



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE  
ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN

"ESTUDIOS DE EMBUTIBILIDAD PARA  
LÁMINAS DE ACERO INOXIDABLE "

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
ING. MECÁNICO-ELECTRICISTA  
ÁREA: MECÁNICA  
P R E S E N T A N

JOSÉ GUADALUPE ESQUIVEL TAVARES  
JOAQUÍN GALLAGA MARTINEZ

Asesor; M. en C. Daniel Aldana Avalos

MÉXICO

1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**A ti madre:**

**Que me diste la vida, me has dado la libertad de ser, actuar y pensar por mi mismo sin reproche alguno; siempre he tenido tu apoyo y por ti seguí mis estudios, me has hecho comprender lo valioso que es poder brindar ayuda sin pedir algo a cambio, te agradezco el haber formado de mi un ser de provecho y con gran respeto por la mujer. Gracias.**

**A mi padre fallecido:**

**Te guardo entre mis más gratos recuerdos de infancia y adolescencia, me diste el ejemplo para saber quien quiero ser.**

**A mi familia:**

**Que aunque nos ha tocado vivir experiencias amargas, han sido el brazo del que me he apoyado para no caer y superarme en cada ocasión.**

**A mis amigos:**

**Con quienes en algún momento compartí experiencias dentro y fuera de la escuela, por hacer de la amistad un fuerte lazo de solidaridad y unión.**

**A la vida:**

**Por ponernos en el camino de las personas más maravillosas y con quienes he podido compartir etapas de mi vida.**

**Joaquín.**

**A mis padres:**

**Gracias por darme todo sin pedir nada a cambio,  
por apoyarme en esto que ayer era una ilusión  
y hoy es realidad.**

**Su hijo que los ama y respeta.**

**A mis hermanos:**

**Les dedico este trabajo,  
para que sirva de estímulo en todo  
lo que pretendan lograr.**

**Para Arceli:**

**Como muestra de mi amor y perseverancia.**

**Agradezco de forma muy especial al M. en C. Daniel  
Aldama Avalos por sus consejos y conocimientos que nos  
brindó durante este trabajo.**

**José Guadalupe.**

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	vi
CAPÍTULO I. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS METALES .....	1
I.1 Anisotropía e Isotropía .....	1
I.1.1 Factor de Embutibilidad o Anisotropía $\alpha$ .....	8
I.1.2 Criterio de von Mises .....	18
I.1.3 Exponente de Endurecimiento por Trabajo $n$ .....	25
I.2 Ensayos de Embutibilidad .....	32
I.2.1 Proceso de Embutición .....	32
I.2.2 Fuerza necesaria para Embutir .....	36
I.2.3 Presión del Prensachapas .....	38
I.2.4 Velocidad de Embutición .....	40
I.2.5 Radio de Embutición .....	40
I.2.6 Juego entre Punzón y Matriz .....	42
I.2.7 Ensayos de Plasticidad por Embutición .....	43
CAPÍTULO II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ADITAMENTO PARA PROBAR LA EMBUTIBILIDAD .....	51
II.1 Análisis de Alternativas de Diseño.....	51
II.1.1 Visitas realizadas .....	54
II.2 Diseño según la mejor Alternativa .....	57
III.3 Construcción .....	60
II.3.1 Tipos de aceros .....	60
II.3.2 Selección del acero .....	65
II.3.3 Selección del Material para el Punzón y Matriz .....	66
II.3.4 Eliminación de Materiales no aptos .....	67
II.3.5 Selección del Material para la Guía del Punzón .....	68
II.3.6 Selección del Material para Piezas Diversas .....	68

II.3.7 Esquemas .....	71
II.3.8 Maquinado .....	79
II.3.9 Tratamientos Térmicos del Punzón y Matriz .....	93
 CAPITULO III. TRABAJO EXPERIMENTAL .....	 95
 III.1 Ensayo de Tensión .....	 95
III.1.1 Máquina de Ensayos .....	96
III.1.2 Especificaciones de la Probeta .....	98
III.1.3 Cálculo del Factor de Anisotropía $\alpha$ .....	102
III.1.4 Cálculo del Índice de Endurecimiento por Trabajo $\beta$ .....	107
 III.2 Temple del Acero Inoxidable .....	 116
 III.3 Tratamiento Térmico y los cambios mecánicos .....	 117
 III.3 Ensayos de Embutibilidad .....	 120
 CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN .....	 122
 IV.1 Recopilación de la Información .....	 122
 IV.2 Análisis de la Información Obtenida .....	 123
 CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	 143
 BIBLIOGRAFÍA .....	 145

## INTRODUCCIÓN

El trabajo en lámina es muy variado y tiene diversos fines. En esta tesis tocaremos uno de ellos, el cual se conoce como embutido.

El embutido es un proceso de estirado en la lámina con el fin de fabricar recipientes sin costura.

Hay varios ensayos que miden la embutilbilidad de la chapa, éstos son entre otros Erichsen, Olsen, Jovinogt y Pellini.

El objetivo es demostrar un proceso más que tiene cualidades para predecir el comportamiento de la lámina en embutido y se tratará en cinco capítulos, los que a continuación se indican.

Capítulo I. Es necesario para llegar a cualquier conclusión que partamos de un marco teórico. En este capítulo se hace referencia a la isotropía de los materiales desde los puntos de vista exponente de endurecimiento por trabajo, factor de anisotropía y criterio de von Mises. Posteriormente se da una semblanza del proceso de embutido y se tratan algunos aspectos del mismo, como por ejemplo: Fuerza para embutir, presión del presachapas y velocidad de embutición.

En el capítulo II se comentan las alternativas de diseño de una herramienta para ensayar el proceso Erichsen, se tratan los criterios de diseño para la misma, se muestra a detalle el proceso de construcción y ensamble.

En el capítulo III tratamos las actividades de esta tesis, en éste nos conectamos a un proyecto de investigación E.N.E.P. Aragón-Facultad de Ingeniería para integrar parte de la información sobre los cálculos del factor de anisotropía, del índice de endurecimiento por trabajo y de la embutilbilidad Erichsen para aceros inoxidables ferríticos que fueron sometidos a condiciones diversas de tratamiento térmico.

En el capítulo IV se analiza e interpreta la información partiendo de una recopilación de la misma, se elaboraron 16 gráficas que muestran la tendencia de la información de una forma simple y con cruzamiento de la misma. Esto permitió analizar la información y fincar las bases necesarias para poder llegar a establecer en el capítulo V una serie de conclusiones y recomendar algunos cambios o modificaciones a trabajos posteriores.

## CAPÍTULO I

### COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS METALES

#### I.1 Anisotropía e Isotropía

De acuerdo a la definición que hace tanto Dieter<sup>(1)</sup> como la gran mayoría de autores, el material es isotrópico si las propiedades de una sustancia son independientes de la dirección cristalográfica a lo largo de la cual es medida, es decir, que la propiedad es idéntica en todas las direcciones, de lo contrario se dice que es anisotrópico. De esta manera, en un material isotrópico ideal, se espera encontrar la misma resistencia en todas las direcciones. En el caso de medir alguna de las propiedades físicas encontramos que éstas dependen fuerte y normalmente de la dirección a lo largo de la cual se ha medido, esto significa que, básicamente, los cristales no son isotrópicos sino anisotrópicos<sup>(2)</sup>, pero en el caso excepcional de las propiedades eléctricas, por ejemplo, cuando se mide su resistividad eléctrica, se obtendrá el mismo valor de ésta, independientemente de cómo se halla cortado la muestra del tramo principal.

Se ha hablado que el material está compuesto de una estructura cristalina, que a su vez está constituida por miles de cristales y dependiendo del arreglo cristalino serán las propiedades del mismo. Por otro lado, se ha definido a los materiales como isotrópicos y anisotrópicos, por lo que creemos conveniente dar un panorama general de los puntos de más interés, así como el papel que juegan en las propiedades mecánicas tanto una como otra.

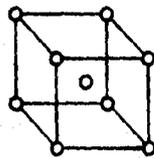
Debemos entender que un cristal es un cuerpo sólido cuyos elementos constitutivos están ordenados periódicamente en las tres direcciones principales del espacio (véase figura 3). Por ello, en un cristal, es siempre posible definir una "celda" paralelepípedica, que permite describir el cristal como empaquetamiento tridimensional de celdas elementales iguales<sup>(3)</sup>.

De esta manera, para describir un cristal deben darse dos grupos de datos:

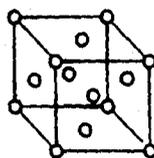
1. Tamaño y forma de las celdas elementales; esto es, la longitud de los tres cantos del paralelepipedo, es decir, las "constantes de la red", y los ángulos que forman entre sí.
2. Los puntos de la celda elemental en los que están situados los átomos de la red.

Así como hay una gran diversidad de materiales, también existe una red diferente dependiendo del material, pero la red o arreglo atómico más común en los metales es la conocida como "red cúbica", y esto es por que la celda elemental tiene la forma de un cubo, de forma que, se llama cúbica centrada en el cuerpo (o conocida por sus siglas en inglés Body Cubic Center), si conteniendo cada celda dos átomos uno está situado en un vértice del cubo y otro en el centro; la red cúbica centrada en las caras (en inglés Face Cubic Center) es aquel cristal cuya celda elemental tiene la forma del cubo y cuyos átomos ocupan, además de los vértices, los centros de las caras del cubo.

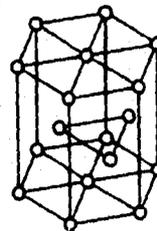
Estos dos tipos de arreglos o redes son sencillos y de elevada simetría, así, los metales más importantes cristalizan en redes sencillas como lo son éstas<sup>(3)</sup>. Además, existe la hexagonal compacta (HC), donde la celda unitaria es el prisma esquematizado en la red hexagonal, estos arreglos atómicos se pueden ver en la figura 1.



Red cubica centrada  
en el cuerpo (b.c.c)



Red cubica centrada  
en las caras (f.c.c)



Red hexagonal  
compacta (c.p.h)

Figura 1. Arreglos atómicos más comunes de los metales.

Para señalar direcciones en una red cristalina, lo más adecuado es utilizar un sistema de coordenadas, como lo señala H. P. Stüwe<sup>(3)</sup>, quien toma los ejes paralelos a los cantos de la celda elemental de referencia y como unidad de medida a lo largo de dichos ejes utiliza las longitudes de los cantos de la celda elemental (ver figura 2), de esta forma se puede describir cualquier dirección de la red fácilmente con notación vectorial. Así, los vectores  $[100]$ ,  $[010]$  y  $[001]$  representan las tres direcciones de los cantos de la celda elemental.

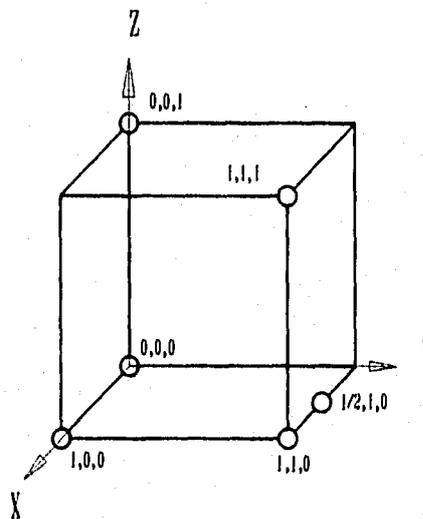
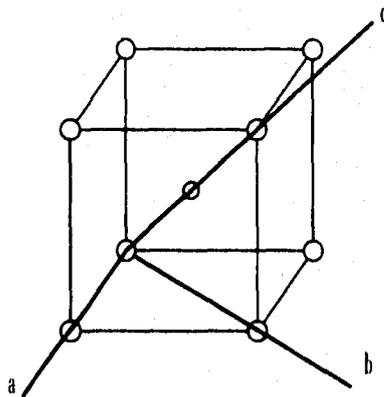


Figura 2. Coordenadas de punto en la celda unitaria. Los números se refieren a los parámetros de la red.

De la misma manera, se encierran los índices entre corchetes rectos  $[\ ]$ , cuando se pretende representar una determinada dirección; se usan corchetes en ángulo  $\langle \rangle$ , cuando se piensa en todas las direcciones que son cristalográficamente del mismo tipo, los índices de un plano se encierran en paréntesis redondos  $( )$  cuando se quiere señalar un conjunto de planos determinado; y entre llaves  $\{ \}$ , cuando se refiere a todos los planos cristalográficamente equivalentes. Así  $(100)$  es el plano paralelo a los ejes  $y$ ,  $z$ . Pero  $\{100\}$ , son

todos los planos paralelos a cada una de las caras de la celda elemental, o sea, las caras del cubo. De esta forma podemos hablar y hacernos entender universalmente acerca de la dirección que presenta una red cristalina.

Cuando hablamos respecto a la isotropía y anisotropía de un material, mencionamos, que no es lo mismo medir una propiedad eléctrica que física, ya que para esta última depende primordialmente de la dirección en que se esté midiendo, siendo así que, los cristales no son isotrópicos sino anisotrópicos. A este respecto, consideremos un cristal de hierro cúbico centrado en el cuerpo, en donde las tres direcciones más importantes son las marcadas a, b y c (figura 3). Se puede reconocer fácilmente que éstas no son equivalentes desde el hecho de que los espacios de los átomos a lo largo de las tres direcciones son diferentes<sup>(2)</sup>.



**Figura 3. En la figura se muestran las direcciones más importantes en un cristal cúbico centrado en el cuerpo.**

Puesto que los procesos de manufactura tienden a alinear los granos en un metal rara vez se logra una disposición de ellos al azar, de manera que sus orientaciones no están distribuidas de manera uniforme. El resultado es lo que se conoce como una textura o una orientación preferente. Debido a que la mayoría de los metales policristalinos tienen orientación preferente, tienden a ser anisotrópicos, dependiendo el grado de su anisotropía del grado de alineamiento de los cristales.

Según lo señala Stüwe, la anisotropía plástica de los cristales nace del modo de deformarse los mismos, dicha deformación se realiza mediante el deslizamiento sobre planos cristalográficos densos y en direcciones cristalográficas densas<sup>(3)</sup>. La deformación inicia cuando se alcanza una determinada tensión crítica en un sistema de deslizamiento. Por esto, la fuerza a tracción a la que hay que someter un cristal para deformarlo por deslizamiento depende de la orientación del sistema de deslizamiento<sup>(4)</sup>. Esta tensión vale  $\sigma = r/m$ , donde  $r$  es la tensión a cortadura crítica y el factor  $m$  de orientación viene dado por la expresión:

$$m = \cos \chi \cos \lambda \dots \dots \dots (1)$$

donde:  $\chi$  es el ángulo entre la normal del plano de deslizamiento y el eje de tracción.

$\lambda$  es el ángulo entre la dirección de deslizamiento y el eje de tracción.

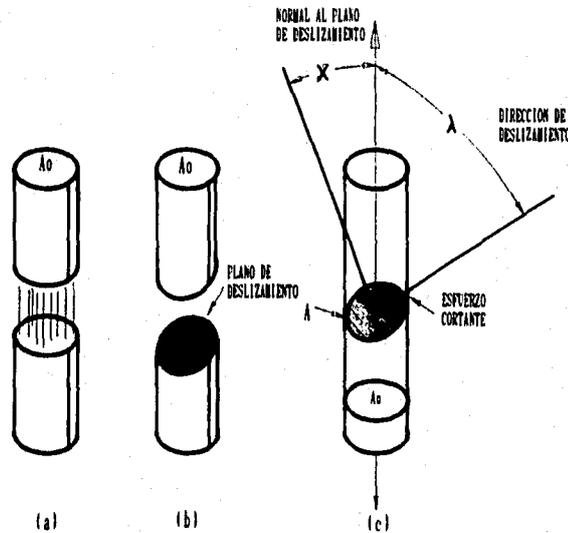


Figura 4. Esquema de una barra sin dislocaciones (a), en la cual el material fallará al romperse todas las uniones a través de la superficie  $A_0$ . Sin embargo cuando se desliza una dislocación (b), las uniones se rompen sólo a lo largo de la línea de dislocación. En (c) se muestra un esfuerzo cortante resultante ( $\tau_r$ ) que puede producirse en un sistema de deslizamiento, ocasionando que la dislocación se mueva sobre el plano de deslizamiento en la dirección de deslizamiento

Investigando entre diversos libros podemos decir que tanto Dieter<sup>(1)</sup>, Meyer<sup>(7)</sup> y demás autores, coinciden en afirmar que en los metales se pueden encontrar dos tipos diferentes de anisotropía, los cuales son:

**A) ANISOTROPÍA CRISTALOGRÁFICA;** resulta de la orientación preferente de los granos y es producida por deformación severa. Ya que los esfuerzos de un monocristal son altamente anisotrópicos, una deformación plástica severa produce una marcada orientación preferente de los granos, lo cual causará un espécimen policristalino semejante a la anisotropía de un monocristal. El punto de cedencia, y el esfuerzo de tensión en menor grado, son las propiedades más afectadas. Este tipo de anisotropía es encontrada frecuentemente en metales no ferrosos, especialmente cuando han sido severamente trabajados en laminadoras. Una manifestación práctica de la anisotropía cristalográfica es la formación de "orejas" o deformación no uniforme en recipientes profundos.

**B) FIBRACIÓN MECÁNICA;** es debida a la alineación preferente de estructuras discontinuas tales como inclusiones, vacancias, segregaciones y en partículas de segunda fase en la dirección de trabajo. Este tipo de anisotropía es importante en piezas forjadas, placas y chapas. La dirección principal de trabajo está definida como la dirección longitudinal, este es el eje longitudinal de una barra o la dirección de rolado en una placa o lámina. Las dos direcciones transversales también deben ser consideradas, ya que posteriormente serán de gran utilidad. La dirección transversal-corta es la dimensión mínima del producto, por ejemplo, el espesor de la placa y, la dirección transversal-larga es perpendicular a ambas direcciones, la longitudinal y la transversal-corta. En un redondo o cuadrado, ambas direcciones transversales son equivalentes, mientras en una lámina las propiedades en la dirección transversal-corta difícilmente pueden ser medidas. En productos de acero forjado la fibración mecánica es la causa principal de las propiedades direccionales. Tanto la cantidad de ductilidad como el área reducida son las características en las cuales es más sobresaliente el efecto de este tipo de anisotropía. En general, el área reducida es menor en la dirección transversal-corta, intermedia en la dirección transversal-larga y más alta en la dirección longitudinal<sup>(1)</sup>.

Aunque, debemos aclarar que en un documento presentado en un seminario de la American Society for Metals, el 14 de octubre de 1967, en Ohio, U.S.A., se menciona que, aparte de las anisotropías citadas existe una tercera, la cual es causada por esfuerzos internos y que son principalmente generados por la respuesta de los materiales a los esfuerzos aplicados. Aunque, no se tiene gran información acerca de ésta, tan solo se menciona como una tercera anisotropía y se hace notar la diferencia en cuestión de opinión de los diversos autores consultados.

Usualmente se puede decir que, las propiedades óptimas de la lámina son obtenidas con un factor de forjado de 2 a 3:1. Entendiendo que el factor de forjado es el cambio del área original hasta el área final de la sección transversal del material. Así también, la microsegregación y la estructura dendrítica puede ser responsable de una baja ductilidad transversal en piezas forjadas<sup>(1)</sup>.

#### Microgrietas.

Un aspecto interesante de la intensidad anisotrópica de los metales concerniente a los efectos anteriores a una deformación torsional en las propiedades plásticas es la que descubrió Swift<sup>(5)</sup>, quien al torcer una barra de acero suave para luego determinar sus propiedades, encontró que el esfuerzo cortante torsional en la superficie excedió la unidad y encontró que el esfuerzo tensión-fractura y el área reducida fueron ampliamente minimizados en su valor. Al mismo tiempo la fractura plástica cambió de una fractura de copa y cono a una fractura en un plano de 45°. Si el espécimen fue torsionado y luego vuelto a su estado original, existió un pequeño efecto de deformación torsional en el esfuerzo de fractura, en forma dúctil, o en la clase de fractura. La interpretación de estos resultados sugirió que la torsión, o cualquier deformación, produce una orientación preferente para la iniciación de microgrietas orientadas aleatoriamente. Se supone que las grietas fueron orientadas a lo largo de la superficie de la hélice, la cual está en compresión durante la torsión. La separación ocurre a lo largo de este plano a 45° cuando la tensión axial es aplicada. Las grietas fueron supuestas a ser reorientadas en la dirección longitudinal de la barra cuando fue destorsionada, y con esta orientación ellas tendrían un pequeño efecto en las propiedades plásticas. Aunque no existió una evidencia experimental para la existencia de microgrietas, se consideró que ellas podrían ser iniciadas en inclusiones y partículas de segunda fase.

