones reales de las deformaciones de los procesos reales de estampados.

◆ Las curvas de los diagramas de límite de formado “DLF” obtenidos, son muy similares a los típicos de la literatura, Estas curvas no fueron manipuladas por regresiones matemáticas para su ajuste o aproximación, la gran similitud con los “DLF” típicos es debida a la gran cantidad de datos analizados, por lo que se puede recomendar su aplicación en el control de calidad de la materia prima o del producto, considerando un margen de seguridad por los inconvenientes de los ensayos anteriormente expuestos, y haciendo uso de las recomendaciones que se dan en el siguiente parrafo.

◆ Se recomienda y se propone un ensayo con punzón de 19.95 mm debido a la limitante de las máquinas de aplicación de carga de los Laboratorios del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNAM. Sin embargo, la recomendación ideal sería más

enfocada a contar con máquinas de aplicación de carga de mayor capacidad, para realizar ensayos con punzones de dimensiones más grandes, como los actualmente utilizados en los laboratorios de embutido de Japón de 101.6 mm. Los anchos de las muestras deben de variar desde 160 X 160 mm hasta 160 X 75 mm para obtener variación de la deformación menor " $\epsilon_2$ " en las orillas más cortas, donde las deformaciones se desarrollan en tracción biaxial. Con este procedimiento se obtienen deformaciones positivas y negativas evitando así realizar dos ensayos diferentes.

◆ Se recomienda realizar pruebas con las herramientas de estampado para determinar la relación de deformación de eje mayor a eje menor que represente las áreas críticas de adelgazamiento y fractura de la chapa, para posteriormente simular esta condición de deformación de fractura en el laboratorio, y mantener las condiciones y parámetros de esta prueba como patrón estandar, con el objetivo de duplicar el ensayo las veces que sea necesario, y compararlo al examinar los diferentes lotes de chapa que presenten problemas de fractura o adelgazamiento en las condiciones normales de producción. En el caso de que se presente la fractura y las condiciones de deformación de la prueba maestra y la chapa examinada sean iguales, se descarten las variables que dependen del material y se resuelva el problema modificando los parámetros y variables del proceso, a saber:

Incrementando la lubricación en los radios y los pisadores del metal.

Modificando la presión del pisador.

Modificando la medida y/o geometría de la plantilla.

Incrementando la dimensión de los radios de la zona crítica.

Sustituyendo la chapa por otra con mayor índice de anisotropía, los materiales con índice entre 1.0 y 2.0 proporcionan un 10% de incremento en deformabilidad.

◆ Como se puede observar de modo general la profundidad de embutido depende de las propiedades del material, de la complejidad geométrica de la pieza, la lubricación, la interacción del material y las herramientas de embutido.

◆ Se recomienda realizar un estudio de texturas en el material en forma paralela a estos ensayos para obtener más información del comportamiento del mismo durante la deformación.

## REFERENCIAS:

- 1.-) Dieter, George. Mechanical Metallurgy. Mc Graw-Hill, Singapore 1988.
- 2.-) J. Chakrabarty. Theory of plasticity. Mc Graw-Hill, New York 1987.
- 3.-) Hosford F. W., Cadell M. R. Metal Forming, Mechanics and Metallurgy. Prentice-Hall, New Jersey 1983.
- 4.-) Ayres, Robert A. Novel Techniques in Metal Deformation Testing. U.S.A.1986.
- 5.-) A.K. Steel Co, ACME Steel Co., Bethlehem Steel Corporation, Chrysler Corporation, Dofasco Inc., Ford Motor Co, General Motor Co., U.S. Steel Co. Managing the Stamping Process, Stamping Task Force Publication, U.S.A 1991.
- 6.-) Houbaert, Yvan. Research of sheet steel metal, industrial production. Universiteit Gent, 1993.
- 7.-) Nippon Steel. Mechanical Properties of Steel, Nippon Steel U.S.A. Inc. publication, 1994.
- 8.-) O.S. Narayanaswamy & M. Y. Demeri.. Journal of Applied Metalworking, Engineering and Research Staff Ford Motor Company. Michigan 1986.
- 9.-) American Iron and Steel Institute. The Forming of Galvanized Sheet Steel, Guideline for Automotive Application. AISI, 1991.
- 10.-) American Iron and Steel Institute. Sheet Steel Formability. AISI, Whashington 1984.
- 11.-) Subimal Dinda, Stuart P. Keeler, Kenneth F. James, & Phillip A. Stine. How to Use Circle Analysis for Die Tryout. American Society for Metals, Ohio 1994.

- 12.-) D.J. Hogarth, C.A. Gregoire & S.L. Caswell. Simplified Formability Analysis for Die Development and Production. SAE, International Congress and Exposition, Detroit Michigan, 1991.
- 13.-) Harris, J. N. Mechanical Working of Metals, Pergamon Press, Oxford 1983..
- 14.-) A. Quercy. Trabajo de los Metales en Lámina. Urmo, Bilbao España, 1970.
- 15.-) Houbaert, Yvan. Producción e Investigación Científica de Chapa delgada de Acero, Universidad Austral de Chile Valdivia, 1993.

## APENDICE I.

Tablas de resultados ensayos de tracción.

Lámina 1: zona orilla inferior, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	22.2	26.1	3.1	305.2	33.9	39.8
2	23.4	27.5	3.1	305.6	33.9	39.9
3	23.7	27.9	3.1	309.6	37.8	44.5
Prom.	23.1	27.2	3.1	306.8	35.2	41.4
Des std	0.8	1.0	0.0	2.3	2.3	2.7

Tabla 1.1. Lámina #1 para costado vehículo compacto, probeta orilla inferior, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

Lámina 1: zona orilla inferior, probetas a 45°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	23.1	27.2	3.2	319.6	36.6	43.0
2	25.6	30.1	3.1	309.6	35.1	41.0
3	24.4	28.7	3.2	317.2	35.4	41.7
Prom.	24.4	28.7	3.2	315.5	35.7	42.0
Des std	1.2	1.4	0.1	5.2	0.8	0.9

Tabla 1.2. Lámina #1 para costado vehículo compacto, probeta de orilla inferior, en dirección a 45° con respecto al eje de laminación.

Lámina 1: zona orilla inferior, probetas a 90°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	23.2	27.2	3.2	314.4	36.7	43.1
2	23.7	27.9	3.1	309.6	37.0	43.5
3	23.9	28.3	3.2	311.6	35.1	41.3
Prom.	23.6	27.8	3.2	311.9	36.2	42.6
Desv st	0.4	0.5	0.0	2.4	1.0	1.2

Tabla 1.3. Lámina #1 para costado vehículo compacto, probeta de orilla inferior, en dirección transversal a 90° al eje de laminación.