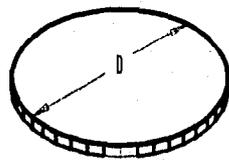
Sin embargo, experimentos similares con cobre, en el cual no hubo partículas de segunda fase y tampoco una orientación preferente, confirma y extiende las observaciones de Swift. Existe alguna indicación que estas grietas se originaron durante la solidificación del lingote y tal vez durante una deformación plástica cuando están orientadas en la dirección principal de trabajo.

Pero la pregunta obligada es ¿cómo podemos cuantificar la anisotropía?, para lo cual, los investigadores del tema nos indican que ésta se puede medir en base a ciertos factores, que son obtenidos en pruebas de tensión y embutibilidad, y son: índice de embutibilidad o factor  $r$  (en inglés PLASTIC STRAIN RATIO; por otro lado también se puede denotar como  $R$ , según sea el autor a quien se consulta), y el índice de endurecimiento por trabajo o por deformación  $n$  (en inglés TENSILE STRAIN-HARDENING EXPONENT  $n$ -VALUES). Éstos se explicarán a continuación y se dará la forma de obtenerlos.

### **I.1.1 Factor de Embutibilidad o Anisotropía $r$**

La embutición profunda, en el caso más sencillo es la producción de una copa de diámetro exterior "d" a partir de un disco de diámetro "D"<sup>(3)</sup> (figura 5). Dicho proceso consiste en la aplicación de dos estados de tensiones biáxicas, las cuales se muestran en la figura 6 y, se describen como sigue:

- A)** Tracción radial y compresión circunferencial en la zona del disco original la cual no ha entrado todavía entre el punzón y la matriz (zona del ala).
- B)** Compresión normal y tracción radial en la pared de la copa ya embutida.



$LDR = (D/d)_{max}$ .

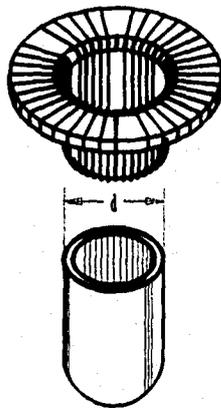


Figura 5. Diagrama explicativo de la secuencia del proceso de embutición para la obtención de una copa.

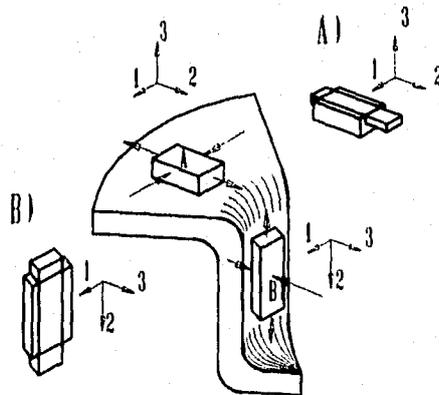
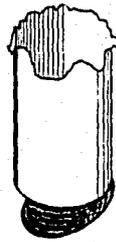


Figura 6. Esquema simplificado de los estados de tensión y deformación en una pieza embutida. Fuente: Stüwe, Introducción a las Texturas, p. 210.

En el fondo de la copa, se supone la ausencia de fricción entre el punzón y el material, en donde existe un estado de tracción biaxial que equivale al estado B (observe la figura 6), en esta simplificación, por lo tanto, no se hará distinción entre la pared y el fondo de la copa<sup>(3)</sup>.

La pared de la copa, con su resistencia a tracción y adelgazamiento de su espesor, soporta el esfuerzo necesario para reducir el perímetro del ala. Si el diámetro original "D" es excesivamente grande para ser reducido al diámetro final "d", puede suceder que, o bien la pared de la copa no resista el esfuerzo necesario para la reducción, produciéndose la fractura del fondo, o bien que el material del ala fluya desordenadamente, produciéndose arrugas en ella, aunque cabe mencionar que pueden suceder ambas cosas a la vez. (figura 7)



**Figura 7. Falla típica en la embutición.**

Para cada material y para cada diámetro de copa "d" existe un diámetro "D" máximo que puede ser embutido sin fractura ni formación de arrugas. La relación  $(D/d)_{\text{máx}}$  se toma como índice de la embutibilidad del material y se le designa con las iniciales en inglés: Limiting Drawing Ratio = LDR.

Por lo tanto, para diferentes materiales se tiene diferente embutibilidad, así como también un mismo material con diferentes texturas puede tener mejores o peores respuestas al embutirse<sup>(3)</sup>. (figura 8)

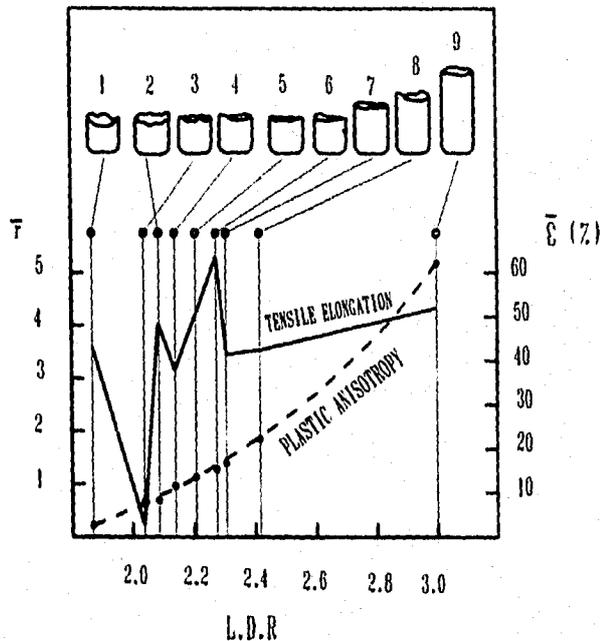


Figura 8. Valor del índice de embutibilidad "LDR" como función del promedio de los valores de  $r$  y de la deformación para la medición de la fractura en pruebas de tensión con respecto a las direcciones de rolado a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ . 1) Zinc laminado 85% y recocido a  $200^\circ\text{C}$ . 2) Cobre con textura de cubo. 3) Aluminio comercial semiduro. 4) Aluminio recocido a  $300^\circ\text{C}$ . 5) Cobre sin textura. 6) Latón 70/30 recocido a  $700^\circ\text{C}$ . 7) Acero efervescente recocido en caja. 8) Acero calmado recocido en caja. 9) Titanio (grado de pureza 115) recocido. Fuente: Szaallman, Modern Physical Metallurgy, p. 357.

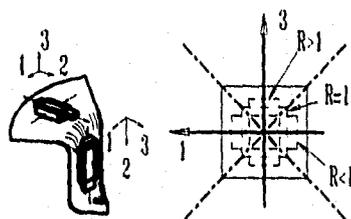
La copa embutida presenta normalmente un labio ondulado, defecto que se conoce con el nombre de orejas. La colocación de éstas, se precisa midiendo el ángulo entre el punto más alto de cada oreja y la dirección de laminación, pero en general, las orejas adoptan posiciones simétricas respecto de la dirección de laminación, así tanto la colocación como la altura de éstas tienen su origen en la textura del material.

El factor  $r$  es un parámetro que indica la habilidad de una lámina para soportar el adelgazamiento o engrosamiento cuando está bajo la acción de fuerzas de tensión o compresión. Esta es una medida de la anisotropía plástica y está relacionada con la orientación de la cristalografía preferente de un metal policristalino. Esta resistencia para adelgazar o engrosar contribuye a la fabricación de diversas formas metálicas, tales como copas cilíndricas profundas, mediante los procesos de embutición. El valor del factor  $r$ , por lo tanto, es considerado como una medida de embutibilidad de la lámina<sup>(6)</sup>, esto es particularmente útil para la evaluación de materiales en la fabricación de partes, en las cuales una porción de éstas o en su totalidad, serán formadas mediante procesos de embutición.

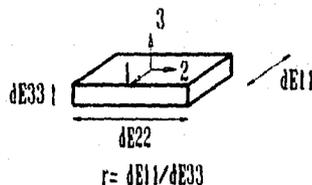
Para algunos materiales este factor permanece esencialmente constante sobre un rango de esfuerzo plástico para una carga máxima en una prueba de tensión.

Los materiales usualmente tienen diferentes valores de  $r$  cuando se prueban en diferentes orientaciones relativas a la dirección de rolado. El valor del índice  $r$  sería reportado como  $r_0$ , si el ángulo de muestreo de un cupón de prueba es paralela a la dirección de rolado; si además, la medición fue hecha después de un 20% de elongación, entonces, para denotar el porcentaje de esfuerzo en el cual el valor fue medido, el valor sería reportado como  $r_0^{20}$ .

La conclusión a la que llega Stüwe es que, la embutibilidad mejora si el material es fácilmente compresible en la dirección circunferencial ( $ds_{11}$  lo mayor posible) y muy resistente en la dirección normal ( $ds_{33}$  lo menor posible). Ambas cosas se consiguen elevando el valor del índice  $r$ , que depende de la textura del material. (ver figura 9)



(a)



(b)

Figura 9. Relación del índice "r" con la embutibilidad del material (a) y definición del índice "r" (b). Fuente: Stüwe, op. cit., pp. 216-217.

Supongamos ahora que un cristal está orientado de forma que posee un plano de deslizamiento paralelo a la dirección 3 y formando un ángulo de 45° con la dirección 2 (en la que realiza el ensayo de tracción), la dirección de deslizamiento se supone normal a la dirección 3. Como se deduce de la definición de "r" para este cristal, dicho índice alcanzará un valor muy elevado, en teoría infinito<sup>(3)</sup>. (ver figura 10)

El mismo cristal puede estar orientado de tal forma que alcance un valor teóricamente nulo para "r" (figura 10b). En la parte inferior de la figura 10 se muestran las formas idealizadas que adoptará el cristal deformado para valores del índice "r" infinito (izquierda) y cero (derecha).

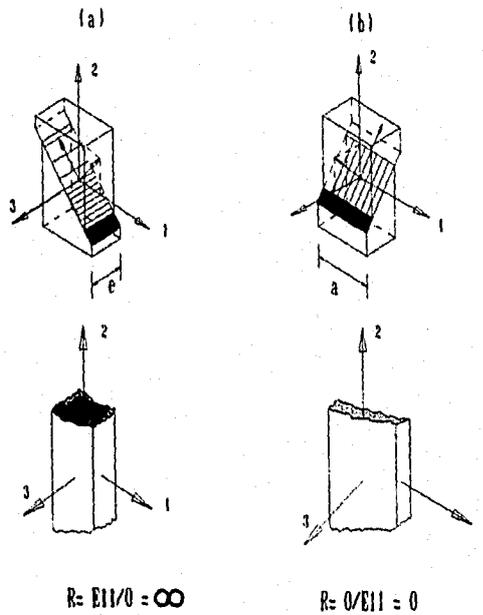


Figura 10. Influencia de la orientación del cristal sobre el índice "r". Fuente: *ibidem.*, p. 218.

En el caso de una chapa policristalina (figura 11), si los granos I y II están orientados en las dos formas extremas anteriores, y suponiendo que el grano II lo esté de una forma intermedia, en la dirección  $\theta_2$  se obtendrá una buena embutibilidad y gran alargamiento que, al no ser secundado en la dirección continua  $\theta_1$ , producirá una oreja.

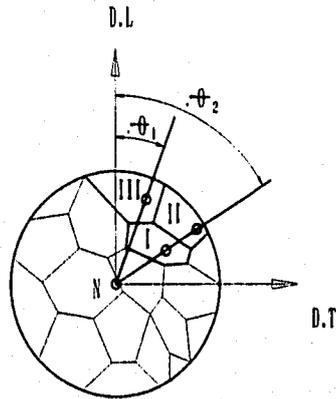


Figura 11. Fuente: *ibidem*, p. 219.

Por consiguiente, los valores elevados de  $\alpha$  mejoran la embutibilidad pero, las variaciones en las direcciones radiales son perjudiciales por producir orejas. Estas orejas se forman en los máximos relativos del índice en las direcciones radiales. La isotropía planar  $\alpha=0$ , es ideal para embutir.

El valor medio de " $\alpha$ " en las direcciones radiales define el grado de anisotropía en la dirección normal a la chapa, y hemos visto que este valor medio es tanto más favorable cuanto más elevado. Es por tanto, deseable una elevada anisotropía normal.

En conclusión, el material ideal para embutir no es un material isótropo, sino un material con elevada anisotropía normal ( $\alpha > 1$ ) e isotropía planar ( $\alpha = 0$ )<sup>(3)</sup>.

En términos matemáticos, el índice  $\alpha$  (en láminas que han sido esforzadas mediante tensión uniaxial lo suficiente para inducir flujo plástico), es el índice del esfuerzo real que ha ocurrido en una dirección del ancho  $w$  y es perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada y el esfuerzo real en la dirección del espesor  $t$ . Así,  $\alpha$  es numéricamente igual a<sup>(6)</sup>:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \dots \dots \dots (2)$$

donde:

$\epsilon_w$  = Deformación en el ancho de la lámina.

$\epsilon_t$  = Deformación en el espesor de la lámina.

El índice  $r$ , también conocido como anisotropía normal, podría ser determinado mediante los cambios surgidos en el ancho y espesor del espécimen en una deformación plástica, con tal de que estos cambios puedan ser medidos con suficiente precisión en una prueba de tensión. Si esto no fuera posible, es preferible medir los cambios de longitud y ancho, y suponiendo el volumen constante, calcular  $r$  determinando el ancho original  $w_0$  con una tolerancia de  $\pm 0.005$  pulgadas o  $\pm 0.13$  milímetros. Mida la longitud calibrada  $l_0$  con una tolerancia de  $\pm 0.001$  pulgadas o  $\pm 0.025$  milímetros en una pulgada de longitud.

Estire el espécimen axialmente hasta su alargamiento más allá de cualquier elongación del punto de fluencia pero sin exceder el esfuerzo en la carga máxima.

Mida el ancho  $w_f$  y la longitud calibrada final  $l_f$  en la misma forma y tolerancia como en los valores iniciales (véanse las fórmulas para su aplicación).

El índice  $r_m$  es el promedio del valor  $r$  obtenido en tres direcciones:  $0^\circ$  (paralelo),  $45^\circ$  (diagonal), y  $90^\circ$  (transversal) a la dirección de rolado.

Delta  $r$  ( $\Delta r$ ) es una medida de la tendencia de la lámina a una embutición no uniforme y a la formación de orejas en las direcciones más elevadas del valor  $r$ , éste también es conocido como anisotropía planar. En materiales laminados en frío y en láminas recocidas y con bajo carbón,  $r_0$  y  $r_{90}$  son usualmente mayores que  $r_{45}$ , mientras que en aceros rolados en caliente  $r_{45}$  podría ser mayor.

Se sabe que;

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_l}$$

donde:

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\varepsilon_l = \ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right) \dots\dots\dots (4)$$

y suponiendo que el volumen es constante, se tiene que;

$$\varepsilon_l = \ln\left(\frac{l_0 w_0}{l_f w_f}\right) \dots\dots\dots (4a)$$

sustituyendo, se tiene que;

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f w_f}{l_0 w_0}\right)} \dots\dots\dots (5)$$

dejando así, el índice  $r$  ya sea en términos del ancho y espesor; o en términos de longitud y ancho. Y para los factores  $r_m$  y  $\Delta r$ , se tiene que;

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \dots\dots\dots (7)$$

### I.1.2 Criterio de von Mises

El efecto de la anisotropía puede ser ilustrado en forma gráfica con la ayuda del criterio del punto de fluencia de von Mises<sup>(7)</sup>, ya que ésta es una excelente herramienta para describir la fluencia de una lámina cargada, de forma tal, que sufre la combinación de varios esfuerzos de tensión y compresión en su plano.

En la teoría de dislocaciones, según comenta R. E. Smallman<sup>(8)</sup>, es usual considerar el flujo de esfuerzos o esfuerzos de fluencia de los metales dúctiles bajo condiciones simples de esforzamiento, pero en la práctica, los metales están bajo condiciones más complejas de esfuerzos; por ejemplo, durante las operaciones de formación (rolado, extruido, etc.), de forma tal que se necesita correlacionar la fluencia bajo esfuerzos combinados en una prueba uniaxial. Para llevar con buen éxito el criterio del esfuerzo de fluencia, se debe suponer al metal mecánicamente isotrópico y que se deforma plásticamente a volumen constante. En la suposición de una isotropía plástica, el cortante macroscópico toma lugar a lo largo de las líneas del máximo esfuerzo cortante y el deslizamiento cristalográfico es ignorado, así como también el esfuerzo de fluencia es igual en tensión que en compresión.

Mientras que la mayoría de cristales anisotrópicos sufren un tratamiento plástico verdaderamente complejo, existe un tipo de anisotropía que puede ser estudiado sin excesiva complicación, por ejemplo, el tipo de respuesta que despliega la madera es una buena ilustración de ésta. La madera tiene diferentes esfuerzos de fluencia a lo largo de las tres direcciones definidas por sus fibras y por la normal a éstas. Similarmente, una lámina o plancha rolada de metal exhibirá propiedades plásticas ortotrópicas; la dirección de rolado, la dirección transversal, y la dirección en el espesor definen los tres ejes (es decir, la dirección longitudinal, transversal larga y corta). La condición de ortotropía es que existen tres planos simétricos y perpendiculares entre sí cuya intersección define los ejes de ortotropía y, de acuerdo a Hill<sup>(9)</sup>, quien desarrollo un análisis matemático, éste se puede escribir como sigue:

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \dots\dots\dots (8)$$

Esta ecuación se reduce a la ecuación 9, sabiendo que para el caso de isotropía se tiene la siguiente condición:

$$F=G=H=L=M=N=\frac{1}{2\sigma_y^2}$$

cuando  $\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia (en cualquier dirección):

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ (\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{11}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + 2\sigma_{12}^2 + 2\sigma_{13}^2 + 2\sigma_{23}^2 \right]^{1/2} \dots (9)$$

La ecuación 9 es la representación matemática del criterio de von Mises cuando es referido a un sistema general de ejes.

Derivando la ecuación 8 con respecto de  $\sigma_{13}$  y siguiendo el procedimiento según Hill y Backofen<sup>(10)</sup> obtenemos ecuaciones similares a las de von Mises.

$$\begin{aligned} d\epsilon_{11} &= ds \left[ H(\sigma_{11}-\sigma_{22}) + G(\sigma_{11}-\sigma_{33}) \right] \\ d\epsilon_{22} &= ds \left[ F(\sigma_{22}-\sigma_{33}) + H(\sigma_{22}-\sigma_{11}) \right] \dots \dots \dots (10) \\ d\epsilon_{33} &= ds \left[ G(\sigma_{33}-\sigma_{11}) + F(\sigma_{33}-\sigma_{22}) \right] \end{aligned}$$

Donde,  $ds$  tiene el mismo significado como  $d\epsilon_{eff}/\sigma_{eff}$  lo tiene en la ecuación de von Mises. Para el caso de isotropía,  $ds$  puede ser calculada mediante la comparación de los dos sistemas de ecuaciones.

Los dos casos particulares de anisotropía ortotrópica son usualmente discutidos donde concierne las hojas delgadas laminadas. El primer caso podría ser llamado isotropía dentro del plano (in-plane). Si definimos el plano de la lámina como  $x_1x_2$ , la dirección transversal es  $Ox_3$ . La isotropía in-plane existe cuando los esfuerzos de fluencia en todas las direcciones dentro del plano de la lámina son el mismo (por ejemplo  $\sigma_{y1} = \sigma_{y2}$ ), sin embargo,  $\sigma_{y3}$  no necesariamente es

el mismo. La anisotropía in-plane existe cuando  $\sigma_{y1} \neq \sigma_{y2}$ , usualmente  $\sigma_{y1} > \sigma_{y2}$  en el rolado ( $\sigma_{y1}$  es la dirección de rolado y  $\sigma_{y2}$  la dirección transversal). En el embutido, esto causa el fenómeno antes mencionado como "orejas". El material es embutido más fácilmente a lo largo de la dirección débil, y la copa resultante tiene "orejas" a lo largo de la dirección fuerte.