Lámina 1: zona media, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	26.3	31.0	3.1	310.0	38.4	45.1
2	23.2	27.2	3.1	306.2	36.6	43.1
3	25.1	29.6	3.2	311.2	36.4	42.9
Prom.	24.9	29.3	3.1	309.1	37.1	43.7
Desv st	1.6	1.9	0.1	2.6	1.1	1.2

Tabla 1.4. Lámina #1 para costado vehículo compacto, probeta zona media, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

Lámina 1: zona media, probetas a 45°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	24.5	28.9	3.3	311.2	35.4	41.7
2	24.9	29.2	3.1	307.2	35.5	41.7
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Prom.	24.7	29.1	3.2	309.2	35.5	41.7
Desv st	0.3	0.2	0.1	2.8	0.1	0.0

Tabla 1.5. Lámina #1 para costado vehículo compacto, probeta zona media, en dirección a 45° con respecto al eje de laminación.

Lámina 1: zona media, probetas a 90°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	25.1	29.5	3.0	300.8	36.7	43.1
2	24.3	28.6	3.9	296.4	36.3	42.7
3	25.6	30.0	3.1	301.3	36.0	42.3
Prom.	25.0	29.4	3.3	299.5	36.3	42.7
Desv st	0.70	0.7	0.5	2.7	0.4	0.4

Tabla 1.6. Lámina para costado vehículo compacto, probeta zona media, en dirección transversal, a 90° al eje de laminación.

Lámina 2: orilla inferior, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	22.9	27.0	3.4	298.0	28.7	33.8
2	22.6	26.6	3.5	304.6	29.6	34.9
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Prom.	22.8	26.8	3.5	301.3	29.2	34.4
Desv st	0.2	0.3	0.1	4.7	0.6	0.8

Tabla 1.7. Lámina #2 para puertas vehículo compacto, probeta orilla inferior, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

Lámina 2: orilla inferior, probetas a 45°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	21.5	25.3	3.4	296.5	28.9	34.0
2	21.4	25.2	3.5	301.5	28.9	34.0
3	21.5	25.2	3.41	293.7	28.9	34.0
Prom.	21.5	25.2	3.4	297.2	28.9	34.0
Desv st	0.1	0.1	0.1	4.0	0.0	0.0

Tabla 1.8. Lámina #2 para puertas vehículo compacto, probeta orilla inferior, en dirección a 45° con respecto al eje de laminación.

Lámina 2: zona orilla inferior, probetas a 90°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	21.3	25.1	3.3	284.2	31.3	36.8
2	22.2	26.1	3.4	292.3	30.3	35.6
3	22.0	25.8	3.3	291.3	34.5	34.5
Prom.	21.8	25.7	3.3	289.3	32.0	35.6
Desv st	0.5	0.50	0.1	4.4	2.2	1.2

Tabla 1.9. Lámina #2 para puertas vehículo compacto, probeta orilla inferior, en dirección transversal, a 90° al eje de laminación.

Lámina 2: orilla superior, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	20.6	24.2	3.4	340.0	27.5	32.4
2	23.6	27.8	3.7	365.2	30.7	36.1
3	22.7	26.7	3.4	337.6	30.0	35.2
Prom.	22.3	26.2	3.5	347.6	29.4	34.6
Desv st	1.5	1.8	0.2	15.3	1.7	1.9

Tabla 1.10. Lámina #2 para puertas vehículo compacto, probeta de zona orilla superior, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

Lámina 2: orilla superior, probetas a 45°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	22.6	26.6	3.6	313.8	30.2	35.6
2	20.2	23.8	3.5	301.5	29.3	34.5
3	23.6	27.7	3.4	299.1	32.5	38.2
Prom.	22.1	26.0	3.5	304.8	30.7	36.1
Desv st	1.7	2.0	0.1	7.9	1.7	1.9

Tabla 1.11. Lámina #2 para puertas vehículo compacto, probeta orilla superior, en dirección a 45° con respecto al eje de laminación

Lámina 2: zona orilla superior, probetas a 90°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	21.3	25.0	3.3	284.2	31.3	36.8
2	22.1	26.0	3.4	292.3	30.3	35.6
3	22.0	25.8	3.3	291.3	29.3	34.4
Prom.	21.8	25.6	3.3	289.3	30.3	35.6
Desv st	0.4	0.5	0.1	4.4	1.0	1.2

Tabla 1.12. Lámina #2 para puertas vehículo compacto, probeta de zona media, en dirección transversal, a 90° al eje de laminación.

Lámina 3: orilla inferior, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	25.9	30.5	3.0	264.6	38.0	44.7
2	25.3	29.8	3.2	271.5	37.9	44.6
3	26.1	30.7	3.3	284.3	39.2	46.2
Prom.	25.8	30.3	3.2	273.5	38.4	45.2
Desv st	0.4	0.5	0.2	10.0	0.7	0.9

Tabla 1.13. Lámina #3 para costado vehículo largo, probeta orilla inferior, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

Lámina 3: orilla inferior, probetas a 45°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	25.5	30.0	3.2	271.8	34.3	40.3
2	25.0	29.4	3.1	263.9	35.6	41.9
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Prom.	25.3	29.7	3.2	267.9	35.0	41.1
Desv st	0.4	0.4	0.5	5.6	0.9	1.1

Tabla 1.14. Lámina #3 para costado vehículo largo, probeta orilla superior, en dirección a 45° con respecto al eje de laminación.

Lámina 3: orilla inferior, probetas a 90°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	25.5	30.0	3.1	269.4	35.6	41.8
2	23.2	27.4	3.2	275.3	32.5	38.2
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Prom.	24.4	28.7	3.2	272.4	34.1	40.0
Desv st	1.6	1.8	0.1	4.2	2.2	2.5

Tabla 1.15. Lámina #3 para costado vehículo largo, probeta orilla superior, en dirección transversal, a 90° al eje de laminación.

Lámina 3: zona media, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	24.9	29.3	3.2	273.6	34.0	40.0
2	24.7	29.1	3.2	280.1	34.4	40.4
3	25.3	29.8	3.1	267.0	33.9	39.9
Prom.	25.0	29.4	3.2	273.6	34.1	40.1
Desv st	0.3	0.4	0.1	6.6	0.3	0.3

Tabla 1.16. Lámina #3 para costado vehículo largo, probeta de zona media, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

Lámina 3: zona media, probetas a 45°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	23.5	27.6	3.1	264.9	31.9	37.5
2	25.6	30.1	3.2	275.3	35.5	41.8
3	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Prom.	24.6	28.9	3.2	270.1	33.7	39.7
Desv st	1.5	1.8	0.1	7.4	2.5	3.0

Tabla 1.17. Lámina #3 para costado vehículo largo, probeta orilla superior, en dirección a 45° con respecto al eje de laminación.