Esto supone que los ejes  $Ox_1, Ox_2$  y  $Ox_3$  (dirección en el espesor) son los ejes principales de esfuerzo los cuales coinciden con el eje principal de deformación, por consiguiente, se supone que se hacen tres pruebas a lo largo de estas direcciones, y que se obtienen los esfuerzos de fluencia  $\sigma_{y1}, \sigma_{y2}$  y  $\sigma_{y3}$ .

Los parámetros  $r$  y  $P$  son definidos como el factor de deformación tensil transversal (the tensile transverse strain ratio).

$$r = \frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_3} \dots\dots\dots(11)$$

$$P = \frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_3}$$

si el material se exhibe en isotropía in-plane,

$$r = P$$

Si pudiésemos determinar experimentalmente los esfuerzos de fluencia  $\sigma_{y1}, \sigma_{y2}$  y  $\sigma_{y3}$  de un espécimen de tensión uniaxial a lo largo de las direcciones principales  $Ox_1, Ox_2$  y  $Ox_3$ , obtendríamos relaciones entre los coeficientes F, G y H. Ya que estas son las direcciones principales, los términos que tienen esfuerzos cortantes en la ecuación 8 se reduce a:

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 1 \dots\dots\dots(12)$$

Para una prueba de tensión conducida lo largo de la dirección  $Ox_1$ , la fluencia es definida como:

$$G + H = \frac{1}{\sigma_{y1}^2} \dots \dots \dots (13)$$

Para una prueba de tensión conducida a lo largo de  $Ox_2$ , la fluencia es definida como:

$$F + H = \frac{1}{\sigma_{y2}^2} \dots \dots \dots (14)$$

Finalmente, para una prueba conducida a lo largo de  $Ox_3$ ,

$$F + G = \frac{1}{\sigma_{y3}^2} \dots \dots \dots (15)$$

Para el caso de isotropía in-plane,

$$\sigma_{y1} = \sigma_{y2} = \sigma_{y(1,2)}$$

Para las ecuaciones 13 y 14 se tiene que;

$$G = F$$

de forma similar,

$$G = F = \frac{1}{2\sigma_{y3}^2}$$

y

$$H = \frac{1}{\sigma_{y(1,2)}^2} - \frac{1}{2\sigma_{y3}^2}$$

Sustituyendo en la ecuación 12 se convierte en,

$$(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + \left( \frac{2\sigma_{y3}^2}{\sigma_{y(1,2)}^2} - 1 \right) (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2\sigma_{y3}^2 \dots\dots\dots (16)$$

El siguiente paso es obtener una relación entre los esfuerzos de la deformación en láminas delgadas, la cual es aplicable en condiciones de esfuerzos en el plano para la ecuación 16. Para esto, corresponde hacer  $\sigma_3 = 0$ , porque los esfuerzos normales a lo largo de las direcciones del espesor son cero debido a la reducción del espesor de la lámina.

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\sigma_1\sigma_2 \left( \frac{\sigma_{y(1,2)}^2}{2\sigma_{y3}^2} - 1 \right) = \sigma_{y(1,2)}^2 \dots\dots\dots (17)$$

Cuando  $\sigma_{y(1,2)} = \sigma_{y3}$ , la ecuación 17 se reduce a

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_y^2$$

Esta es la ecuación de una elipse que describe el punto de fluencia en el plano de esfuerzo. En el caso de  $\sigma_{y(1,2)} \neq \sigma_{y3}$ , importantes conclusiones podrán ser denotadas para la ecuación 17, o su forma equivalente que se muestra abajo, la cual es obtenida por la aplicación de las ecuaciones 10 y 11 en la 17:

$$\frac{\sigma_{y3}}{\sigma_{y(1,2)}} = \sqrt{\frac{1+r}{2}} \dots\dots\dots (18)$$

Cuando  $r < 1$  o  $\sigma_{y3} < \sigma_{y(1,2)}$ , la elipse es cortada a lo largo de su eje principal. Cuando  $r > 1$  o  $\sigma_{y3} > \sigma_{y(1,2)}$ , la elipse es alargada. Esto tiene un importante efecto en la formabilidad, y se puede observar en la figura 12. Los valores de  $r$  varían desde 0 hasta 5, y son representados por elipses más alargadas según sea el caso. Cuando una lámina es

alargada uniformemente, podemos suponer que  $\sigma_y = \sigma_2$ ; así, estamos situados a lo largo del eje principal de la elipse. El esfuerzo en el cual la lámina fluiría plásticamente es muy dependiente del factor  $\sigma_{y3}/\sigma_{y(1,2)}$ . Pero afortunadamente, el flujo en el plano  $Ox_1 Ox_2$  está determinado por el flujo de esfuerzos en la dirección  $Ox_3$ , lo cual es una importante conclusión. En el caso particular de  $\sigma_{y3} > \sigma_{y(1,2)}$ , es llamado "textura de endurecimiento", éste corresponde al valor del parámetro  $\kappa$  cuando es mayor que 1.

La "textura de reforzamiento" ha tomado ventaja de algunos sistemas de aleación; las aleaciones HC son especialmente dóciles para las "texturas de endurecimiento" porque ellas se emparejan fácilmente, y el emparejamiento es inherentemente un fenómeno anisotrópico. Así, por lo tanto, los altos valores de  $\kappa$  conllevan a una formabilidad deseable, por que la aleación resiste el adelgazamiento durante el embutido de la pieza.

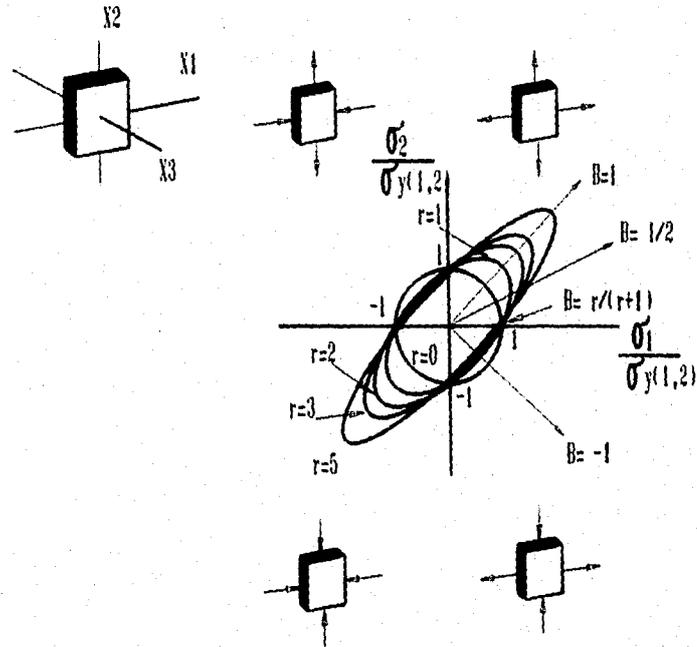


Figura 12. Plano de esfuerzos, según von Mises, con isotropía planar o textura, los cuales son rotacionalmente simétricos con respecto a la dirección del espesor del material, X3 (los valores del índice r indica el grado de anisotropía). Fuente: Meyers, Mechanical Metallurgy: Principles and Applications, p. 630.

### I.1.3 Exponente de Endurecimiento por Trabajo n

En una red cristalina existen muchas clases de defecto que van desde falta de apilamientos sencillos hasta campos de deformación complejos causados por impurezas, todos pueden tener alguna influencia en el comportamiento plástico; pero la influencia más importante procede de aquellos defectos conocidos como "dislocaciones" <sup>(11)</sup>.

En este punto del presente trabajo se deberá entender por igual cuando mencionemos "endurecimiento por trabajo" o "endurecimiento por deformación". Por otro lado debemos recordar que un metal también puede ser endurecido por precipitación. Aunque en realidad el endurecimiento por deformación plástica es uno de los métodos más importantes en reforzamiento de metales.

Si las dislocaciones se multiplican en un material y cada una posee un campo de deformación, es obvio que una red deformada plásticamente se hará progresivamente más distorsionada. Ahora, es más difícil para éstas moverse a través de una red distorsionada que por una que no lo está, así aumentarán las tensiones de activación y será progresivamente más difícil producir flujo plástico. Sin embargo, la multiplicación de dislocaciones no puede ser la única causa de este efecto, porque la velocidad de aumento de las últimas no es bastante rápida ni su efecto bastante severo.

La deformación plástica y el consecuente endurecimiento por trabajo resulta en un incremento en la densidad de las dislocaciones. Un material recocido, por ejemplo, tendrá cerca de  $10^6$  a  $10^8$  dislocaciones por  $\text{cm}^{-2}$ , mientras un metal trabajado plásticamente en frío podría contener arriba de  $10^{12}$  dislocaciones por  $\text{cm}^{-2}$ .

Existen otros mecanismos que quizá juegan un papel más importante. Estos incluyen: apilamientos de dislocaciones de deslizamiento en planos que intersectan, agotamiento de fuentes de dislocaciones de energía más baja, interacción de solutos e impurezas con dislocaciones y creación de vacantes de red por interacción de dislocaciones. La discusión de estos mecanismos está fuera de lugar aquí, ya que la explicación de esto no es nuestro fin sino tan solo lo mencionamos para tenerlo en cuenta y no olvidar su existencia e importancia.

Si, a medida que la deformación progresa, se representa la tensión real con respecto a la deformación real, se encontrará que, como indica la figura 13, la velocidad de endurecimiento por deformación tiende a hacerse casi uniforme, esto es, la curva se convierte en una línea recta. La pendiente de la parte recta de ella se conoce como "coeficiente de acritud" y está íntimamente relacionado con el módulo de cizalladura y parece ser aproximadamente proporcional a él.

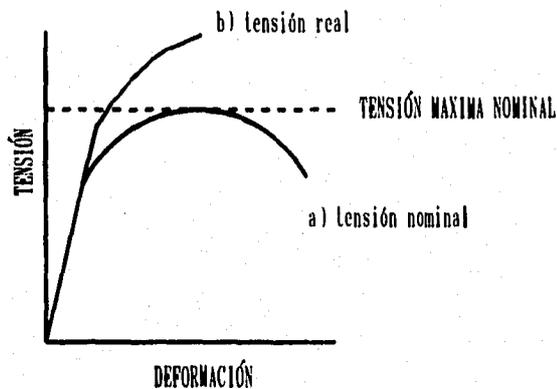


Figura 13. Comparación en la forma de la curva tensión nominal-deformación con la curva tensión real-deformación. Fuente: Tweedale. Propiedades Mecánicas de los Metales, p. 77.

Un material con tamaño de grano pequeño se endurecerá por deformación más rápidamente que el mismo material con tamaño de grano mayor, esto se puede apreciar en una gráfica esfuerzo-deformación en la cual se compara curvas de un mismo material pero con un tamaño de grano diferente (ver figura 14). Sin embargo, el efecto sólo se aplica en las primeras etapas de la deformación plástica y la influencia desaparece a medida que la estructura de grano se destruye. El principal efecto es, por tanto, un cambio más brusco de la deformación elástica a la plástica, puesto que la tensión de fluencia se eleva a medida que la destrucción de la estructura aumenta.

En materiales policristales, debido a la mutua interferencia de los granos y a las deformaciones poco compatibles entre ellos, ocurren deslizamientos en una forma fácil lo que repercute en un apreciable endurecimiento por trabajo al inicio de la aplicación del esfuerzo.

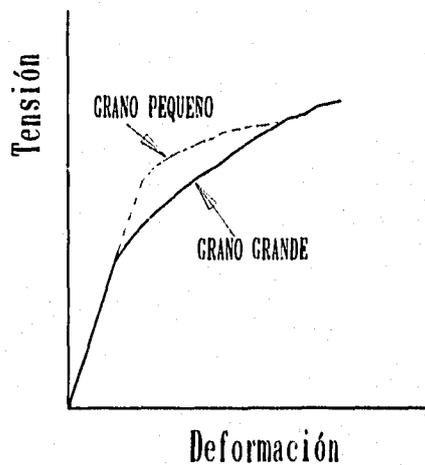


Figura 14. Efecto comparativo del tamaño de grano en la forma de una curva tensión real-deformación. Fuente: *ibidem.*, p. 78.

El estudio del comportamiento de las dislocaciones está basado en un sin fin de teorías destacando la de Taylor (1934) y en parte la hecha por Mott<sup>(7)</sup>, que aunque antiguas, tienen gran influencia en las actuales, éstas no se verán en detalle, tan solo mencionaremos que ellas dividen convenientemente una curva genérica esfuerzo cortante-deformación (en inglés shear stress-shear strain curve) en tres regiones o estados de deformación (ver figura 15), además aseveran que el estado I no existe en policristales.

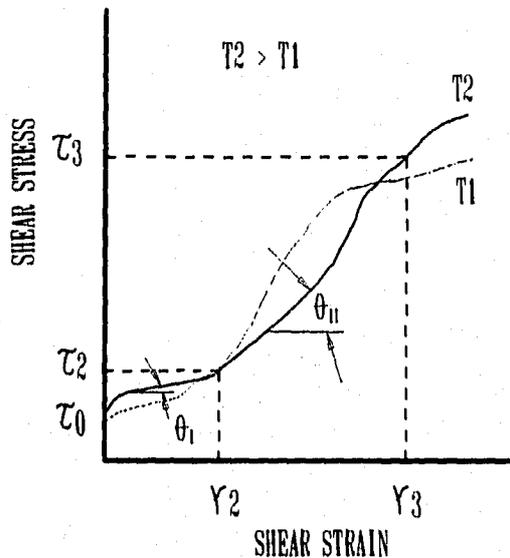


Figura 15. Curvas genéricas de esfuerzo cortante-deformación para monocristales cúbicos centrados en caras en dos diferentes temperaturas. Fuente: *ibidem.*, p. 359.

Haciendo una comparación de las curvas esfuerzo-deformación, que se muestran en la figura 16, se puede notar que los estados de endurecimiento I y II están ausentes en los metales policristalinos. Los metales con estructura HC poseen un menor número de sistemas de deslizamiento que los metales cúbicos (por ejemplo el aluminio). Por lo tanto, los metales HC no son capaces de deformarse fácilmente bajo las restricciones impuestas por una estructura policristalina. Consecuentemente, los policristales HC son más difícil de deformar y muestran una menor ductilidad que los monocristales apropiadamente orientados del mismo metal<sup>(7)</sup>.

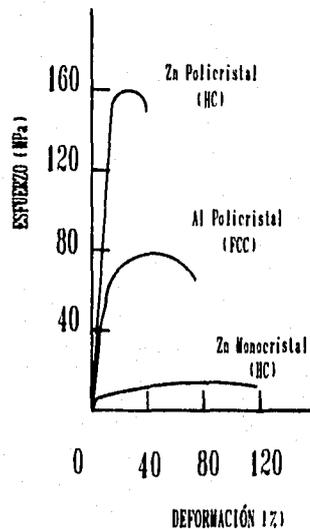


Figura 16. Comparación entre curvas esfuerzo-deformación representativas de materiales policristalinos y un material monocristalino.

La ecuación usada durante muchas décadas para describir la curva esfuerzo-deformación de un metal policristalino es debida a Ludwick<sup>(12)</sup> y Hollomon<sup>(13)</sup>. Ésta se describe a continuación, así como también un método para hacer el cálculo del exponente de endurecimiento por trabajo  $n$ <sup>(14)</sup>.

$$\sigma = K \epsilon^n \dots\dots\dots (19)$$

donde:

- $\sigma$  = esfuerzo real
- $\epsilon$  = deformación plástica real
- $K$  = coeficiente de esforzamiento
- $n$  = exponente de endurecimiento por trabajo

Pero, por otro lado, también es posible calcular el índice por medio del uso de un procedimiento de la forma logarítmica, para lo cual, es indispensable tener en cuenta los siguientes términos:

deformación,  $e = \frac{\Delta l}{l_0}$

esfuerzo ingenieril,  $S = \frac{F}{A_0}$

deformación real,  $\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1+e)$

esfuerzo real,  $\sigma = \frac{F}{A} = S(1+e)$

por lo que tenemos que;

$$\log \sigma = \log k + n \log \epsilon \dots\dots\dots (19a)$$

donde  $\sigma$  y  $\epsilon$  son los valores en el intervalo seleccionado.

La ecuación para el cálculo por regresión lineal es como sigue:

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\log \epsilon_i \log \sigma_i) - \left( \sum_{i=1}^N \log \epsilon_i \sum_{i=1}^N \log \sigma_i \right)}{N \sum_{i=1}^N (\log \epsilon_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^N \log \epsilon_i \right)^2} \dots\dots\dots (20)$$

Las ecuaciones para el cálculo de la pendiente, intersección, y la desviación estándar de la pendiente son hechas convenientemente mediante la representación simbólica siguiente:

$y = \log \sigma$

$x = \log \epsilon$

$b = \log K$

$n =$  valor de  $n$

$N =$  número de pares de datos

$SD =$  desviación estándar del valor  $n$

por lo que sustituyendo estos valores en la ecuación 20 queda de la siguiente forma:

$$n = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \dots \dots \dots (21)$$

y para la desviación estándar se tiene que:

$$b = \frac{\sum y - n \sum x}{N(n)} \dots \dots \dots (22)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (y - b - nx)^2}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \frac{N}{N-2}} \dots \dots \dots (23)$$

De esta manera, tenemos las ecuaciones suficientes para determinar el índice de endurecimiento por trabajo  $n$  y el factor de anisotropía  $x$ , con los cuales podemos cuantificar que tan buena o que tan mala es una lámina y si ésta es la indicada para nuestro proceso de fabricación.

## 1.2 Ensayos de Embutibilidad

### 1.2.1 Proceso de Embutición

Es la operación mecánica en la cual una chapa adquiere la forma de un recipiente al ser formado mediante punzón y matriz (figura 17). La forma deseada se puede lograr en una o más etapas, dependiendo la complejidad de la forma deseada y la profundidad del embutido.

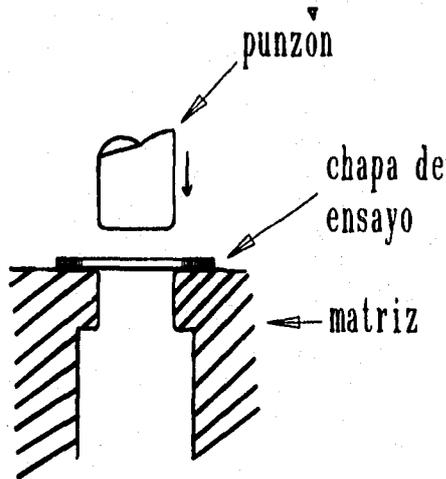


Figura 17. Esquema de la operación de embutido.

La embutición se puede lograr gracias a la plasticidad del material, que es un comportamiento típico de los materiales metálicos (y de algunos otros materiales); que al aplicarles una fuerza tienden a extenderse y/o comprimirse, causando una deformación que puede ser temporal (elástica) o una deformación permanente (plástica) y gracias a ésta última se puede llevar a cabo la embutición.

El material sufre una deformación que se convierte en permanente debido a varios mecanismos de nivel estructural, (ver sección I.1). En consecuencia cada material se puede deformar en menor o mayor grado (aun el mismo material puede deformarse de manera distinta a otro espécimen de la misma composición debido a imperfecciones, impurezas o

simplemente por la sola acción de la temperatura). Así surge la necesidad de saber que materiales debemos utilizar para embutir; ya mencionamos anteriormente que un buen parámetro para medir la embutibilidad de los materiales es el factor  $r$ , el valor de éste nos da una idea de que tan resistente es un material para soportar fuerzas de tensión y/o compresión, los materiales presentan diferentes valores de  $r$ . (ver figura 8)

Otro factor de importancia que resulta de la deformación plástica de los materiales, por el trabajo en frío es el índice de endurecimiento por trabajo  $n$ , el proceso de éste explicado anteriormente; consiste en aplicar un esfuerzo al material para deformarlo plásticamente, logrando con ello una mayor resistencia a ser deformado y requiriendo un mayor esfuerzo para una deformación adicional. (ver figura 13)

Con el índice de endurecimiento por trabajo  $n$  y el factor de anisotropía  $r$  tenemos las herramientas necesarias para estimar que tan bueno puede ser un material para llevar a cabo el embutido

Generalmente es aceptado que el factor límite en el desarrollo de los procesos de embutición, se encuentre en las propiedades mecánicas más que en los métodos de manipulación ideados por los ingenieros. La embutición generalmente se lleva a cabo en metales de aleaciones dúctiles, tales como latón, cobre, aluminio, varias aleaciones de níquel y acero dulce. Aunque también se trabajan aleaciones menos dúctiles utilizando operaciones modificadas y auxiliadas de lubricantes.