Lámina 3: zona media, probetas a 90°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	24.7	29.0	3.3	281.2	32.7	38.5
2	24.5	28.8	3.2	276.3	33.7	39.6
3	24.0	28.3	3.2	271.4	32.3	38.0
Prom.	24.4	28.7	3.2	276.3	32.9	38.7
Desv st	0.4	0.4	0.1	4.9	0.7	0.8

Tabla 1.18. Lámina #3 para costado vehículo compacto, probeta de zona media, en dirección transversal, a 90° al eje de laminación.

Lámina 4: zona media, probetas a 0°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	20.59	25.74	3.507	307.8	25.56	31.95
2	19.74	24.68	3.57	322.5	24.10	30.13
3	20.30	25.38	3.515	311.9	25.27	31.59
Prom.	20.21	25.27	3.53	314.07	24.98	31.22
Desv st	0.43	0.54	0.03	7.59	0.77	0.96

Tabla 1.19. Lámina #4 para partes interiores, probeta de zona media, en dirección paralela, a 0° al eje de laminación.

Lámina 4: zona media, probetas a 45°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	18.8	23.5	3.6	325.4	23.0	28.8
2	19.8	24.7	3.5	317.5	25.1	31.4
3	20.8	25.9	3.5	320.4	27.8	34.8
Prom.	19.8	24.7	3.5	321.1	25.3	31.7
Desv st	1.0	1.2	0.1	4.0	2.4	3.0

Tabla 1.20. Lámina #4 para partes interiores, probeta de zona media, a 45° con respecto al eje de laminación.

Lámina 4: zona media, probetas a 90°						
Probeta #	Despl Máx (mm)	Defor Máx (%)	Carga Máx. (KN)	Esfuerz Máx. (Mpa)	Despl Rupt. (mm)	Defor Rupt. (%)
1	18.3	22.9	3.5	325.0	25.1	31.3
2	18.2	22.7	3.4	312.4	24.6	30.8
3	18.8	23.6	3.4	318.7	26.5	33.1
Prom.	18.4	23.1	3.4	318.7	25.4	31.7
Desv st	0.3	0.5	0.1	6.3	1.0	1.2

Tabla 1.21. Lámina #4 para partes interiores, probeta de zona media, a 0° con respecto al eje de laminación.

Gráficas esfuerzo-deformación obtenidas de los datos de tablas.

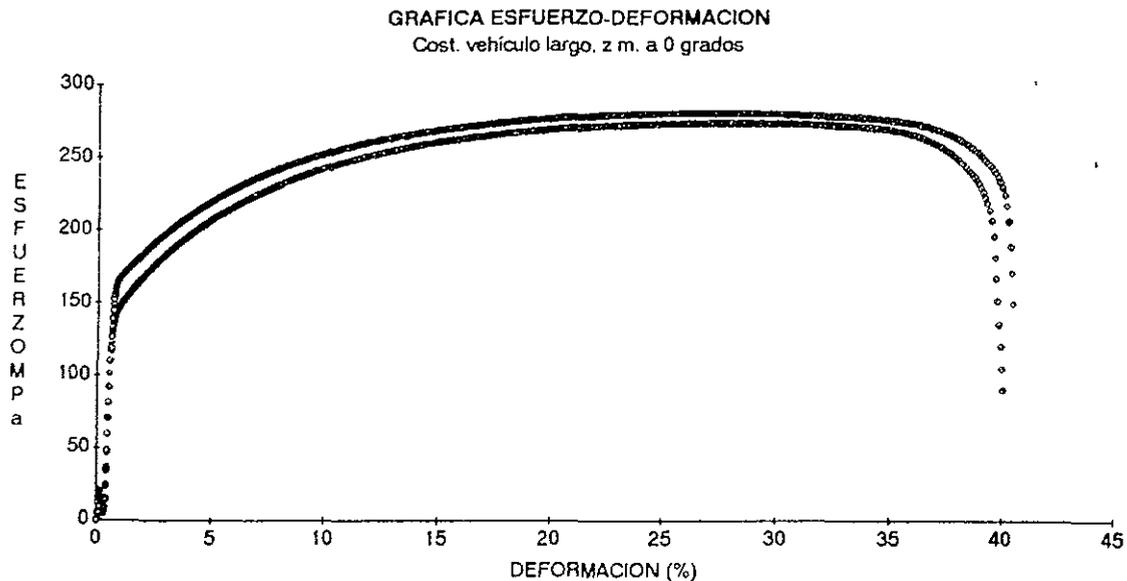


Figura 1.1. Gráfica esfuerzo-deformación, lámina para costado vehículo largo, zona media, a 0° con respecto al eje de laminación.

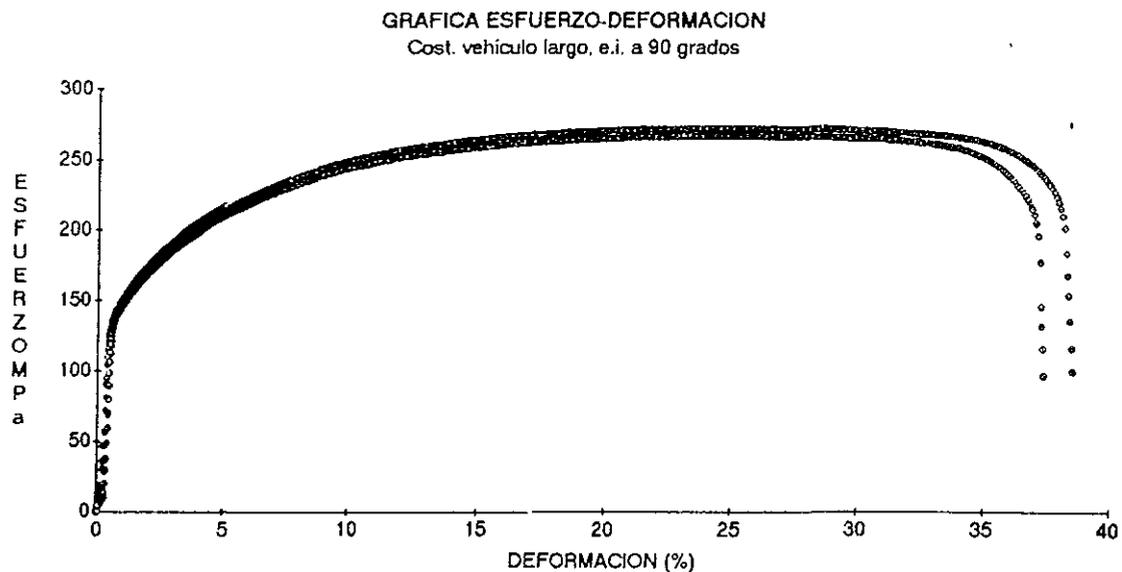


Figura 1.2. Gráfica esfuerzo-deformación, lámina para costado vehículo largo, esquina inferior, a 90° con respecto al eje de laminación.

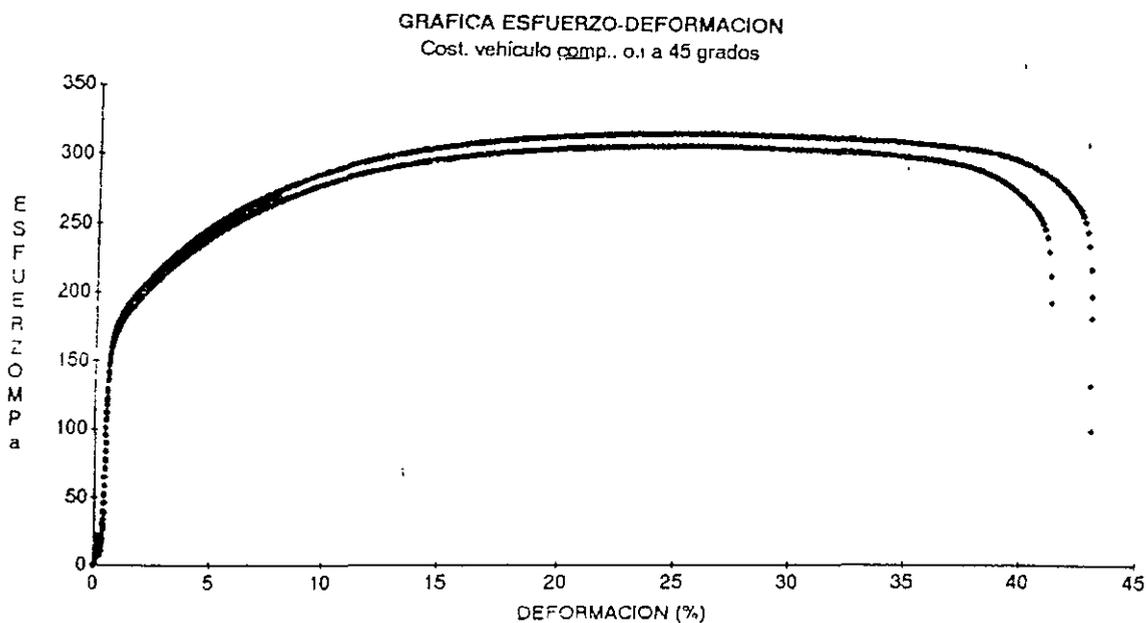


Figura 1.3. Gráfica esfuerzo-deformación, lámina para costado vehículo compacto, esquina inferior, a 45° con respecto al eje de laminación.

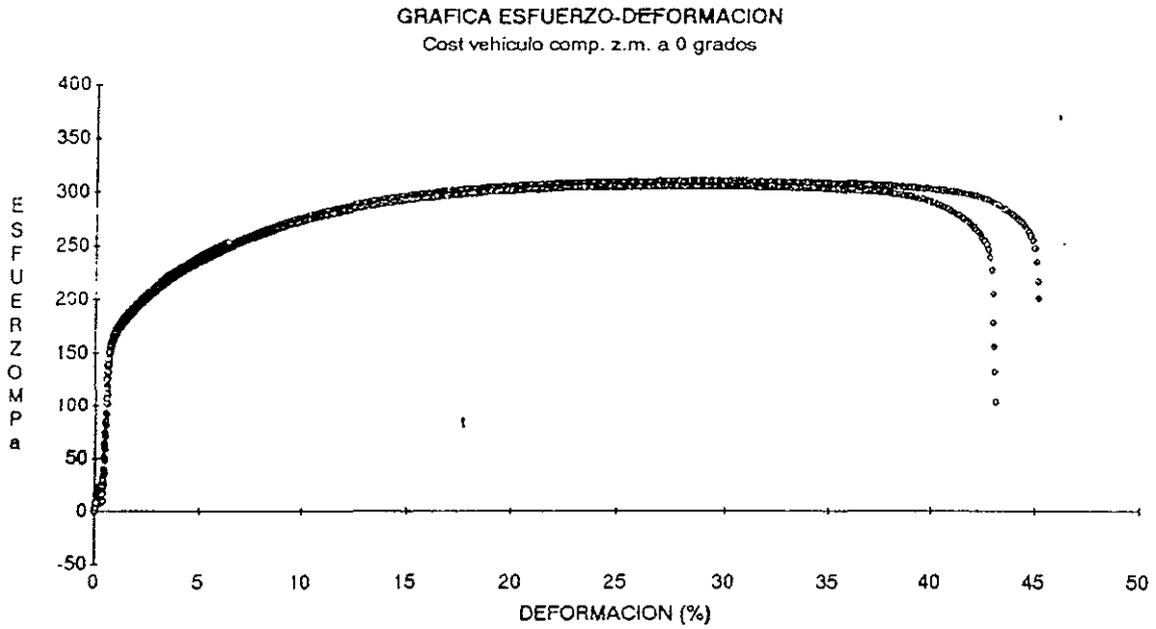


Figura 1.4. Gráfica esfuerzo-deformación, lámina para costado vehículo compacto zona media, a 0° con respecto al eje de laminación