Es interesante por lo tanto saber como es que el material va adoptando la forma deseada fluyendo entre las herramientas. Apoyándonos en la figura 18<sup>(15)</sup>, describiremos el flujo del metal durante la formación de una copa. La forma original del metal (figura 18-2), un disco de radio OY, está en contacto con el punzón durante el embutido, y el metal en esta área estará tensionado durante el proceso. Así pues, en la copa terminada (figura 18-3), la longitud del arco YY' es la misma que en la forma original. La longitud del arco XX' del arco original, por otra parte, se ha reducido de manera que es el mismo que YY' por lo tanto, durante el embutido, la parte de la forma entre YY' y XX', particularmente cerca de XX', se encontrará en compresión y consecuentemente, presentará tendencia a ondularse, por ello resulta importante que la lámina este presionada con un pisador, para evitar arrugas en esta parte de la copa.

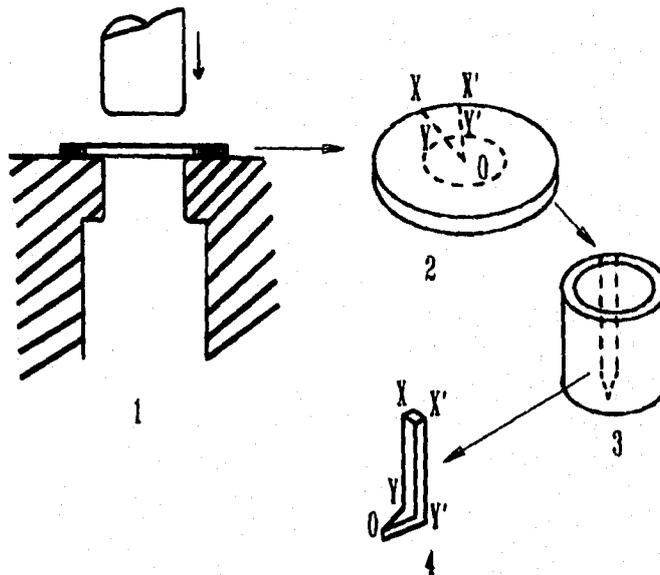


Figura 18. Formado de copa mediante embutido en el que se aprecia la deformación del material en una sección del material. Fuente: Higgins, Ingeniería Metalúrgica, p. 282.

Cuando se lleva a cabo la embutición de láminas es importante, conocer de que manera se está deformando el material. Al embutir una copa, el metal que forma el fondo no sufre deformación (ver figura 19); la pared cilíndrica queda sujeta a una cantidad creciente de trabajo en frío, que va del fondo a la orilla superior. Cerca del fondo la cantidad de deformación en frío puede ser tan pequeña que si se le aplica un tratamiento térmico (recocido) a la copa se forman muy pocos núcleos en esta región cuando se alcanza la temperatura de recristalización.

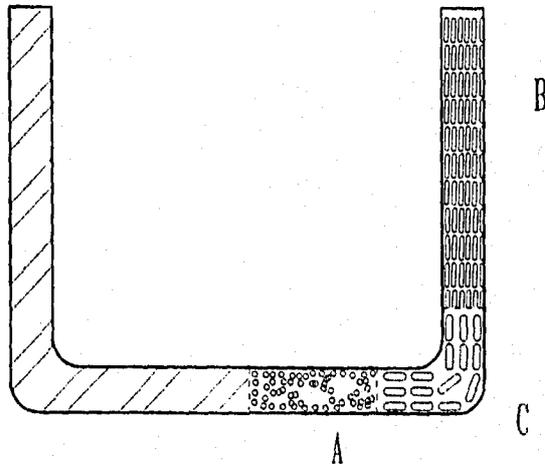


Figura 19. Forma del grano después de ser deformada una lámina por embutición profunda.

Este tipo de defectos se pueden corregir controlando el tamaño de grano de la lámina. Un grano áspero, con frecuencia se manifiesta como una superficie rugosa en aquellas partes de la componente que sufren la mayor cantidad de deformación en el embutido y que no hayan estado en contacto con la cara del punzón (ver figura 19 en el área B y C de la copa)<sup>(15)</sup>.

Para evitar que se produzca este defecto, es necesario, controlar el tamaño del grano de la lámina que se va a estampar. El recocido del material nos controla el tamaño de grano, a una temperatura muy elevada o por un período demasiado prolongado, conduce a la formación de granos grandes. Aun cuando la ductilidad es más alta en el caso de granos grandes, cuyo tamaño varía entre 0.06-0.07 mm, es mejor restringir el tamaño de grano a un máximo de 0.04 mm, a costa de una ligera reducción en la ductilidad (el tamaño de grano puede ser un poco mayor a este último valor si la embutición se realiza con prensachapas o planchador)<sup>(15)</sup>.

Por ejemplo en el caso del acero suave, se puede corregir una superficie áspera (piel de naranja) normalizando los vasos embutidos a 910 °C en lugar de darles un tratamiento térmico a 650 °C (recocido de recristalización). Con lo cual se conduce a la plena recristalización del material en forma de

austenita de grano fino, al enfriarse ésta se transforma a ferrita y perlita.

En el embutido pueden presentarse otras fallas como son la fractura del material en la curvatura del punzón (ver figura 7), causado por el adelgazamiento excesivo del material en esa zona, el esfuerzo producido en el metal, excede a su resistencia de tensión (la fuerza máxima de embutición no debe de exceder de la resistencia de tensión del material, multiplicada por el área anular de la cubierta en su sección más delgada)<sup>(15)</sup>.

Otra causa que puede originar ésta falla es una presión excesiva en la sujeción del disco que restrinja el flujo del metal entre el punzón y la matriz. Un holgura insuficiente entre el punzón y la matriz o un radio inadecuado, ya sea del punzón o la matriz, puede ser la causa.

Una falla típica del embutido es la formación de orejas, debido a las propiedades direccionales en la lámina original, de esta manera el material se deformará con mayor facilidad en una dirección que en otra (ver figura 7)<sup>(16)</sup>.

Como podemos ver la embutición es una operación mecánica en la que una lámina se deforma de manera plástica, debido a esfuerzos de tensión y compresión, adquiriendo la forma deseada.

Para que la embutición se lleve a cabo de manera satisfactoria es conveniente calcular y considerar todos los factores que intervienen en dicha operación y que a continuación mencionaremos.

### **1.2.2 Fuerza necesaria para Embutir**

Como se mencionó, durante la operación, el material se deforma plásticamente, esto ocasiona que la presión aplicada por el punzón varíe (véase figura 20). En la gráfica se puede observar que del punto 1 al 2 ocurre la conformación alcanzando en 2 la máxima presión; de 2 a 3 la presión decrece y de 3 a 4 el punzón ejecuta su carrera de retorno<sup>(16)</sup>.

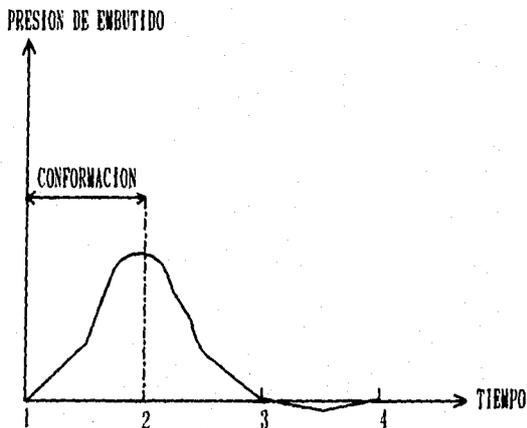


Figura 20. Gráfica que muestra la variación de la presión conforme se realiza el embutido. Fuente: Ulrich, Ingeniería de Manufactura, p. 452.

Las siguientes fórmulas se utilizan para calcular la fuerza requerida por el punzón:

$$F = \pi \cdot d \cdot \sigma (d + D \cdot K) \dots \dots \dots (24)$$

$$F = \sigma (2\pi R K_A + L K_B) \dots \dots \dots (25)$$

Donde:

- F. Fuerza requerida (Kg)
- d. Diámetro del recipiente (mm)
- D. Diámetro del disco original (mm)
- e. Espesor de la chapa (mm)
- $\sigma$ . Resistencia última a la tensión del material (Kg/mm<sup>2</sup>)
- K. Constante que involucra fuerzas por fricción y flexión, varía de 0.6 a 0.7
- R. Radio de la esquina del recipiente (mm)
- L. Suma de las longitudes de las paredes o perímetros (mm)
- $K_A$  y  $K_B$ . La constante  $K_A$  varía de 0.5 (para un embutido poco profundo) a 2 (para una profundidad de 5 a 6 veces el radio de la esquina).

Debemos aclarar que la ecuación 24 es utilizada para piezas cilíndricas y la 25 para rectangulares.

### **1.2.3 Presión del Prensachapas**

Para evitar arrugas a consecuencia de una mala sujeción de la chapa es necesario adicionar la fuerza del presachapas (pisador) que normalmente es de  $1/3$  de la fuerza total requerida o bien es función del tipo o clase de material utilizado<sup>(17)</sup>.

La fuerza requerida para una buena embutición, puede variar notablemente a consecuencia de asperezas en las paredes de la herramienta, holgura inadecuada o conicidad errónea entre punzón y matriz, lubricación deficiente o inadecuada, etc.

Éstas son algunas de las recomendaciones para calcular la fuerza para una buena embutición (sin que la chapa sufra ruptura, que no se formen arrugas y que el espesor de las paredes quede uniforme en la pieza terminada).

Se puede enumerar una serie de recomendaciones para evitar roturas en la chapa, como por ejemplo:

- Radio de la embocadura o entrada de la matriz adecuado<sup>(17)</sup>.  
(8 a 10 veces el espesor de la chapa para acero)  
(3 a 5 veces el espesor de la chapa para aluminio)
- Presión adecuada del prensachapas. En la tabla 1 se recomiendan presiones de planchador, de acuerdo al tipo de material, y en la tabla 2 de acuerdo al espesor del material.

**TABLA 1.** Presión recomendable en el planchador para varios metales recocidos. Estos valores son aproximadamente 1/150 a 1/200, la suma de las resistencias a la tensión en el límite de la fluencia y en la zona de ruptura.

<b>METALES</b>	<b>PRESIÓN DEL PLANCHADOR (kg/mm<sup>2</sup>)</b>
Acero al bajo carbono	0.16
Acero inoxidable austenítico	0.32
Aluminio	0.032
Aleaciones del aluminio	0.064 a 0.16
Cobre	0.064
Latón	0.08 a 0.096
Bronce fosforado	0.128

Fuente: Ulrich, Ingeniería de Manufactura, p. 452

**TABLA 2.** Fuerza requerida en el planchador para el embutido profundo de acero al bajo carbono en función del espesor del material. Los valores de Kg varían de 0.2 (para radio de embocadura amplio y fuerza nula del prensa chapas) 0.3 (para un radio amplio).

<b>ESPESOR DEL MATERIAL (mm)</b>	<b>FUERZA DEL PLANCHADOR COMO % DE LA FUERZA DE EMBUTIDO</b>
0.13	85.0
0.25	67.0
0.38	57.0
0.51	50.0
0.63	44.0
0.76	39.0
1.30	23.0
1.80	14.0
2.50	0.90
3.20	8.50
4.70	8.25
6.30	8.00

Fuente: *ibidem*.

Al embutir un metal laminado el grano del material sufrirá cambios, éste presenta distintas propiedades en diferentes direcciones. En el caso del embutido, la orientación del grano raramente es un obstáculo durante el trabajo. Sin embargo, si está asociada con una aglomeración de constituyentes duros, por ejemplo el carbono en el acero, pueden causar en las laminas gruesas irregularidades en el flujo del metal durante el embutido, permitiendo mayor plasticidad en algunas zonas y restringiéndola en otras, esto trae como consecuencia defectos en la pieza terminada (orejas).

Las láminas con pronunciada direccionalidad en la dirección del grano, son también más susceptibles de romperse durante el embutido que aquellas con orientación uniforme.

#### I.2.4 Velocidad de Embutición

Entre otros factores importantes dentro del proceso consideremos la velocidad de embutido, es decir la velocidad a la que el punzón debe presionar la chapa contra la matriz. Ésta resulta de mayor importancia cuando se trabaja con acero inoxidable y aleaciones resistentes al calor que en el caso de metales dúctiles. A manera de ejemplo, en la tabla 3 se muestran algunas velocidades nominales para varios metales.

Tabla 3. Velocidad del punzón recomendada para el embutido de varios metales.

METAL	VELOCIDAD (m/min)	
	PRESA DE SIMPLE ACCION	PRESA DE DOBLE ACCION
Aluminio	53	30
Aluminio de alta resistencia	--	9 a 12
Latón	61	30
Cobre	45	26
Acero al bajo carbono	16	10 a 15
Acero inoxidable	--	6 a 9
Zinc	45	12

Fuente: *ibidem.*, p. 466.

#### I.2.5 Radio de Embutición

Para que el material no sufra esfuerzos excesivos, e incluso ruptura al embutirlo contra la matriz, ésta debe de estar provista de un radio adecuado que permita que el material fluya libremente dentro de la misma<sup>(17)</sup>.

Si la matriz no tiene radio de embutición, es decir  $r = 0$ , la lámina se cortará al ser presionada contra la misma (ver figura 21A).

En el caso contrario, si el radio de embutición se hace demasiado pronunciado, es decir  $r = (D-d)/2$ , la chapa no será retenida por el pisador, formándose pliegues en la pieza (ver figura 21B).

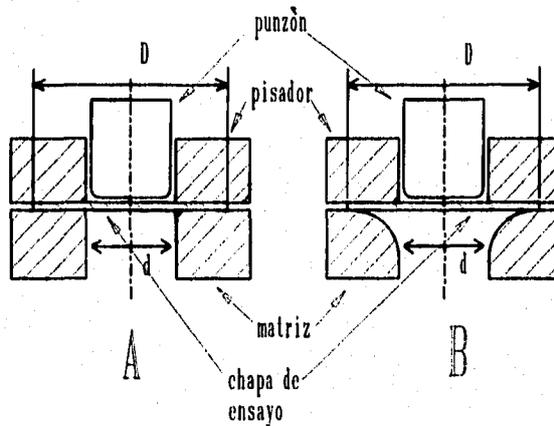


Figura 21. Matriz sin radio de embutición  $r=0$  (A), y matriz con excesivo radio  $r = (D-d)/2$  (B).

Algunos autores manejan tablas para la determinación del radio de embutición de acuerdo al material que se usa. Por Otro lado Kaczmarek<sup>(17)</sup> nos propone las siguientes fórmulas en caso de tener que calcularlo:

$$r = 0.8 \sqrt{(D-d)e} \quad (\text{acero}) \dots \dots \dots (26)$$

$$r = 0.9 \sqrt{(D-d)e} \quad (\text{aluminio}) \dots \dots \dots (27)$$

donde:

- D. Diámetro del disco (mm)
- d. Diámetro de la pieza embutida (mm)
- e. Espesor de la chapa (mm)

### 1.2.6 Juego entre Punzón y Matriz

Por todo lo mencionado anteriormente, resulta lógico pensar en una holgura entre estos componentes, y que entre mayor sea ésta se disminuye el esfuerzo del punzón y los provocados en la chapa, esto es verdad, pero se producen los siguientes inconvenientes:

1. El aumento en el juego produce la deformación de la pared de la chapa.
2. Se puede desviar el punzón, provocandose la formación de ondulaciones en el borde de la pieza embutida.
3. Pueden producirse pliegues en la pieza embutida.

Se propone se deje un juego igual al espesor de la chapa más un 20% del mismo espesor. B. Wassilieff<sup>(17)</sup> nos propone las siguientes expresiones para este cálculo.

$$W = e + 0.07\sqrt{10e} \quad (\text{acero}) \dots\dots\dots(28)$$

$$W = e + 0.02\sqrt{10e} \quad (\text{aluminio}) \dots\dots\dots(29)$$

$$W = e + 0.04\sqrt{10e} \quad (\text{metales no férricos}) \dots\dots(30)$$

donde:

- W. Juego entre punzón y matriz
- e. Espesor de la chapa

A grandes rasgos hemos mencionado los factores más importantes que deben considerarse para la producción de piezas por medio del embutido. Pero no debemos olvidar algunos otros factores como son: adecuada lubricación, recocido del material (sobre todo cuando se somete el material a varios procesos de embutido), etc.

### **I.2.7 Ensayos de Plasticidad por Embutición**

Éstos se clasifican dentro del grupo de ensayos especiales, cabe señalar que casi todos estos son de tipo simulado, y los podemos clasificar en cuatro grupos<sup>(11)</sup>:

- Ensayos de colabilidad.
- Ensayos de soldabilidad.
- Ensayos simulados de servicio.
- Ensayos de plasticidad.

De los anteriores grupos, el de interés para el presente trabajo es el que se refiere a los ensayos de plasticidad, pero antes se dará una breve introducción de cada uno de los grupos.

#### **Ensayos de colabilidad.**

Este es el grupo más pequeño de los cuatro, el empleo de ellos tiene por objeto el de dar ciertos indicadores de la dificultad relativa de colar diferentes materiales. En su mayor parte tratan de explicar el agrietamiento, en los cuales se mide la tendencia de un material a agrietarse, cuando se cuele en ciertas condiciones de constricción.

#### **Ensayos de soldabilidad.**

Se emplean para determinar la pericia de un soldador o si un material es adecuado para unirse por un método en particular de soldadura. El primer punto no resulta de nuestro interés, pero el segundo resulta interesante y puede dividirse en:

- Ensayos de agrietamiento.
- Ensayos de resistencia mecánica.

### Ensayos simulados de servicio.

Se han ideado para su aplicación a probetas con objeto de simular las condiciones de carga a las que están de acuerdo a las condiciones principales de servicio para las que se requiere el material.

### Ensayos de plasticidad.

Tienen por objeto determinar si un material es adecuado para uno u otro de los procesos de trabajo mecánico. Se incluye para trabajos en caliente y en frío, los cuales se subdivide en dos secciones:

- 1) Ensayos de formación de copa por estirado y embutición profunda.
- 2) Ensayos de forjabilidad.

De los anteriores grupos el de interés es el que se refiere al ensayo de formación de copa por estirado. Generalmente se realizan en frío para poder determinar:

- a) Su conformación por estirado.
- b) Su comportamiento bajo tensión bi-axial.
- c) Su capacidad para embutido profundo.

En el primer grupo están los ensayos Erichsen, Olsen y Jovignot; en el segundo grupo los de explosión Pellini, aunque el ensayo Jovignot también puede incluirse aquí; y en el tercero los de Embutición en Copa. Cabe mencionar que los ensayos del primer grupo no deben confundirse con los de Embutición Profunda, aunque a veces se describen como tales. Ahora daremos una breve introducción de todos ellos iniciando con el ensayo Erichsen.

### Ensayo "Erichsen" de Embutición en Copa.

Se realiza en una probeta de chapa delgada de no menos de 90 mm de longitud o diámetro (la norma ASTM E 643-84 nos marca estas dimensiones como mínimas pero hace la aclaración que se pueden utilizar chapas de 65 mm para dispositivos que no puedan alojar las de 90 mm) y un espesor que va de un rango de 0.02 a 2.00 mm, se coloca concéntricamente en una matriz de 27.00 mm de diámetro interior y un pisador que permite una holgura de 0.05 mm en el espesor de la chapa. Un penetrador de 10 mm de radio en la punta, el cual presiona contra la superficie de la chapa de ensayo haciéndola penetrar en la matriz, (ver figura 22) hasta que empieza la rotura de la chapa.