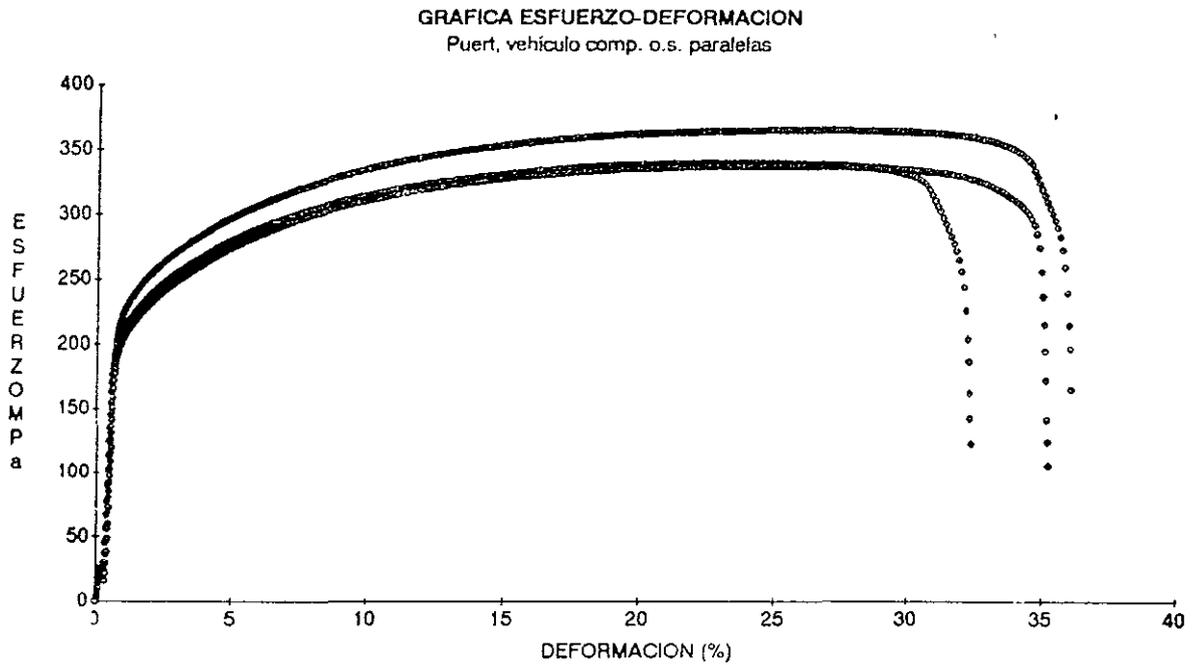


Figura 1.5. Gráfica esfuerzo-deformación, lámina puerta vehículo compacto, esquina superior, a 0° con respecto al eje de laminación.

## APENDICE II.

Tablas de resultados de índice de anisotropía.

Lámina 1 ( índice de anisotropía ) : zona orilla inferior.					
Probeta	1	2	3	$\Gamma_{\text{Desv. st}}$	$\Gamma_{\text{prom}}$
Orilla inferior a 0° ( $r_{0^\circ}$ )	1.30	1.29	1.32	0.02	1.30
Orilla inferior a 45° ( $r_{45^\circ}$ )	1.32	1.28	1.30	0.02	1.30
Orilla inferior a 90° ( $r_{90^\circ}$ )	1.29	1.30	1.25	0.02	1.28

Tabla 2.1. Índice "r", lámina #1 para costado vehículo compacto, probetas orilla inferior, a 0°, 45°, 90° con respecto al eje de laminación.

Lámina 1 ( índice de anisotropía ) : zona media.					
Probeta	1	2	3	$\Gamma_{\text{Desv. st}}$	$\Gamma_{\text{prom}}$
Zona media a 0° ( $r_{0^\circ}$ )	1.38	1.32	1.32	0.03	1.34
Zona media a 45° ( $r_{45^\circ}$ )	1.29	1.30	-----	0.01	1.30
Zona media a 90° ( $r_{90^\circ}$ )	1.29	1.28	1.27	0.01	1.28

Tabla 2.2. Índice "r", lámina #1 para costado vehículo compacto, probetas zona media, a 0°, 45° y 90° con respecto al eje de laminación.

Lámina 2 ( índice de anisotropía ) : orilla inferior.					
Probeta	1	2	3	$\Gamma_{\text{Desv. st}}$	$\Gamma_{\text{prom}}$
Zona media a 0° ( $r_{0^\circ}$ )	1.22	1.23	-----	0.01	1.23
Zona media a 45° ( $r_{45^\circ}$ )	1.20	1.26	1.20	0.03	1.22
Zona media a 90° ( $r_{90^\circ}$ )	1.24	1.19	1.33	0.07	1.25

Tabla 2.3. Índice "r", lámina #2 para puertas vehículo compacto, probetas orilla inferior, a 0°, 45° y 90° con respecto al eje de laminación.

Lámina 2 ( índice de anisotropía ) : orilla superior.					
Probeta	1	2	3	$\Gamma_{\text{Desv. st}}$	$\Gamma_{\text{prom}}$
Zona media a 0° ( $r_{0^\circ}$ )	1.18	1.23	1.22	0.03	1.21
Zona media a 45° ( $r_{45^\circ}$ )	1.22	1.30	1.25	0.04	1.26
Zona media a 90° ( $r_{90^\circ}$ )	1.29	1.2	1.73	0.28	1.41

Tabla 2.4. Índice "r", lámina #2 para puertas vehículo compacto, probetas orilla superior, a 0°, 45° y 90° con respecto al eje de laminación.

Lámina 3 ( índice de anisotropía ) : orilla inferior.					
Probeta	1	2	3	$\Gamma_{Desv. st}$	$\Gamma_{prom}$
Zona media a 0° ( $r_{0^\circ}$ )	1.33	1.34	1.36	0.02	1.34
Zona media a 45° ( $r_{45^\circ}$ )	1.27	1.30	-----	0.02	1.29
Zona media a 90° ( $r_{90^\circ}$ )	1.29	1.23	-----	0.04	1.26

Tabla 2.5. Índice "r", lámina #3 para costado vehículo largo, probetas orilla inferior, a 0°, 45° y 90° con respecto al eje de laminación.

Lámina 3 ( índice de anisotropía ) : zona media.					
Probeta	1	2	3	$\Gamma_{Desv. st}$	$\Gamma_{prom}$
Zona media a 0° ( $r_{0^\circ}$ )	1.28	1.28	1.27	0.01	1.28
Zona media a 45° ( $r_{45^\circ}$ )	1.28	1.30	-----	0.01	1.29
Zona media a 90° ( $r_{90^\circ}$ )	1.23	1.30	1.23	0.04	1.25

Tabla 2.6. Índice "r", lámina #3 para costado vehículo largo, probetas zona media, a 0°, 45° y 90° con respecto al eje de laminación.

Lámina 4 ( índice de anisotropía ) : zona media.					
Probeta	1	2	3	$\Gamma_{Desv. st}$	$\Gamma_{prom}$
Zona media a 0° ( $r_{0^\circ}$ )	1.18	1.17	1.18	0.01	1.18
Zona media a 45° ( $r_{45^\circ}$ )	1.17	1.18	1.21	0.02	1.19
Zona media a 90° ( $r_{90^\circ}$ )	1.16	1.15	1.19	0.02	1.17

Tabla 2.7. Índice "r", lámina #4 para partes interiores, probetas zona media, a 0°, 45° y 90° con respecto al eje de laminación.