De esta manera el indicador de la ductilidad del material es justamente la profundidad de la copa, y el aspecto de la superficie exterior nos muestra si el acabado superficial es bueno o malo (por ejemplo, si la superficie nos muestra un efecto de "piel de naranja" nos indica que el tamaño de grano de la probeta es muy grande) es importante observar el agrietamiento del material si nos muestra direccionalidad o no, ya que si muestra direccionalidad y la grieta se presenta centralmente a través de la cúpula el material es frágil. Una estricción en la proximidad de la grieta también da una orientación sobre la ductilidad.

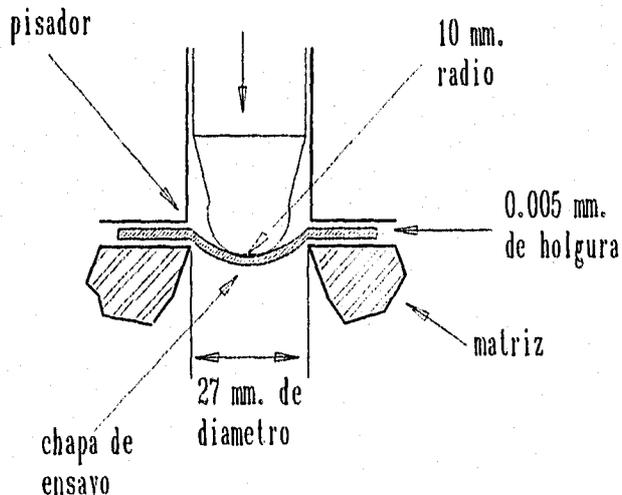


Figura 22. Ensayo de Embutición "Erichsen".

La profundidad de penetración es uno de los parámetros más importantes que se puede medir, así como la carga que soporta el material. La interpretación es cualitativa, puesto que el modo de deformación es complejo siendo principalmente conformación por estirado bi-axial con una componente pequeña de embutición debida al flujo hacia adentro a partir de los bordes del troquel.

#### Ensayo de Embutición "Olsen".

Es semejante en principio al ensayo Erichsen, con las variantes en las dimensiones del penetrador y de las matrices que utiliza dependiendo el espesor de la chapa de ensayo.

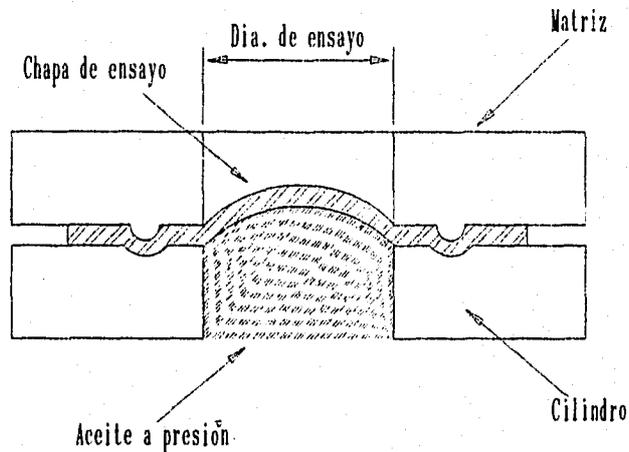
Utiliza un penetrador de bola de  $7/8$  de pulgada de diámetro con una matriz que varía dependiendo el espesor de la chapa a ensayar, ésta tiene un diámetro de 1 pulgada para chapas de  $1/16$  de pulgada de espesor, y aumenta sistemáticamente hasta  $1\frac{1}{4}$  pulgadas de diámetro para espesores de chapa de  $3/16$  hasta  $1/2$  de pulgada. El resultado se da por la profundidad de impresión leídas en milésimas de pulgada justamente antes de la ruptura. El valor depende del espesor de la chapa en una forma semejante al ensayo Erichsen, siendo relativamente más bajo en chapas delgadas que en gruesas.

Tanto el ensayo Erichsen como el Olsen emplean frecuentemente máquinas accionadas hidráulicamente y el comienzo de la rotura se indica por una ligera caída en la presión de aceite, que es requerida para que avance el penetrador.

#### Ensayo de Embutición Hidráulica "Jovignot".

La validez de los ensayos Erichsen y Olsen ha sido puesta en duda con frecuencia, debido a la holgura entre el pisador y cara de la matriz del dispositivo; y entre la cúpula del penetrador y el orificio de la matriz en las primeras etapas, por lo que Jovignot ideó un tipo modificado de ensayo en condiciones de conformación por estirado bi-axial real<sup>(11)</sup>.

En este caso, un disco o chapa de diámetro suficientemente grande para cubrir el agujero y con tolerancia suficiente para sujetarlo, se apresia firme y concéntricamente sobre el extremo de un cilindro hidráulico de diámetro interior igual al diámetro de la matriz; se le somete por una cara a presión hidráulica creciente (ver figura 23); la presión se aumenta hasta que el material se agrieta.



**Figura 23. Ensayo Hidráulico de Embutición "Jovignot".**

En dicho ensayo se deducen sus resultados a partir de los siguientes valores:

1. Valor de la presión de estallido (reventón de la chapa ensayada).
2. Valor de la profundidad por la penetración producida.
3. Aspecto de la chapa en su superficie y la forma de fractura después de reventar.

Como se puede observar estos tres valores, al igual que en el ensayo Erichsen, nos ayudan a deducir el comportamiento probable del material en el embutido por estirado. Con este ensayo es posible obtener resultados razonablemente cuantitativos, pero la correlación con el uso práctico no es mejor que con Erichsen, por lo que no es ampliamente usado.

El diámetro de la matriz se determina por el espesor de la chapa en uso, obteniéndose un coeficiente de embutición de la relación  $h2/r2$ <sup>(11)</sup>;

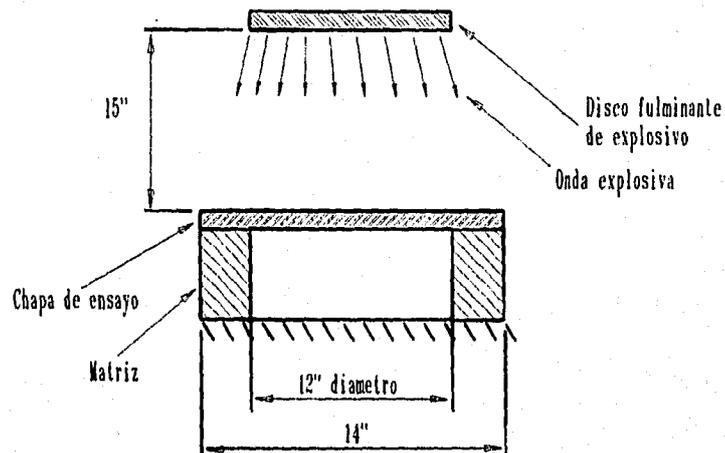
donde:

- h. Profundidad interna de la copa.
- r. Radio del área de embutido.

Ensayo de Acopado o Abollamiento "Pellini".

La carga por tensión bi-axial es difícil simular a velocidades elevadas de deformación, por lo que W. S. Pellini ideó un ensayo por explosión para superar algunas dificultades<sup>(11)</sup>.

Se lleva a cabo en una chapa de 14 pulgadas de longitud, que se coloca en una matriz de cantos superiores redondeados con la misma dimensión y un diámetro interior de 12 pulgadas. Se produce la explosión de un disco fulminante colocado concéntrica y paralelamente a la chapa y a una distancia de 15 pulgadas asegurando así que la presión ejercida por la explosión de la chapa sea uniforme en su superficie. Por último los valores para determinar la ductilidad del material, son los mismos con que se evaluaron los anteriores ensayos. En la figura 24 se esquematiza este ensayo.



**Figura 24. Ensayo por Explosivos "Pellini".**

Este ensayo encuentra en la actualidad su principal aplicación para investigar la propagación de la rotura frágil en condiciones de tensión bi-axial a temperaturas diferentes. Para dicho caso se deposita un cordón de soldadura en el centro de la cara inferior de la chapa y se mecaniza una entalla en el reforzamiento soldado para que actúe como iniciador de la grieta. El estudio de la deformación, el tipo de fractura y el camino de la rotura, determinan la incidencia y extensión de la rotura frágil.

#### Ensayo de Embutición en Copa.

Los ensayos de Embutición en Copa se utilizan para determinar la capacidad de embutibilidad de un material. Todos estos ensayos intentan embutir la forma de una copa completa a partir de un disco plano (ver figura 25).

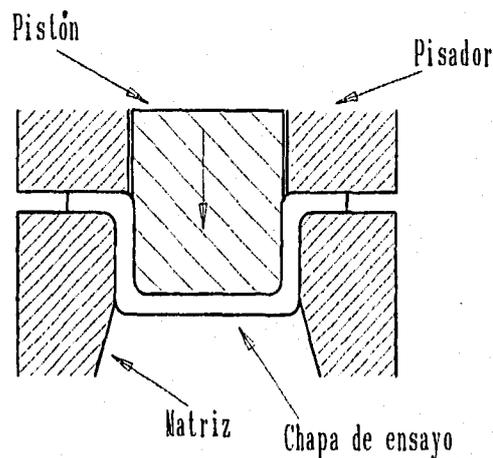


Figura 25. Ensayo de Embutición Profunda en Copa.

El portapiezas está dispuesto para ejercer una presión suficiente y evitar el arrugamiento. El factor que se ha de determinar es el diámetro de hueco crítico, que es el mayor diámetro de hueco que se embutirá en una copa completa sin rotura. Esto significa hacer una serie de ensayos con diferentes diámetros de hueco. Dependiendo el espesor de la chapa se calcula la holgura entre el pistón y la matriz. Los tamaños de las copas están entre 1 y 2 pulgadas de diámetro, de acuerdo con el espesor que se desee. Si el tamaño es demasiado pequeño los resultados no son muy representativos, y si el tamaño es demasiado grande los ensayos son caros en material y equipo.

Por otro lado, el ajuste entre el planchador y matriz debe ser cuidadoso para evitar el arrugamiento de la chapa debido a un ajuste holgado evitando que se produzcan desgarramientos por aplicación de una presión excesiva debido a un ajuste grande entre ambos.

Si existen tendencias direccionales, éstas se mostrarán como orejas en el borde superior de la copa, también se puede producir desgarramiento durante la embutición. (ver figura 7)

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ADITAMENTO PARA PROBAR LA EMBUTIBILIDAD**

#### **II.1 Análisis de Alternativas de Diseño**

Como en cualquier proyecto de ingeniería el factor más importante para tomar la decisión de llevar a cabo el diseño y construcción de una máquina, herramienta, dispositivo, etc. Es la necesidad que existe de contar con ello para un fin determinado.

En el caso del presente trabajo de tesis, se vio la necesidad de contar con un dispositivo que nos auxiliara en el estudio de las propiedades de los materiales (láminas de acero inoxidable) al ser embutidos, tratados térmicamente a diferentes temperaturas y con distintas atmósferas de calentamiento, de modo tal, que se determine en que condiciones tiene una mayor embutibilidad. Posterior al ensayo nos debe permitir apreciar la forma de la grieta y el aspecto de su superficie, para determinar las causas de dichas fallas en el material.

En el capítulo anterior se describieron varios ensayos para probar la embutibilidad, así como a grandes rasgos se esquematizaron sus partes principales. La siguiente tarea consistirá en elegir de entre ellos el más idóneo para nuestros fines, para lo cual se debe tener en cuenta se pueda llevar a cabo su construcción con los medios y herramientas que se cuenta en los laboratorios de nuestro plantel.

De nuestras alternativas de diseño, se tiene que elegir aquella que nos permita facilidad de manejo y operación del dispositivo, además, poder cuantificar nuestros resultados y observar los efectos del ensayo en las probetas para poder llevar a cabo las conclusiones correspondientes de cada espécimen ensayado. Por estas razones compararemos de entre los distintos ensayos.

**1. Ensayo Erichsen.** Requiere básicamente de una matriz de 27 mm de diámetro interior, un pisador que aprisione la chapa contra la primera, permitiendo una holgura mínima entre éstos de 0.05 mm y un punzón o penetrador con punta esférica de 20 mm de diámetro.

**2. Ensayo Olsen.** Maneja el mismo principio que el ensayo Erichsen, requiere los mismos componentes esenciales para llevar a cabo la prueba, con algunas variantes, las cuales se encuentran en las dimensiones del punzón que mide 7/8 de pulgada de diámetro y en el anillo troquel que varía en el diámetro interior dependiendo el espesor de la chapa.

**3. Ensayo Jovignot.** En este ensayo encontramos importantes variantes en relación a los dos anteriores. Se requiere un anillo troquel abrazadera (se le denomina de esta manera porque no permite juego alguno entre el anillo y el cilindro que presionan la probeta), un cilindro que presiona de manera hermética la chapa contra el anillo troquel y por medio del cual fluye aceite a presión contra una de las caras del espécimen. Como se aprecia, para fabricar este dispositivo se requieren elementos mecánicos e hidráulicos.

**4. Ensayo Pellini.** Requiere únicamente un troquel o anillo soporte de 14 pulgadas de diámetro exterior y 12 pulgadas de diámetro interior, en el cual se monta la chapa y se le somete a una explosión por medio de un disco explosivo fulminante. Los componentes de éste son de fácil maquinado, el problema estriba en la poca información del ensayo aunado a la dificultad por el uso de explosivos.

**5. Ensayo de embutición en copa.** Se requiere un portapiezas, un troquel y un pistón que presiona la chapa contra el troquel hasta embutirla y formar una copa completa sin rotura. El principio básico del ensayo es sencillo pero no cubre nuestras necesidades de estudio y la finalidad del presente trabajo.

De nuestras cinco alternativas de diseño, descartamos primeramente el ensayo de embutición profunda en copa, debido a que éste realiza la embutición hasta formar una copa sin llegar a la ruptura del material, llevando a cabo el proceso en una o más etapas hasta lograr la copa.

Los restantes reúnen las características deseadas, porque realizan la embutición hasta la falla del material y nos dan parámetros de la profundidad de penetración y carga aplicada, además, se puede observar los efectos del ensayo en la probeta o chapa. Por lo tanto la elección de cualquiera de los dispositivos lo veremos desde el punto de vista del diseño y fabricación.

Analizaremos primeramente el ensayo Pellini y las condiciones mínimas para que pueda operar. Requerimos una estructura robusta y fuerte, debido a que se necesita de una explosión para ejercer una presión en la superficie de la chapa. Como se había mencionado no nos pareció el adecuado por la falta de información.

El ensayo Jovignot requiere de la construcción de una máquina con elementos mecánicos e hidráulicos, por lo que el costo lo hace estar fuera de nuestras posibilidades, además nos arroja resultados razonablemente cuantitativos, pero la correlación con el uso práctico deja mucho que desear al lado de Erichsen u Olsen, porque estos últimos se asemejan más a lo que realmente es un proceso de embutido desde el punto de vista de los útiles para embutir y los parámetros usados en cuanto a carga y profundidad de penetración.

Nos restan los ensayos Erichsen y Olsen, que en principio y aplicación son semejantes. Básicamente requieren de los mismos componentes, pero debido a la tendencia mundial por adoptar el sistema métrico, hemos tomado la decisión de construir el aditamento Erichsen, porque las mediciones en cuanto a carga y profundidad de embutido se llevan a cabo en kilogramos y milímetros respectivamente. Cabe señalar que el dispositivo construido puede ser mixto, si consideramos que haciendo unas pequeñas modificaciones, tanto en la medida del punzón, como en las matrices de ensayo que utiliza Olsen podemos llevar a cabo dichos ensayos con el mismo dispositivo.

El ensayo Erichsen permite embutir láminas con rangos de espesor desde 0.1 mm hasta 2.0 mm de espesor, por ello no requerimos más que de un solo penetrador y un anillo troquel.

El ensayo Olsen se utiliza para espesores de lámina hasta 1/16 de pulgada, una matriz de 1.0 pulgada de diámetro y aumenta sistemáticamente hasta 1 1/2 pulgadas de diámetro para espesores de lámina desde 3/16 a 1/4 de pulgadas.

### II.1.1 Visitas realizadas

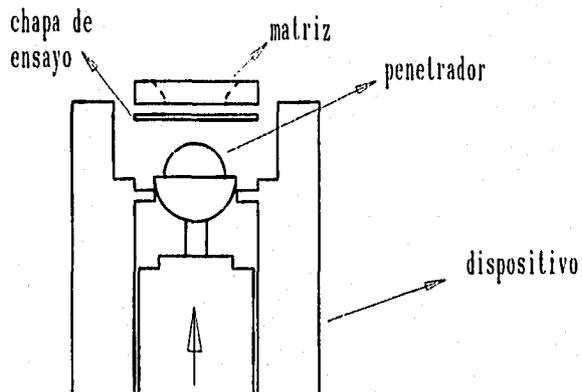
Una vez descritos los distintos ensayos, y considerando el Erichsen el más idóneo para nuestros propósitos sin descartar el ensayo Olsen, consideramos pertinente ver físicamente algunos dispositivos de este tipo, para visualizar las formas y dimensiones adecuadas de dichos dispositivos, así como para ver su funcionamiento y operación.

En una visita realizada al laboratorio de máquinas-herramientas del Conalep "Francisco I. Madero", tuvimos oportunidad de ver una máquina para ensayos de embutición, que a nuestro parecer podía ser capaz de realizar pruebas bajo norma Olsen o Erichsen, ya que ésta tenía la alternativa de intercambiar la matriz, así como también su penetrador esférico de acuerdo al arreglo necesario de penetrador-matriz, para la norma respectiva.

La máquina contaba con una prensa hidráulica e indicador de fuerza aplicada al punzón, así como un indicador que medía la distancia recorrida por el mismo, en pocas palabras, la máquina estaba provista de todos los aditamentos para llevar a cabo ensayos de embutición. Pero desafortunadamente no se encontraba en condiciones como para efectuar una prueba, por lo cual sólo se pudo observar a grandes rasgos su mecanismo de accionamiento, así como su forma de prensar la chapa entre la matriz y el prensachapas.

Otro punto interesante es que, ésta contaba con dos matrices de diferentes diámetros, con el fin de ensayar diferentes espesores de lámina.

Por otro lado, el componente que hacía las veces de punzón constaba de dos partes; uno que recibía la fuerza del sistema hidráulico el cual a su vez tenía en su extremo superior una media copa y en el otro un balín que propiamente empujaba la superficie de la chapa, el cual se colocaba en la media copa y de esta manera se podía intercambiar el balín cuando sufría algún desperfecto. A continuación se muestra un esquema de dicho dispositivo.



**Figura 26 Esquema simplificado de la máquina para embutición del Conalep Francisco I. Madero**

En otra visita realizada a la E.S.I.M.E Azcapotzalco encontramos un dispositivo para embutición, en este lugar tuvimos oportunidad de ver y llevar a cabo varios ensayos de embutibilidad en láminas de acero inoxidable. (ver figura 27)

El dispositivo con que cuentan, realiza los ensayos de acuerdo a las normas establecidas por Erichsen, puesto que cuenta con un penetrador y una matriz normalizadas para éste tipo, además que las mediciones de presión y penetración se llevan a cabo en sistema métrico.

Dicho aditamento está constituido por un cuerpo principal que alojan a los demás componentes. El dispositivo se puede montar en cualquier tipo de prensa universal, la profundidad de embutido se puede leer en el cuerpo graduado del punzón. En el siguiente esquema se puede apreciar dicho aditamento.

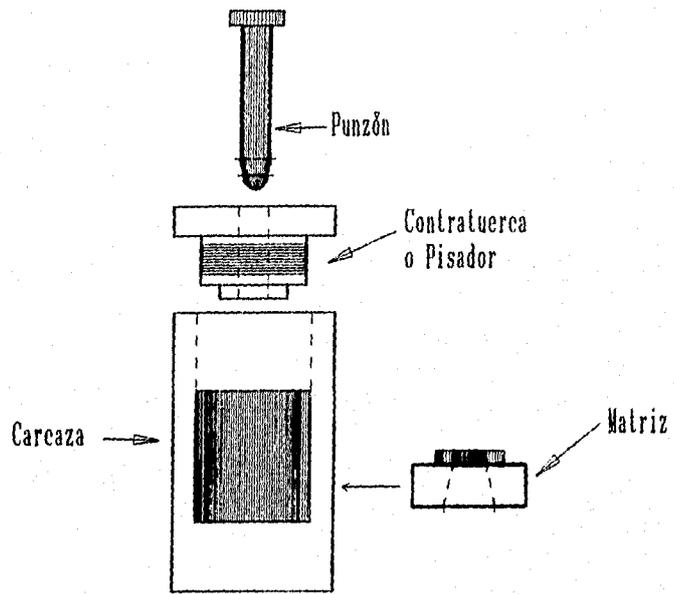


Figura 27. Esquema general del dispositivo para ensayos de embutición de la E.S.I.M.E. Azcapotzalco.

## II.2 Diseño según la mejor Alternativa

De nuestras opciones de diseño la más atractiva, por cuestiones de adaptabilidad y fácil manejo resulta el dispositivo según Erichsen. Por lo que ahora trataremos su diseño.

Ya hemos descrito a grosso modo el funcionamiento y componentes del ensayo Erichsen, en el presente diseño nuestra tarea será la de fabricar un dispositivo que reúna los requisitos que marca la norma.

De acuerdo con la norma **ASTM E643-84**<sup>(18)</sup> y con título "Standard Test Method For Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material", nos marca para el ensayo Erichsen los siguientes parámetros.

- El modo de deformación del material es por tensión biaxial predominantemente.
- El espesor de los especímenes se recomienda entre 0.20 y 2.00 mm (0.008 y 0.080 pulgadas), la forma de los mismos puede ser circular o rectangular, el ancho mínimo o diámetro según sea el caso debe ser de 90 mm. Pero para dispositivos incapaces de alojar especímenes con estas dimensiones se puede utilizar de 65.0 mm (ancho o diámetro).
- La prensa que aplica la presión a la lámina por medio del punzón debe poseer una capacidad mínima de 2,200 libras (9,800 N) y se recomienda que cuente con un indicador de presión.
- El punzón de cabeza esférica deberá tener un diámetro de 20.0 mm con una tolerancia de 0.05 mm, y sólo dicha parte del punzón deberá estar en contacto con el espécimen.
- La porción esférica del penetrador debe tener una dureza cerca a HRC 62 (por sus siglas en inglés Hard Rockwell C) y será lo más uniforme posible.

La norma recomienda utilizar algún tipo de lubricante, e indica que la altura de la copa es fuertemente afectada por la selección o empleo de un lubricante. Estudios han demostrado que la variación de lubricación influye fuertemente en la distribución del esfuerzo.

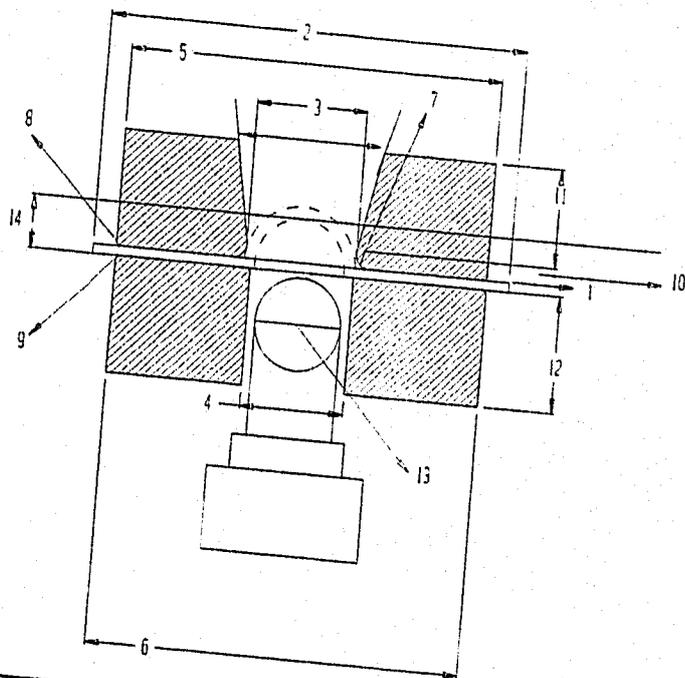
La altura de la copa obtenida bajo buenas condiciones de lubricación, son significativamente más grandes que las obtenidas bajo pobres condiciones de ella. El tipo de lubricante debe ser seleccionado de acuerdo al tipo de material ensayado.

La velocidad de embutido (velocidad a la que el punzón presiona la lámina contra la matriz) se recomienda sea de entre 0.08 y 0.40 mm/seg. El final de la prueba está determinado por un decrecimiento en la presión de la prensa, debido a la ruptura de la chapa que se vera reflejado en el indicador de carátula de la máquina (si ésta cuenta con él, si no la prueba se considera finalizada a la ruptura del espécimen).

Una vez finalizada la prueba, la altura de la copa estará determinada por el desplazamiento del punzón en milésimas de pulgada (para el caso de Olsen) o en centésimas de milímetro (para el caso de Erichsen), por lo que el indicador de penetración deberá estar en cero cuando el punzón se encuentre en contacto con el espécimen.

En el siguiente esquema se ilustran las partes más importantes de dicho dispositivo con sus tolerancias de acuerdo a la norma.

El problema es ahora diseñar un conjunto que aloje dichos componentes. Por ello de las alternativas de diseño y de los dispositivos que observamos, nos pareció más atractivo construir el dispositivo Erichsen de la E.S.I.M.E Azcapotzalco, haciendo algunas modificaciones que podrían mejorar el dispositivo para realizar, inclusive, ensayos Olsen con las modificaciones correspondientes que ya se mencionaron.



Concepto	Dimensiones (mm.)
1 Espesor de la probeta	máximo espesor
2 Ancho de la probeta	90
3 Diámetro interior de la matriz	27
4 Diámetro interior guía del punzón	25.4 ± 0.1
5 Diámetro exterior de la matriz (aproximado)	90
6 Diámetro exterior guía del punzón (aproximado)	90
7 Radio de la esquina interior de la matriz	0.81 ± 0.05
8 Radio de la esquina exterior de la matriz	0.8
9 Radio de la esquina exterior guía del punzón	0.8
10 grueso del barreno de la matriz	5 ± 0.2
11 Espesor de la matriz (mínimo)	20
12 Espesor de la guía del punzón	20
13 Diámetro de la punta esférica del punzón	20
14 Altura de copa	altura de copa

Figura 28. Esquema y tabla con dimensiones de una máquina para embutido. Fuente: Norma ASTM E643-84.

### II.3 Construcción

Se denotó ya la necesidad de construir un aditamento para ensayos de embutición, por lo que corresponde ahora seleccionar los materiales para la construcción, así como también se proporcionarán los planos del dispositivo en los cuales se muestran las modificaciones que se creyeron pertinentes.

#### II.3.1 Tipos de aceros

Por principio debemos de analizar los diferentes tipos de aceros que existen comercialmente, ya que el seleccionar un material para nuestra pieza es de primordial importancia, aunque se trate de la construcción de un dispositivo de ensayos debemos considerarlo ampliamente puesto que de su buen funcionamiento dependen los resultados obtenidos de los diversos especímenes a prueba y, por otro lado, sino se eligiera el material adecuado, a futuro tendríamos un dispositivo ineficaz.

Conforme a la clasificación que proporciona Noriega<sup>(19)</sup>, podemos deducir una división de los aceros de acuerdo a su composición química, en la cual se subdividen en aceros al carbón, aleados e inoxidables; y la otra es de acuerdo a su aplicación, en la cual se pueden dividir en: estructurales, para la industria automotriz, para la industria de la construcción, grado maquinaria y herramientas.

De acuerdo a la clasificación según su composición química los aceros al carbón son aquellos en los cuales no se especifica contenido mínimo de aluminio, boro, cromo, cobalto, molibdeno, níquel, titanio, vanadio, zirconio y otros, salvo los contenidos máximos de:

Manganeso	1.65%
Silicio	0.60%
Cobre	0.40%

La nomenclatura normalizada de éstos consta de cuatro dígitos; los dos primeros indican el o los elementos principales de la aleación y los dos últimos dan el contenido aproximado de carbono expresado en centésimos por ciento, también llamados puntos de carbono.

Este grupo se puede subdividir en aceros al carbono propiamente (NOM 1006 hasta 1095), y aceros al carbono de fácil mecanizado, también llamados de corte libre (NOM 1108, 1110, 1116, 1132, etc.).

Los aceros aleados son los que contienen proporciones de manganeso, silicio, cromo, níquel, molibdeno y otros mayores que las especificadas como máximas en los aceros al carbono y que además pueden contener otros elementos de aleación tales como el aluminio, boro, cobalto, etc. Su nomenclatura es igual a la de los aceros al carbono, y pueden subdividirse en varios grupos:

- a) al manganeso: NOM (1330, 1335, 1340, 1345)
- b) al molibdeno: NOM (4012, 4023, 4032, 4042, etc.)
- c) al cromo molibdeno: NOM (4118, 4130, 4140, 4145, etc.)
- d) al níquel molibdeno: NOM (4615, 4617, 4620, 4815, etc.)
- e) al cromo: (5015, 5046, 5120, 5145, etc.)
- f) al cromo vanadio: NOM (6118, 6150)
- g) al silicio manganeso: NOM (9255, 9260)
- h) al níquel cromo molibdeno: NOM (4320, 4720, 8115, 8640, 9310)

A medida que se han desarrollado las aleaciones, el sistema de cuatro dígitos ha necesitado el empleo de otros dígitos y/o letras; estos casos excepcionales son los siguientes:

- al cromo: NOM (50100, 51100, 52100)
- al cromo e intensificados al boro: NOM (50B46, 50B50, 50B60, 51B60)
- al níquel cromo molibdeno: NOM E4340
- al níquel cromo molibdeno e intensificados al boro: NOM (81B45, 86B45, 94B15 y 94B17)

Los aceros inoxidable, que es la última de las clasificaciones de aceros de acuerdo a la composición química, poseen una excepcional resistencia al ataque de medios corrosivos, a temperaturas ambientes y elevadas. Se fabrican exclusivamente en horno eléctrico; que permite un control riguroso de la composición química del metal para posteriormente ser forjados o laminados, éstos pueden subagruparse como:

- a) Austeníticos al cromo níquel manganeso no templables, no magnéticos: NOM (201 y 202).
- b) Austeníticos al cromo níquel no templables, no magnéticos: serie NOM 300.
- c) Ferríticos al cromo, templables y magnéticos, que se identifican con el número inicial 4, seguido de dos dígitos.
- d) Martensíticos al cromo, templables y magnéticos: serie NOM 400.

En la clasificación de acuerdo a su aplicación a la que enfocaremos nuestra atención es la de grado herramienta. Observamos que tanto Noriega por su lado y Avner <sup>(20)</sup> por el suyo, coinciden en dividir los aceros grado herramienta con gran semejanza.

La composición química de éstos, en la mayoría de los casos, es totalmente diferente al de grado estructural y maquinaria. Poseen tres cualidades comunes en grado muy superior a los antes mencionados:

- gran resistencia al desgaste
- gran dureza, aún a temperaturas elevadas
- gran resistencia al impacto

Existen varios métodos para clasificar los aceros para herramientas. Uno es según los medios de templado que se utilicen, como templados en agua, aceite y en aire. El contenido de la aleación es otro medio de división, como aceros al carbono para herramientas, de baja aleación y de mediana aleación. Un último método de agrupación está basado según su empleo, como aceros para trabajar en caliente, en frío, resistentes al impacto y de alta velocidad.

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros para herramientas adoptado por la AISI (American Iron and Steel Institute) tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas. Los aceros para herramientas que más se utilizan se han reunido en siete grupos, y a cada grupo o subgrupo se le ha designado una letra del alfabeto, las cuales se pueden ver en la tabla 4.

**TABLA 4. Representación simbólica de los aceros para herramienta.**

GRUPO	SIMBOLO	TIPO
Templado en agua	W	
Resistentes al impacto	S	
Trabajo en frío	O	Templable en aceite
	A	Mediana aleación y templable en aire
	D	Alto carbono, alto cromo
Trabajo en caliente	H	H11-H19, incluso, base cromo; H20-H39, incluso, base tungsteno, H40-H59, incluso, base molibdeno)
	T	Base tungsteno
	M	Base molibdeno
Moldes	P	Aceros para moldes (P1-P19, incluso, bajo carbono; P20-P39, incluso, otros tipos)
Propósitos específicos	L	Baja aleación
	F	Carbono-tungsteno

Fuente: Sydney H. Avner, Introducción a la metalurgia física, p. 304

Los aceros para herramientas tienen características especiales que hacen de cada uno el óptimo según la aplicación para la cual lo queramos. En forma general enunciaremos las aplicaciones idónea de cada uno de los grupos.

Los aceros para herramientas templables en agua (grupo W), son esencialmente para herramientas al carbono, aunque algunos de ellos con un mayor contenido de carbono poseen pequeñas cantidades de cromo y vanadio, que le fueron agregadas para poder obtener óptima templabilidad y mejor resistencia al desgaste. Su contenido de carbono varía entre 0.60 y 1.40%, y pueden colocarse dentro de tres subdivisiones dependiendo la cantidad de carbono. La única división a la haremos mención, es la comprendida entre 0.75 a 0.95%; se utilizan para aquellas aplicaciones en las que la tenacidad y la dureza son igualmente importante, como punzones, cortadores, troqueles o dados y navajas para cizalla. Estos

deben templarse en agua para alta dureza y, por tanto, se someten a una deformación considerable, por lo cual no son deseables para nuestros fines y de antemano los podemos considerar fuera de nuestros planes.

Los aceros para herramientas resistentes al impacto (grupo S) están diseñados para aplicaciones en que son de gran importancia la tenacidad y la capacidad para soportar impactos repetidos. Suelen contener poco carbono, que varía entre 0.45 y 0.65%. La mayoría de éstos son templados en aceite, aunque algunos tienen que templarse en agua para alcanzar dureza total. El alto contenido de silicio tiende a acelerar la descarburación y se deben tomar las precauciones adecuadas en el tratamiento térmico. Dichos aceros se clasifican como regulares con respecto a la dureza al rojo (también conocida como dureza en caliente y está relacionada con la resistencia del acero al efecto de suavizamiento producido por el calor), la resistencia al desgaste y la maquinabilidad. Su dureza generalmente se mantiene por debajo de Rockwell C 60, se utilizan principalmente en la manufactura de herramientas de formado, punzones, cinceles, herramientas neumáticas y en hojas para cizalla.

Los aceros para trabajo en frío son considerados como el grupo más importante de los aceros para herramientas, ya que la mayoría de las aplicaciones mencionadas pueden ser realizadas por uno o más de los de ésta clasificación. El grupo O tiene muy buenas propiedades de no deformación y es menos probable que se doble, combe, tuerza, distorcione o tenga fisuras durante el tratamiento térmico, como sucede con los aceros templables en agua. Son relativamente baratos y su alto contenido de carbono produce una adecuada resistencia al desgaste. En el grupo A, que es otro grupo de los aceros para trabajos en frío, existe el acero A2, el cual tiene excelentes propiedades de no deformación, buena resistencia al desgaste, regular tenacidad, dureza al rojo y resistencia a la descarburación, pero posee de regular a deficiente maquinabilidad. Éstos se utilizan para punzonado, formado, corte y dados para tallar cuerdas. Y por último, el grupo D tiene una combinación de alto carbono y cromo lo que le da excelente resistencia al desgaste y propiedades de no deformación, además, tiene buena resistencia a la abrasión y el mínimo de cambio dimensional en el templado, lo cual hace que se empleen en dados de punzonar y en perforaciones; en dados para estirar alambres, barras y tubos; en dados para roscas y en calibradores maestros.

Los aceros para herramienta de trabajo en caliente (grupo **H**) se aplican en aquellas circunstancias donde la herramienta está expuesta a un calor excesivo, por ejemplo la forja en caliente y la extrusión, piezas fundidas en dados y moldeo en plástico, por lo tanto, éstas tienen buena dureza al rojo.

Los aceros para herramientas de alta velocidad tienen su aplicación en herramientas de corte, pero también para hacer troqueles de extrusión, herramientas para pulir, en punzones y dados. Su composición se han diseñado para proporcionar dureza al rojo y razonable resistencia al impacto. Tienen buenas propiedades de no deformación y pueden templarse en aceite, aire o sales fundidas. Se clasifican como de endurecimiento profundo, tienen buena resistencia al desgaste, regular maquinabilidad, además de regular a poca resistencia a la descaburación. Se subdividen en dos grupos: de base molibdeno (grupo **M**) y de base tungsteno (grupo **T**).

Los aceros para moldes (grupo **P**) y los aceros para herramientas con fines especiales no son de gran importancia para nuestros fines, por lo que desde este momento quedan descartados para la selección del material óptimo, según nuestras necesidades, por lo que no ahondaremos en ellos.

### **II.3.2 Selección del acero**

Una vez mencionadas las características generales de los aceros para herramientas debemos empezar por descartar aquellos que de manera alguna no correspondan a nuestros requerimientos y posibilidades. Por lo tanto ahora estableceremos las propiedades de la pieza que juzgamos como estándar y las cuales respetaremos.

Empezaremos por considerar el equipo con que contamos, ya que primero debemos tomar en cuenta con que contamos para saber nuestros alcances.

- Maquinas-herramienta; en este punto no encontramos dificultad alguna, ya que por las dimensiones de las piezas tenemos la firme convicción de que cubren satisfactoriamente nuestras necesidades.

- Horno para templar; tenemos la restricción que el material que ocupemos deberá tener una temperatura de templado no superior de 1,000 °C, ya que nuestro horno tiene una capacidad de 1,200 °C pero debemos tener en cuenta que no es recomendable hacerlo trabajar a su máxima capacidad y por lo cual hemos considerado esa temperatura como límite.

### II.3.3 Selección del acero para el Punzón y Matriz

Como hemos hablado de un horno para templar debemos entender que ciertas piezas tendrán un templado posterior al maquinado, el cual deberá tener una profundidad de templado al menos de unos 5 mm, es decir una templabilidad de mediana a profunda. Pero el templado, en algunos aceros, le provoca una ligera deformación lo cual hará que funcione indebidamente; y como en nuestro caso se trata de un punzón y una matriz requerimos que la deformación sea mínima, estableciendo al material en dicha propiedad en un rango de muy buena.

Debemos considerar ampliamente el endurecimiento de las piezas, ya que se encontrarán en condiciones semejantes de un proceso de embutición real y por lo tanto deben contar con alta dureza, alrededor de 60 Rockwell C la cual creemos capaz para soportar impactos y no sufrir deformación o despostillamientos durante su operación.

Pero, la dureza requerida no siempre es con la que cuenta la pieza al finalizar el tratamiento, es decir, que existe incertidumbre en que ésta sea la obtenida en realidad, aunque en tablas y de acuerdo a fabricantes sea la establecida para el material dependiendo del medio y tiempo de templado. En conclusión debemos tener una amplia seguridad de que nuestro endurecimiento sea el establecido.

Otro inconveniente que implica un tratamiento térmico es la descarburización del material debida a la alta temperatura del proceso. Lo cual nos conduce a buscar un material con buena resistencia a ésta.

En lo referente a la resistencia al rojo, sólo cabe mencionar que a consecuencia de que el dispositivo se empleará para pruebas de embutición en frío, éste no es un factor importante a considerar.

Por último, consideremos la tenacidad, término que significa; resistencia a la ruptura en lugar de la capacidad para absorber energía durante la deformación (el término se aplica a los aceros para herramientas). Tomando este punto de vista y considerando que nuestro equipo no estará en condiciones tan demandantes de aquel puesto que por la forma en que será aplicada la carga se puede ver lo difícil que resultaría que alguna de las dos piezas principales falle. Es por esto que tan solo pediremos que en esta propiedad, el material tenga de regular a buenas sus características.

#### **II.3.4 Eliminación de Materiales no aptos**

Una vez teniendo contempladas las características que demandamos del material para la construcción de nuestras dos piezas y las mismas que ofrecen los aceros para herramientas, comenzaremos por descartar aquellos que no cumplan con nuestras demandas y para lo cual nos ayudaremos del siguiente cuadro en donde se resumen las propiedades que ofrecen los aceros y de esta manera podremos elegir el conveniente.