### APENDICE III.

Tablas de resultados de ensayo de embutido.

Lámina #1 (Ensayos embutido) orilla inferior.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.87	11.30
2	1.86	11.30
3	1.86	11.27
4	1.85	11.30
5	1.84	11.27
6	1.85	11.27
Promed	1.85	11.29
Desv.	0.01	0.02

Tabla 3.1. Datos de embutido, lámina #1 para costado vehículo compacto, orilla inferior.

Lámina #1 (Ensayos embutido) zona media.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.87	11.24
2	1.87	11.24
3	1.86	11.20
4	1.85	11.24
5	1.85	11.24
6	1.86	11.22
Promed	1.86	11.23
Desv.	0.0	0.017

Tabla 3.2. Datos de embutido, lámina #1 para costado vehículo compacto, zona media.

Lámina #2 (Ensayos embutido) orilla inferior.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.83	11.43
2	1.89	11.24
3	1.86	11.30
4	1.85	11.43
5	1.85	11.22
6	1.88	11.37
Promed	1.86	11.33
Desv.	0.02	0.09

Tabla 3.3. Datos de embutido, lámina#2 para puertas vehículo compacto, orilla inferior.

Lámina #2 (Ensayos embutido) zona media.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.90	11.43
2	1.91	11.43
3	1.89	11.43
4	1.92	11.44
5	1.91	11.43
6	1.88	11.50
Promed	1.90	11.44
Desv.	0.02	0.028

Tabla 3.4. Datos de embutido, lámina #2 para puertas vehículo compacto, zona media.

Lámina #3 (Ensayos embutido) orilla inferior.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.99	11.50
2	1.88	11.43
3	1.80	11.36
4	1.91	11.49
5	1.99	11.37
6	1.99	11.49
Promed	1.93	11.44
Desv.	0.08	0.06

Tabla 3.5. Datos de embutido, lámina #3 para costado vehículo largo, orilla inferior.

Lámina #3 (Ensayos embutido) zona media.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.99	11.30
2	2.00	11.46
3	1.98	11.46
4	1.98	11.30
5	1.94	11.20
6	1.96	11.27
Promed	1.97	11.33
Desv.	0.02	0.10

Tabla 3.6. Datos de embutido, lámina #3 para costado vehículo largo, zona media.

Lámina #4 (Ensayos embutido) zona media.		
Ensayo	Carga (Ton)	Altura copa (mm)
1	1.35	10.32
2	1.34	10.29
3	1.31	10.31
4	1.35	10.34
5	1.31	10.29
6	1.31	10.29
Promed	1.33	10.30
Desv.	0.02	0.02

Tabla 3.7. Datos de embutido, lámina #4 para partes interiores, zona media.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

## APENDICE IV.

Diagramas de límite de formado :

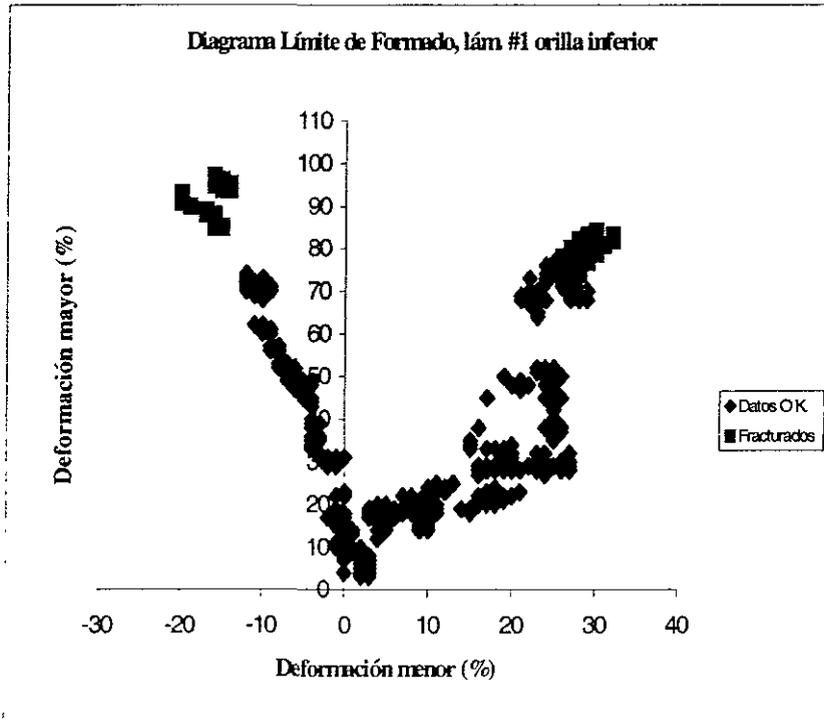


Figura 4.1. Diagrama límite de formado, lámina #1 para costado vehículo compacto. Probetas de orilla inferior de rollo.

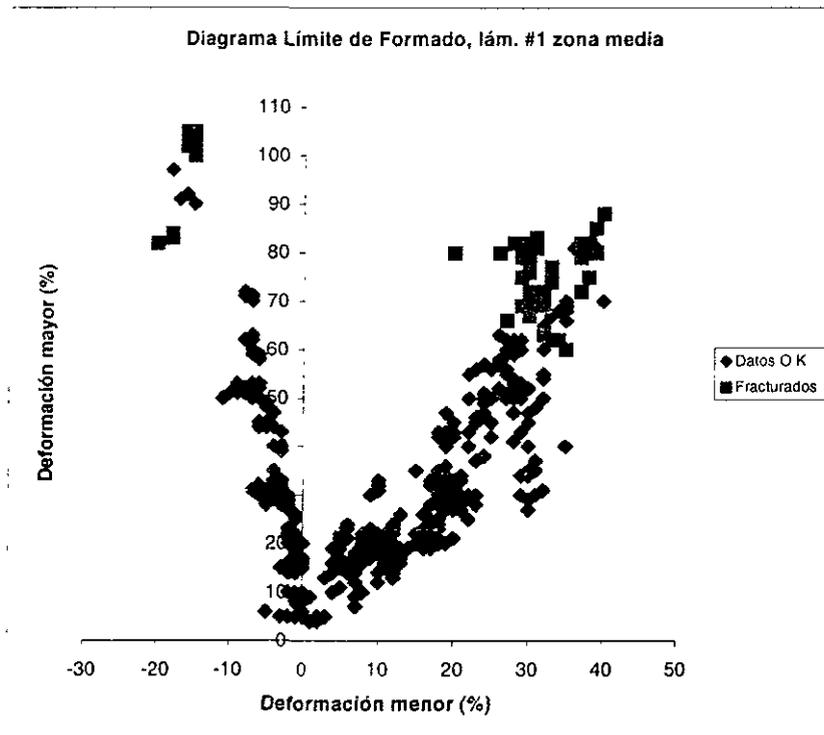


Figura 4.2. Diagrama límite de formado, lámina #1 para costado vehículo compacto. Probetas de zona media del rollo.

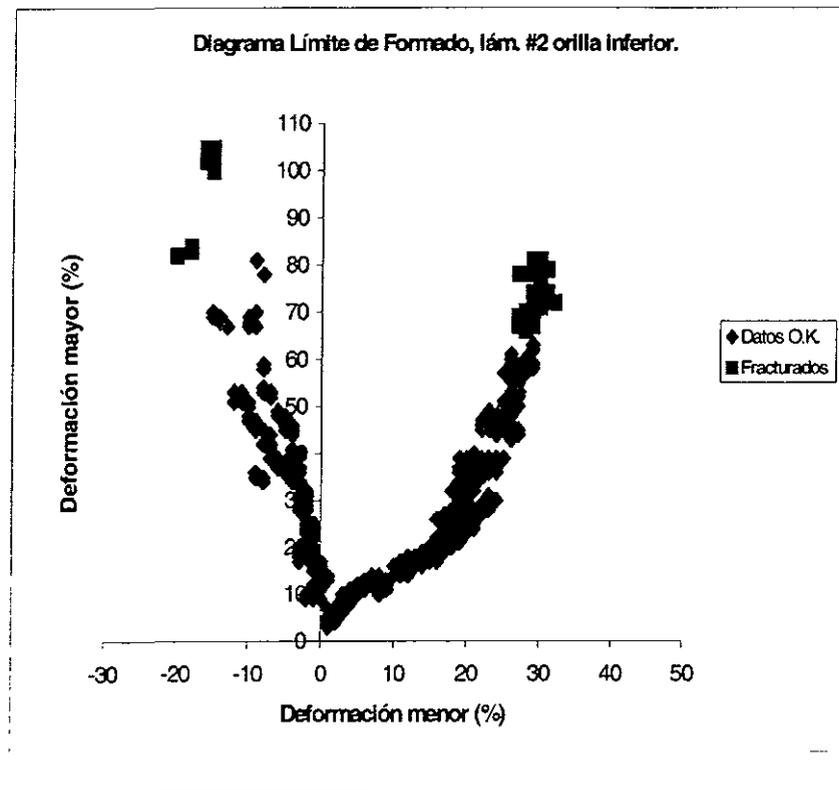


Figura 4.3. Diagrama límite de formado, lámina #2 para puertas vehículo compacto. Probetas de orilla inferior del rollo.

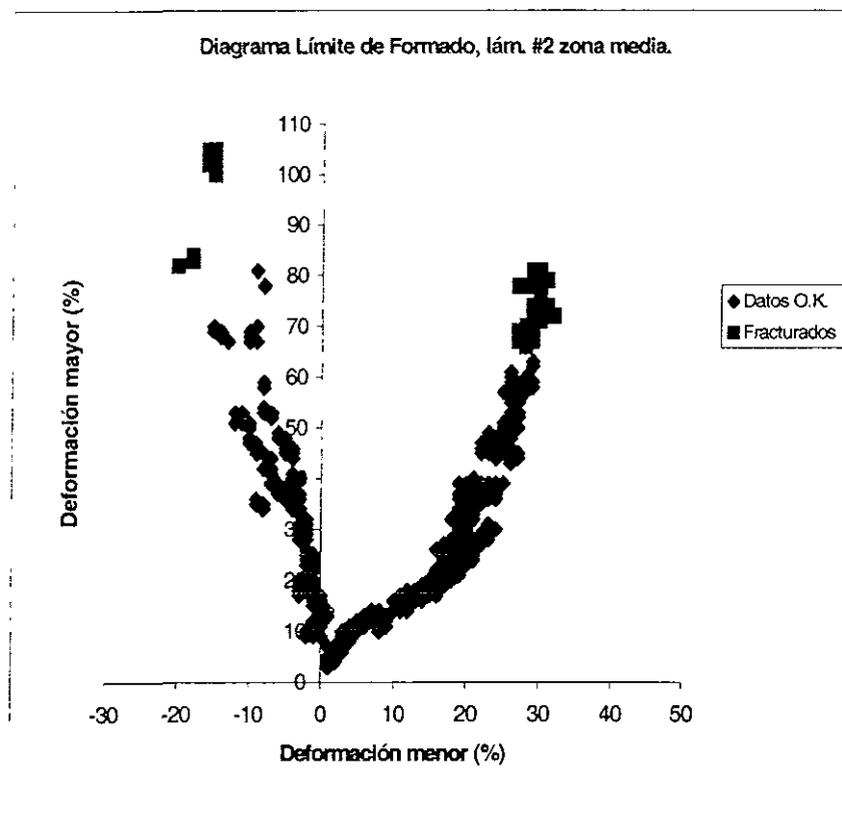


Figura 4.4. Diagrama límite de formado, lámina #2 para puertas vehículo compacto. Probetas de zona media del rollo.