Si tomamos la tabla 5 como una herramienta, la cual nos ayude a la selección de nuestro material, debemos empezar por la columna en la cual se observan las temperaturas de templado y eliminaremos aquellas para las cuales su temperatura está por encima de los 1000 °C (1832 °F) que fue la que tomamos como límite.

Siguiendo el orden que muestra la tabla, tomaremos ahora en cuenta la dureza que habíamos establecido como requisito y colocaremos una X en aquellos que no cubran con lo establecido.

Toma el turno de la templabilidad, y de forma similar, eliminaremos aquellos que no cumplan con una templabilidad que se encuentre entre el rango de media a profunda.

Un punto de importancia, el cual fue considerado ampliamente, fue la propiedad de no deformación, por lo que seremos poco flexibles en esta selección, ya que de nada valdría elegir un material que en su fase final de fabricación (la del templado), se deformara de forma tal que no nos sirviera.

En lo referente a la seguridad endurecimiento, habíamos dicho que se iba tomar en cuenta aquellos con una amplia seguridad de endurecimiento, considerando desde muy buenas a óptimas, según la tabla.

Observando la tabla, nos damos cuenta que tan solo quedan tres materiales, que son: O1, A2 y A4, así podríamos decir que cualquiera de ellos sería el indicado para nuestras piezas, pero aun falta tomar en cuenta la resistencia a la descarburización, por lo cual esta será nuestra última eliminación. De la misma forma que se ha eliminado a los otros aceros lo haremos ahora. Quedando tan solo dos aceros que son el O1 y A4, pero si observamos las características del A4, veremos que no califican tan bien como las del O1. Es por esta razón que el material conveniente para fabricar el punzón y la matriz es indudablemente el O1.

#### **II.3.5 Selección del Material para la Guía del Punzón**

Otro elemento de nuestro dispositivo de gran importancia es aquel en el cual el punzón se deslizará hasta hacer contacto con la lámina la cual estará sujeta entre la matriz y un pisador. Con la finalidad de evitar un desgaste excesivo por fricción entre el punzón y la pieza guía, y por ende las consecuencias que esto traería consigo, debemos fabricar un buje en bronce el cual servirá de guía para el punzón.

#### **II.3.6 Selección del Material para Piezas Diversas**

Con respecto al resto de las piezas, no existe una gran restricción, por lo cual hemos decidido fabricarlas en un acero al carbono (ya sea NOM 1045 o 1060), los cuales son considerados como grado maquinaria, por lo cual creemos de buena calidad para nuestros fines.

**TABLA 5. Propiedades comparativas de algunos aceros para herramientas**

TIPO DE ACERO	ENDURECIMIENTO °F.	MEDIO DE TEMPLE	INTERVALO DE REVENIDO	DUREZA ROCKWELL C	TEMPLABILIDAD	PROP DE NO DEFORMACIÓN
W1	1400-1550	Salmuera o agua	300-650	65-50	Superficial	Deficiente
W2	1400-1550	Salmuera o agua	300-650	65-50	Superficial	Deficiente
S1	1650-1800	Aceite	400-1200	58-40	Media	regulares
S5	1600-1700	Aceite	350-800	60-50	Media	regulares
O1	1450-1500	Aceite	300-500	62-57	Media	Muy buena
A2	1700-1800	Aire	350-1000	62-57	Profunda	Óptimas
A4	1500-1600	Aire	350-800	62-54	Profunda	Óptimas
D2	1800-1975	Aire	400-1000	61-54	Profunda	Óptimas
D3	1700-1800	Aceite	400-1000	61-54	Profunda	Muy buena
D4	1775-1850	Aire	400-1000	61-54	Profunda	Óptimas
H11	1825-1875	Aire	1000-1200	54-38	Profunda	Muy buena
H19	2000-2200	Aire o aceite	1000-1300	59-40	Profunda	Buenas
H21	2000-2200	Aire o aceite	1100-1250	54-36	Profunda	Aire:buena Aceite: regulares
H23	2200-2350	Aire o aceite	1200-1500	47-30	Profunda	Aire:buena Aceite: regulares
H26	2150-2300	sal, aceite, aire	1050-1250	58-43	Profunda	Aceite: buenas Sal, aire: buenas
H41	2000-2175	sal, aceite, aire	1050-1200	60-50	Profunda	Aceite: buenas Sal, aire: buenas
T1	2300-2375	sal, aceite, aire	1000-1100	65-60	Profunda	Aceite: regulares a buenas
T4	2300-2375	sal, aceite, aire	1000-1100	66-62	Profunda	Buenas
T6	2325-2400	sal, aceite, aire	1000-1100	65-60	Profunda	Buenas
M1	2150-2225	sal, aceite, aire	1000-1100	65-60	Profunda	Buenas
M2	2175-2250	sal, aceite, aire	1000-1100	65-60	Profunda	Buenas
M6	2150-2200	sal, aceite, aire	1000-1100	66-61	Profunda	Buenas
M41	2175-2220	sal, aceite, aire	1000-1100	70-65	Profunda	Buenas
L2	1450-1550 1550-1700	Agua Aceite	350-1000	63-45	Media	Agua: deficiente Aceite: regulares
L6	1450-1550	Aceite	350-1000	62-45	Media	Buenas
F2	1450-1600	Agua	300-500	66-62	Superficial	Deficiente
P2	1525-1550	Aceite	300-500	64-58	Superficial	Buenas
P20	1500-1600	Aceite	900-1100	37-28	Superficial	Buenas

**TABLA 5. Continuación.**

TIPO DE ACERO	SEGURIDAD EN ENDURECIMIENTO	TENACIDAD	ENDURECIMIENTO AL ROJO	RESISTENCIA AL DESGASTE	MAQUINABILIDAD	RESIST. A LA DESCARBURIZACIÓN
W1	Regular	Buena	Deficiente	Regular a buena	Óptima	Óptima
W2	Regular	Buena	Deficiente	Regular a buena	Óptima	Óptima
S1	Buena	Muy Buena	Regular	Regular	Regular	Regular a buena
S5	Buena	Óptima	Regular	Regular	Regular	Deficiente Buena
O1	Muy buena	Regular	Deficiente	Buena	Buena	Buena
A2	Óptima	Regular	Regular	Muy Buena	Regular	Regular
A4	Óptima	Regular	Regular	Buena	Regular a deficiente	Buena a regular
D2	Óptima	Deficiente	Buena	Óptima	Deficiente	Regular
D3	Buena	Deficiente	Buena	Óptima	Deficiente	Regular
D4	Óptima	Deficiente	Buena	Óptima	Deficiente	Regular
H11	Óptima	Buena	Buena	Regular	Regular	Regular
H19	Buena	Buena	Buena	Regular	Regular	Regular
H21	Buena	Buena	Buena	Regular a buena	Regular	Regular
H23	Buena	Regular	Muy buena	Regular a buena	Regular	Regular
H26	Buena	Regular	Muy buena	Buena	Regular	Regular
H41	Regular	Deficiente	Muy buena	Buena	Regular	Deficiente
T1	Buena	Deficiente	Muy buena	Muy buena	Regular	Buena
T4	Regular	Deficiente	Óptima	Muy buena	Regular	Regular
T6	Regular	Deficiente	Óptima	Muy buena	Regular	Deficiente
M1	Regular	Deficiente	Muy buena	Muy buena	Regular	Deficiente
M2	Regular	Deficiente	Muy buena	Muy buena	Regular	Regular
M6	Regular	Deficiente	Muy buena	Muy buena	Regular	Deficiente
M41	Regular	Deficiente	Muy buena	Muy buena	Regular	Deficiente
L2	Agua: deficiente	Muy buena	Deficiente	Buena	Buena	Buena
L6	Acete: regular a buena	Muy buena	Deficiente	Buena	Regular	Buena
F2	Deficiente	Deficiente	Deficiente	Muy buena	Regular	Buena
P2	Buena	Buena	Deficiente	Regular	Regular	Buena
P20	Buena	Buena	Deficiente	Regular	Buena	Buena

Fuente: *ibidem.*, pp. 390-391.

### II.3.7 Esquemas

Una vez discutido y seleccionado el material para la construcción de cada una de las piezas, ahora toca el turno de presentar los planos correspondientes a ellas.

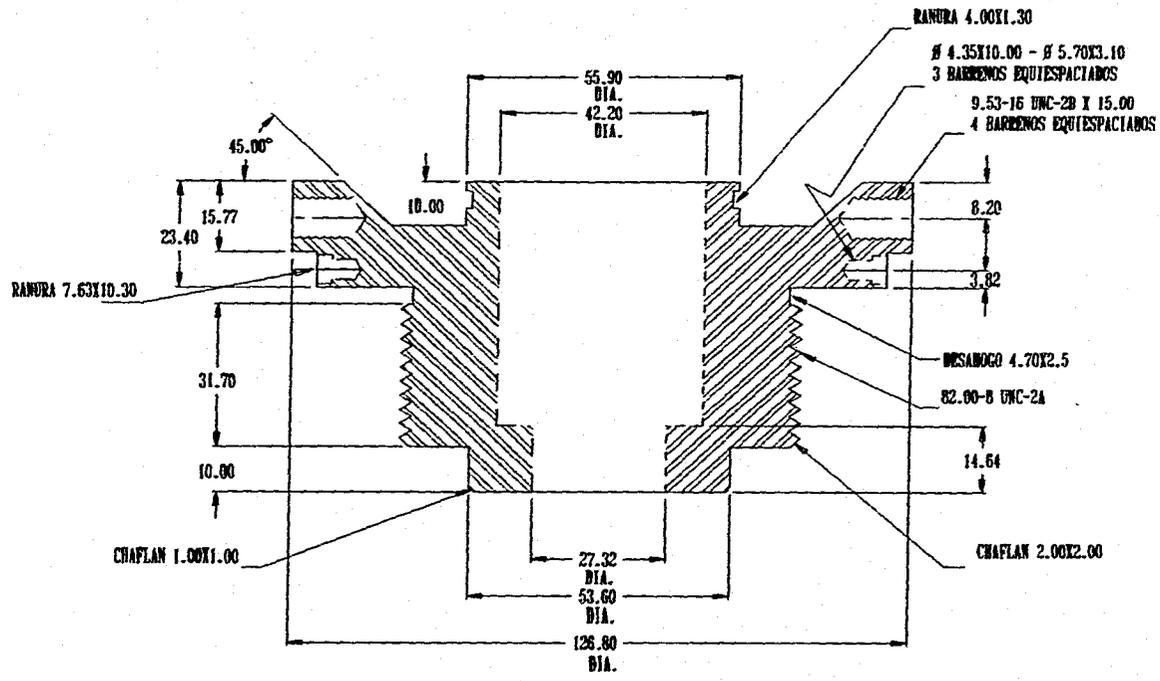
Anteriormente se señaló que este diseño está basado al dispositivo de la E.S.I.M.E. Azcapotzalco y, según nuestro criterio, podremos hacer ciertos cambios que creamos convenientes en una o más de las piezas con el fin de mejorar el dispositivo, siempre y cuando éstos no atente contra la normatividad, funcionamiento y la obtención de resultados.

Tal es la razón por la cual se presentó un esquema general del dispositivo visto en dicha escuela (ver sección II.1.1). En el cual si se observa con cuidado se podrá ver que el cambio de más peso fue el realizado en la matriz, ya que la observada en la E.S.I.M.E., es de forma cuadrada y la que se propone es de forma circular.

Este cambio lo creemos conveniente, puesto que vemos una mejor posibilidad para el buen maquinado de ésta y por otro lado una mejor armonía en cuanto a la tendencia del diseño, es decir que todas las piezas son, generalmente hablando, cilíndricas.

En los esquemas se presenta tan solo los detalles en cuanto a dimensiones y materiales se refiere. Los tratamientos térmicos que en las piezas se realizarán (punzón y matriz) se discutirán posteriormente.

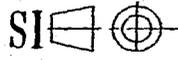
A continuación se presentan en forma lo más detallada posible los esquemas de cada una de las piezas y en ellos se podrá observar los detalles menores de las piezas y también se presenta un esquema en el cual se aprecia al dispositivo en un dibujo de ensamble.



MAT.: ACERO SAE 1045  
 NOTA: LAS ARISTAS NO ESPECIFICADAS  
 REDONDEADAS A R1.0

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DEL. PIA.: TUNCA-PTUNCA    NÚMERO PIEZA: 01    ACERTACION: (mm)    DIBUJO: 1-6

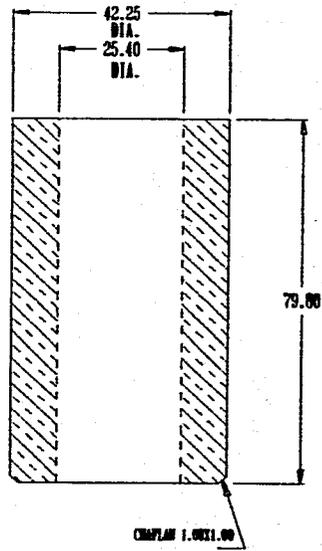


TITULO: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE IMPACTACION

AUTORIZO: M. en C. DANIEL ALVARO AVALOS

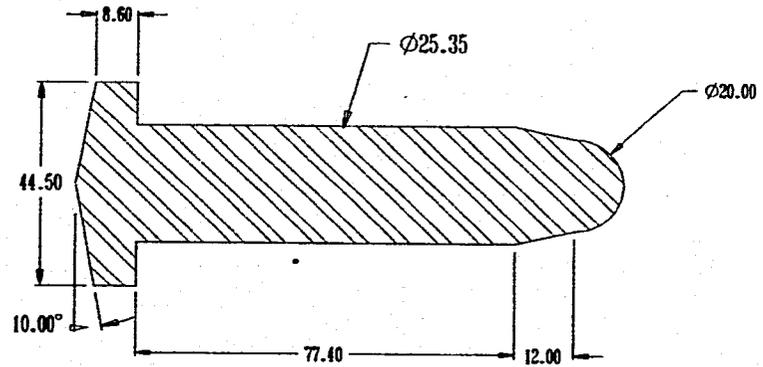
REALIZO: CALLAGA MARTINEZ J. & ESPINEL TABARES J. C.

②



MAT.: BRONCE STANBAR

④



MAT.: ACERO SW55

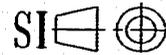
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PZAS.: FORDON, DLUZ

NUM. PZA.: 02, 04

ACOTACION: (mm)

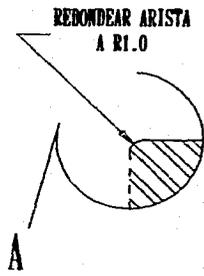
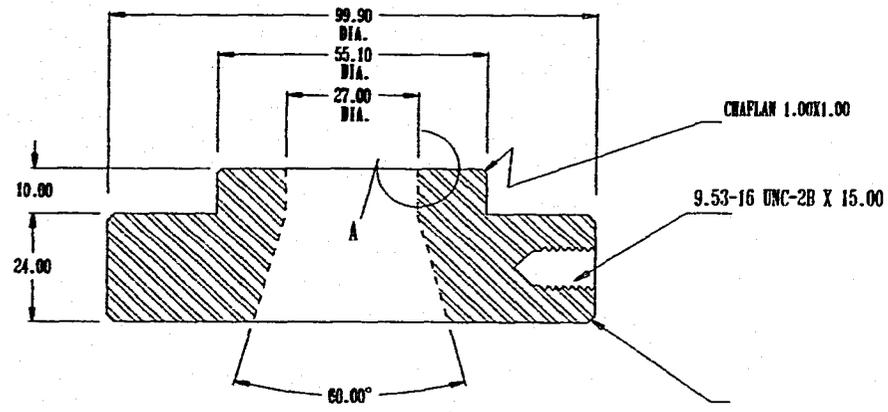
DIBUJO: 2-6



TITULO: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMISION

AUTORIZO: M. en C. RAFAEL ALBARRA AVALOS

REALIZO: CALLACA MARTINEZ J. & ESCRIBEL YANABES J.G.



MAT.: ACERO SAE5

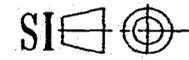
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

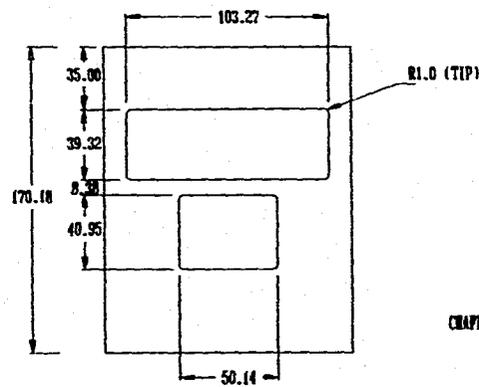
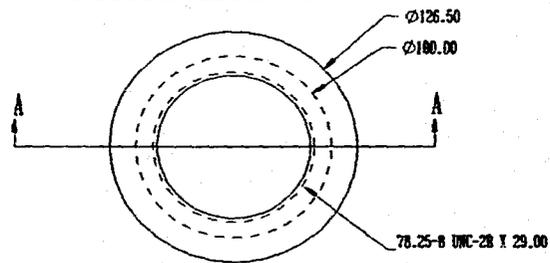
NUM. PZA.: MATRIZ    NUMERO PIZA.: 03    ACOTACION: (mm)    DIBUJO: 3-6

TITULO: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE FROTACION

AUTORIZO: M. en C. DANIEL ALMORA AVALOS

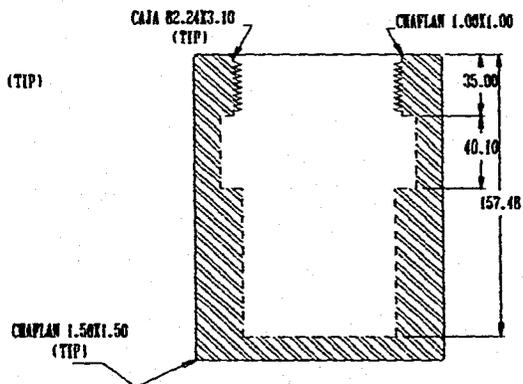
REALIZO: CALLAGA MARTINEZ J. & ESCOBEDO TABARES J.C.