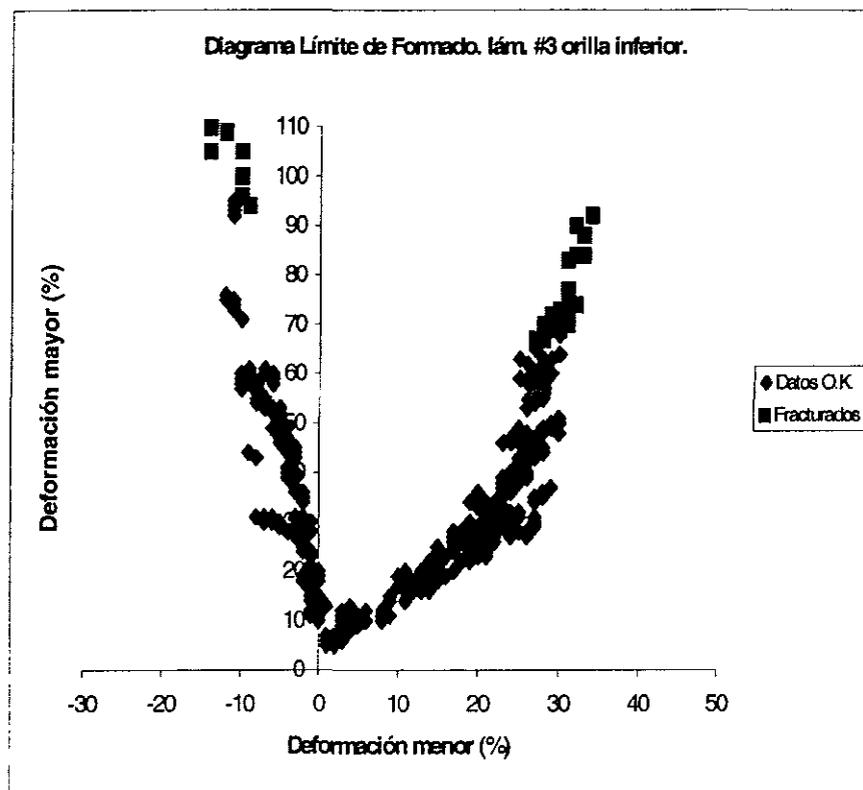


Figura 4.5. Diagrama límite de formado, lámina #3 para costado vehículo largo. Probetas de orilla inferior del rollo.

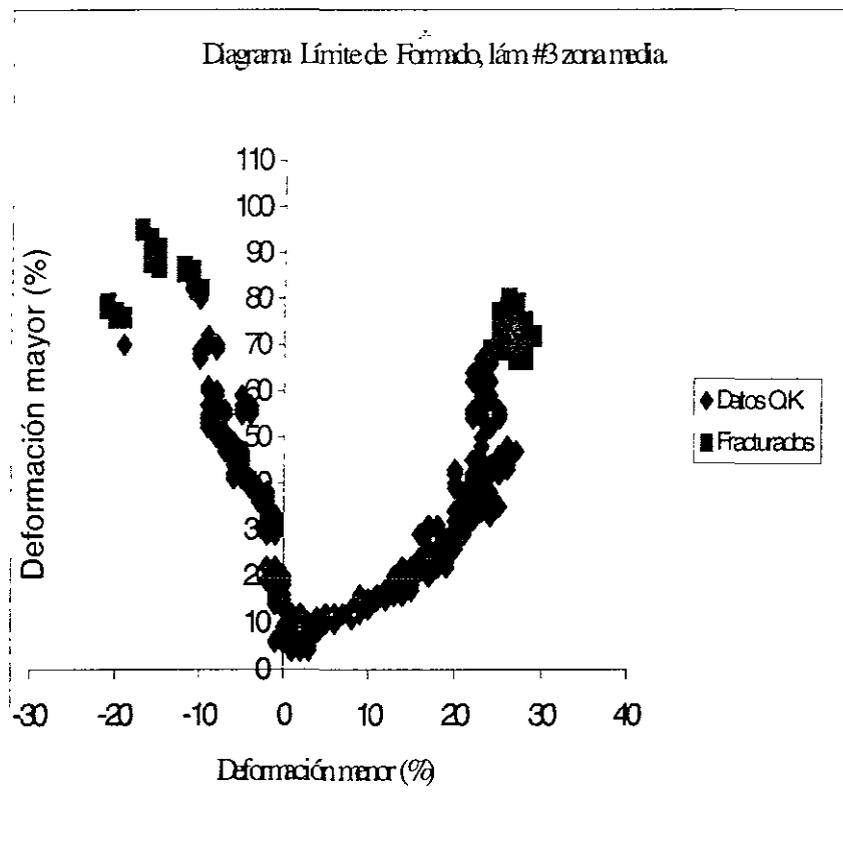


Figura 4.6. Diagrama límite de formado, lámina #3 para costado vehículo largo. Probetas zona media del rollo.

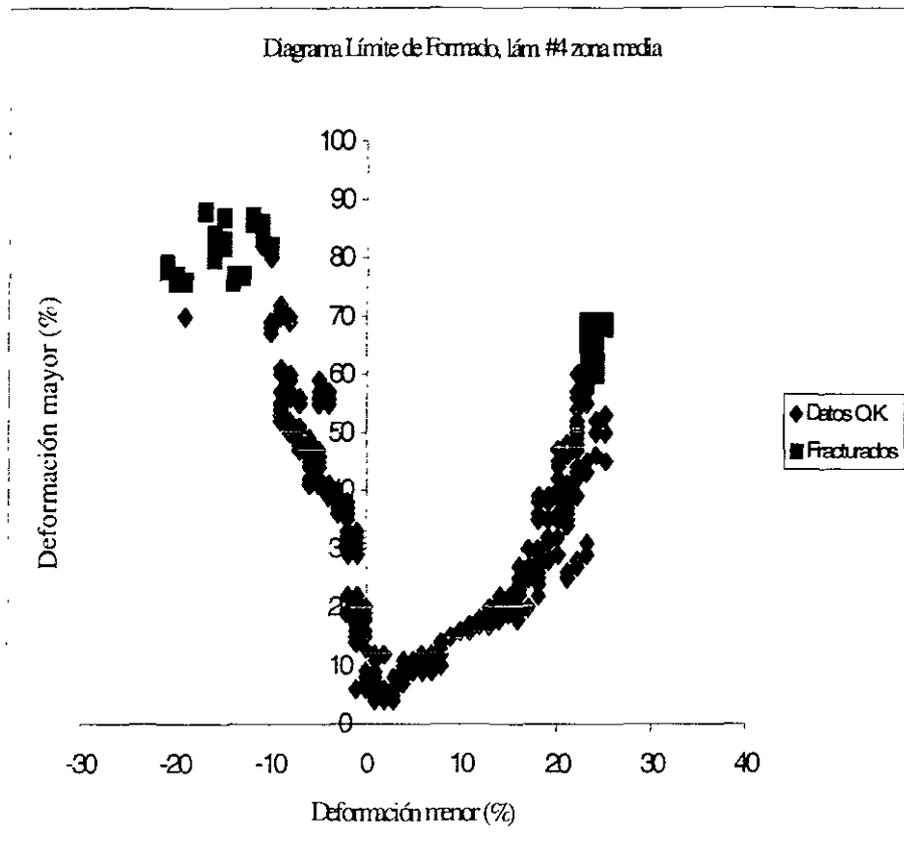


Figura 4.7. Diagrama límite de formado, lámina #4 para partes interiores.  
 Probetas de zona media de rollo.