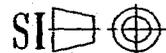
MAY.: ACRHO SAB 1045

SECCION A - A



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

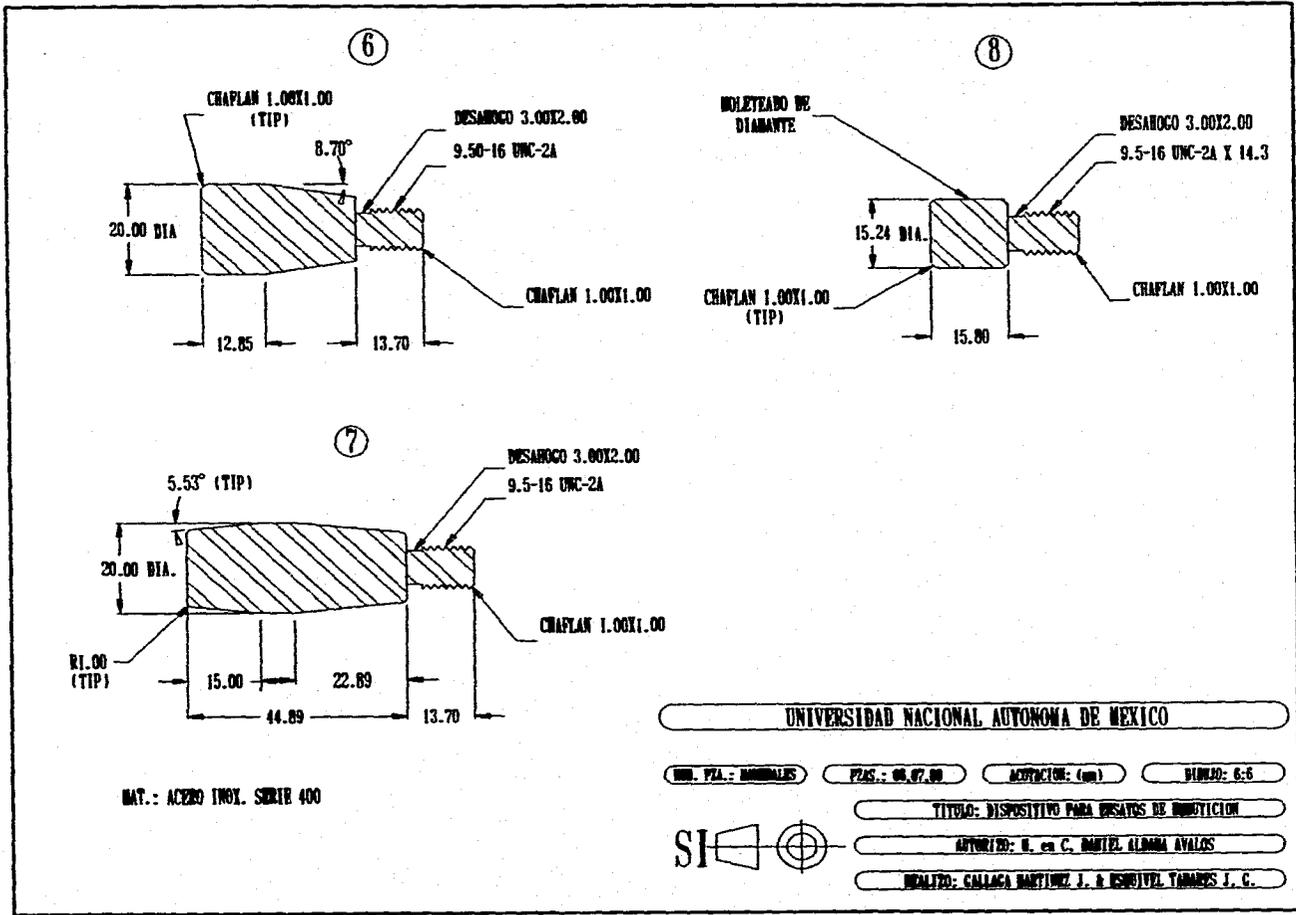
UNIV. PZA.: CARCASA      MUNDO PIZA.: 05      ACOTACION: (mm)      VOLUMEN: 5-6

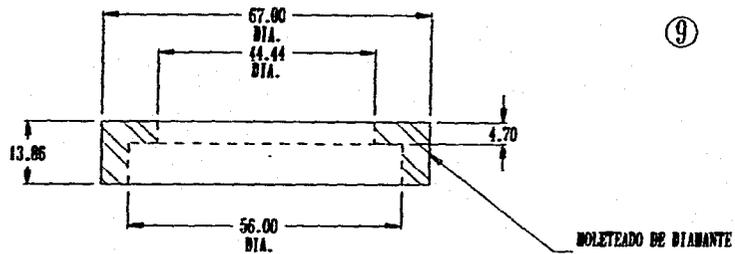


TITULO: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE INDUCTACION

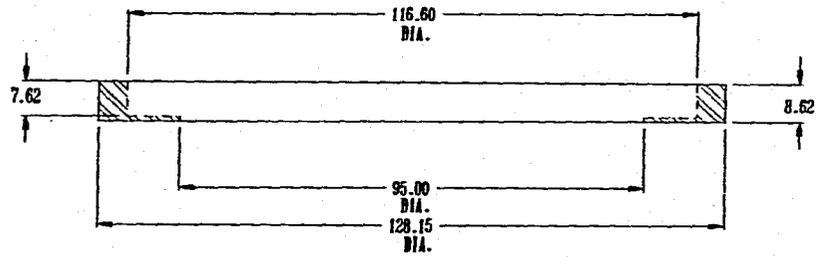
AUTORIZADO: M. en C. DANIEL ALBARRA AVALOS

REALIZADO: GALLAGA MARTINEZ J. & ESQUIVEL TAMARES J. C.





9



10

MAT.: ACERO INOX. SERIE 400

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

NUM. PZA.: INDICADORES

NUM. PZA.: 09. 10

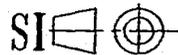
ACOFACION: (mm)

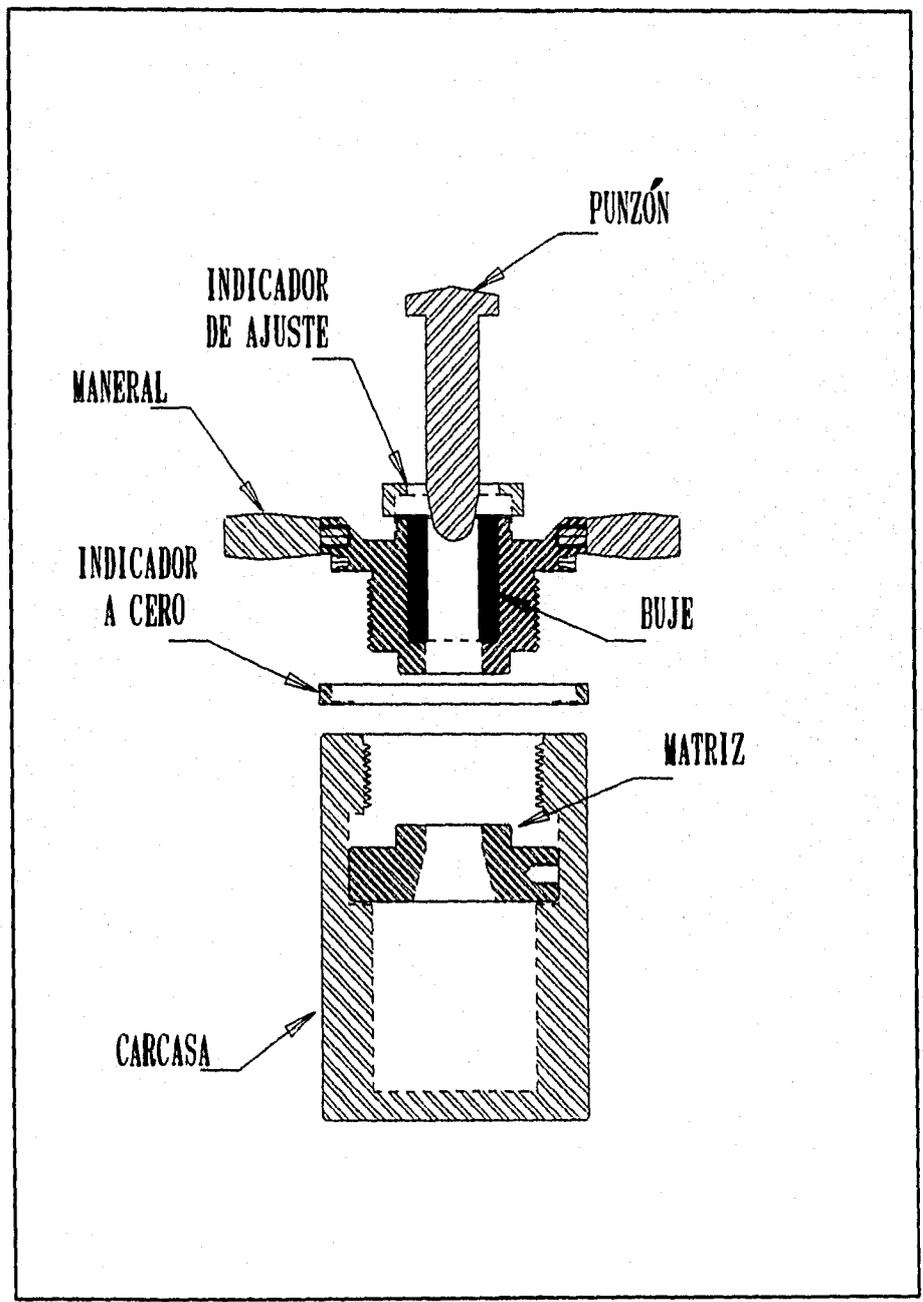
DIBUJO: 4-6

TITULO: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE ERROSION

AUTORIZO: M. en C. MARTEL ALONSO AVALES

REALIZO: GALLAGA MARTINEZ J. & RESUTVEL TABARES J. C.





### II.3.8 Maquinado

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Una vez que se ha detallado la selección del material, propondremos a continuación la forma en que creemos adecuado maquinar las piezas de más importancia para el buen funcionamiento como conjunto que forman todas ellas.

Aunque se da en forma poco detallada los pasos del maquinado, pensamos que es la mejor ruta a seguir para la construcción en su totalidad. En lo referente a la especificación de las variables del maquinado como lo son: profundidad de corte, velocidad de corte, avance de la herramienta, etc., se observará que no se ha echo mención, ya que como es sabido, éstas dependen del equipo en que se trabaja y el tipo de herramental que se disponga y por consecuencia el estado del mismo, por lo tanto lo dejaremos a consideración.

Otro detalle que resaltaré es que, para algunas de las piezas que constituyen el dispositivo, no se mencionarán y esto lo justificamos gracias a la semejanza con otras, por cual para éstas se debe seguir el mismo criterio que para sus semejantes.

Como el maquinado aquí propuestos es muy generalizado podría llegar a perderse un poco los detalles mínimos de la pieza, por lo tanto se sugiere que en forma conjunta se utilicen los planos proporcionados anteriormente para la buena finalización de cada una de ellas.

Explicado lo anterior pasemos ahora a las hojas de ruta del maquinado, en las cuales se tratará de mostrar la forma propuesta para el maquinado de las piezas.

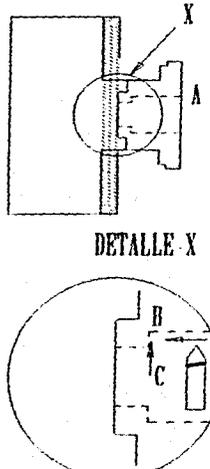
<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: TUERCA-PISADOR	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT. /95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Montar y centrar pieza.	
2	Refrentar hasta dejar una superficie limpia.	
3	Cilindrar. a) Diámetro de 126.80 mm. b) Diámetro de 82.00 mm. c) Diámetro de 53.60 mm. d) Diámetro de 116.50 mm.	
4	Semitronzar en torno utilizando cuchilla, haciendo una ranura del doble del ancho de la misma penetrando hasta 40 mm.	
5	Refrentar la superficie de la pieza a cortar, lo cual ayudará posteriormente a centrar la pieza.	
6	Desmontar pieza y tronzarla totalmente en la segueta mecánica.	
7	Descanso	

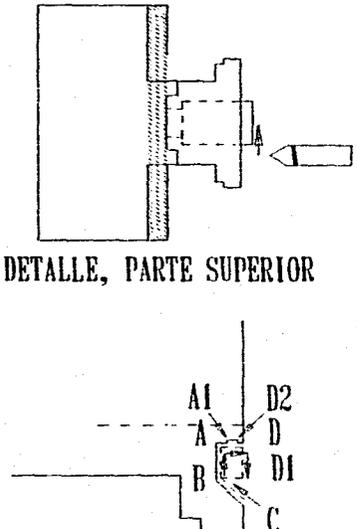
<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: BUJE	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT. /95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Montar y centrar pieza.	
2	Refrentar pieza.	
3	Cilindrar pieza dejandola 0.05 mm arriba de la dimensión del alojamiento.	
4	Maquinar chافلán.	
5	Tronzar en torno con cuchilla (se debe dejar 2 mm por arriba de la longitud requerida).	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: Ensamble del buje	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MAQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
8	Montar y centrar pieza.	
9	Refrentar contra cara.	
10	Barrenar a) Broca de centros No. 4. b) Broca de 1/4 pulgada (hacer barreno pasado) c) Broca de 7/8 de pulgada (barreno pasado) d) Broca de 1 1/4 pulgadas (barrenar 50 mm de long.)	
11	Mandrinar alojamiento del buje a) Mandrinar a diámetro de 44.00 mm, dejando 0.20 mm para dar medida. b) Maquinar fondo de alojamiento, dejando 0.20 mm para dar medida. c) Dar medida haciendo el recorrido del punto A al B sacando posteriormente la herramienta y hacer el recorrido del punto C al B las veces necesarias hasta dejar las medidas requeridas.	
12	Desmontar pieza	
13	Ensamblar el buje en la tuerca-pisador utilizando la prensa hidráulica.	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: TUERCA-PISADOR.	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT. /95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
14	Montar y centrar pieza.	 <p>DETALLE, PARTE SUPERIOR</p>
15	Refrentar el saliente del buje.	
16	Barrenar con broca de 7/8 de pulgada (toda la pieza).	
17	Mandrinar al diámetro especificado para un ajuste deslizable el cual permita el buen trabajo del punzón.	
18	Maquinar la parte superior de la tuerca-pisador para el alojamiento del indicador del índice de anisotropía.	
19	Maquinar ranura para desvastar posteriormente con un buril, haciendo un recorrido del punto D al punto A y recorriéndose hacia el punto D1 desvastando en cada posición el ancho de la cuchilla hasta despejar el área comprendida entre los puntos D, A, B y D1, dejando las dimensiones con 1 mm por arriba de las requeridas.	
20	Desvastar con buril haciendo el recorrido del punto C al B, hasta dejar las dimensiones 0.5 mm arriba de las especificadas.	
21	Dar medida haciendo el recorrido por los puntos C-B-A hasta dejar 0.5 mm por arriba de la medida y se empieza a dar medida a la pared de los punto D-A de igual manera. Se inicia nuevamente el recorrido C-B-A dejando a medida y, posteriormente se hace el recorrido D-A.	
22	Maquinar ranura. Desvastar empezando en el punto A1 dejando a la dimensión especificada y recorriéndose hacia el punto D2.	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: TUERCA-PISADOR	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
23	Desmontar, girar y centrar la pieza.	
24	Mandrinar a diámetro de 27.32 mm.	
25	Maquinar desahogo de cuerda en el punto A.	
26	Maquinar chaflán según especificaciones en los puntos B y C.	
27	Cortar rosca según especificaciones.	
28	Rebabeear toda la pieza.	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: MATRIZ	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Montar y centrar pieza.	
2	Refrentar.	
3	Cilindrar.	
	a) Diámetro de 99.90 mm.	
	b) Diámetro de 55.10 mm.	
4	Barrenado.	
	a) Broca de centros No. 3.	
	b) Broca de 1/4 de pulgada.	
5	Mandrinar a diámetro de 27.00 mm.	
6	Semitronzado en torno utilizando cuchilla y penetrando tan solo 4 mm.	
7	Maquinar chablán en los puntos A y B.	
8	Refrentar una parte de la superficie C, lo cual servirá para centrar la pieza posteriormente.	
9	Desmontar.	
10	Montar la pieza en la segueta mecánica, para tronzarla por completo.	
11	Montar y centrar pieza en torno.	
12	Refrentar hasta dejar un espesor de 34.00 mm.	
13	Maquinar chablán en la arista D.	
13	Maquinar conicidad según especificaciones.	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: CARCASA	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Montar y centrar pieza.	
2	Refrentar superficie A.	
3	Barrenar. a) Broca de centros No. 3. b) Broca de ½ pulgada (hasta donde permita la broca) c) Broca de 1 ½ pulgadas (hasta donde permita la broca)	
4	Mandrinar a diámetro de 78.28 mm haciendo el siguiente recorrido: a) Maquinar pared recorriendo la herramienta del punto 1 al 2 dejando una tolerancia de 1 o 2 mm de la medida nominal y posteriormente maquinar el fondo dejando la misma tolerancia recorriendo la herramienta desde el punto 3 al 2. b) Dar medida siguiendo la misma secuencia.	
5	Maquinar guías de la matriz con cuchilla y barra de interiores posicionándose en el punto 4 y desvastar dejando 1 o 2 mm de tolerancia, sacar la herramienta y avanzarla hacia el punto 5, recorriendo el ancho de la herramienta y repetir la operación las veces necesarias hasta llegar a la amplitud requerida y entonces volver al punto 4 y repetir toda la operación para dar la medida especificada.	
6	Maquinar caja superior.	
7	Maquinar chaflán en el punto 6.	
8	Cortar cuerda.	
9	Descanso.	

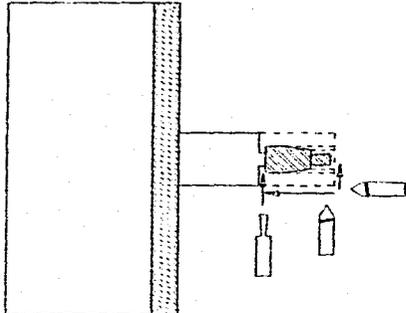
<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: PUNZÓN	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Montar pieza, dejando una saliente de 50 mm aproximadamente.	
2	Refrentar pieza.	
3	Barrenar con broca de centros No. 2.	
4	Aflojar mordazas y montar entre centros.	
5	Cilindrar. a) Dejando 1 mm arriba de la medida. b) Dar medida verificando en tres o cuatro puntos la uniformidad del cilindrado.	
6	Desmontar pieza y colocarle una camisa de aluminio alrededor de la parte maquinada.	
7	Montar pieza, apretandola por la parte en la cual esta la camisa (esto es con el fin de no lastimar la parte maquinada).	
8	Refrentar la cara de la pieza hasta desaparecer la marca del barreno hecho anteriormente.	
9	Cilindrar a un diámetro de 20.00 mm.	
10	Maquinar conicidad.	
11	Maquinar punta esférica del punzón.	
12	Desmontar pieza y girarla.	
13	Refrentar.	
14	Cilindrar a diámetro de 44.5 mm.	
15	Maquinar conicidad.	
16	Matar aristas.	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: INDICADOR DEL ÍNDICE DE ANISOTROPÍA.	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Montar y centrar pieza.	
2	Refrentar.	
3	Cilindrar a diámetro de 67.20 mm.	
4	Barrenar. a) Broca de centros No. 2. b) Broca de ½ pulgada penetrando 15 mm.	
5	Mandrinar a diámetro de 55 X 8 mm de profundidad.	
6	Cilindrar diámetro de 67.00 mm.	
7	Moletear.	
8	Mandrinar. a) Diámetro de 55.80 mm. b) Diámetro de 44.44 mm.	
9	Tronzar con cuchilla, antes de tronzar la pieza se debe refrentar una parte de la misma.	
10	Montar y centrar pieza.	
11	Refrentar pieza hasta dar medida especificada.	
<p>NOTA: Para maquinar el indicador de ajuste de la probeta se seguirá el mismo criterio descrito, sólo que para iniciar el maquinado, se deberá soldar al tramo a maquinar un zanco, el cual servirá para fijar la pieza al mandril.</p>		

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: MANERALES TIPO 1.	TRABAJO: TORNEADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Montar y centrar pieza.	
2	Refrentar.	
3	Cilindrar. a) Diámetro de 20.00 mm (toda la pieza). b) Diámetro para cuerda (a longitud de 13.71 mm).	
4	Maquinar garganta de desahogo para cuerda.	
5	Maquinar chaflán de cuerda.	
6	Cortar cuerda.	
7	Maquinar conicidad.	
8	Rebabeear.	
9	Tronzar.	
10	Montar pieza.	
11	Refrentar.	
12	Maquinar chaflán.	
<p>NOTA: Para el maquinado del maneral tipo 2 y manijas de sujeción de las diversas piezas, se seguirá el mismo criterio descrito.</p>		

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: TUERCA-PISADOR.	TRABAJO: TALADRADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Entintar y marcar en la pieza el primer punto de los dos grupos de barrenos.	<p>PRIMER GRUPO DE BARRENOS</p> <p>SEGUNDO GRUPO DE BARRENOS</p>
2	Montar y centrar la pieza en el cabezal divisor de la fresadora universal.	
3	Barrenar. <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Broca de centros No.2, hecho esto, girar el cabezal divisor y barrenar los tres restantes puntos.</li> <li>b) Broca recomendada para cuerda <math>\frac{3}{4}</math>-UNC, después, girar el cabezal divisor y barrenar.</li> </ul>	
4	Colocar la pieza en posición para barrenar el segundo grupo.	
5	Barrenar. <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Broca de centros No. 1, girar el cabezal divisor y barrenar los dos restantes puntos.</li> <li>b) Broca de 4.35 mm y barrenar 10.00 mm de profundidad, girar el cabezal divisor y barrenar los dos restantes puntos.</li> <li>c) Broca de 5.70 mm y barrenar 3.10 mm de profundidad, posteriormente, girar el cabezal divisor y barrenar los dos restantes puntos.</li> </ul>	
6		
7	Desmontar pieza y montarla en tornillo de banco.	
8	Machuelear barrenos. Limpiar pieza. NOTA: Se utilizará el mismo criterio para las piezas a barrenar y/o machuelear.	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: CARCASA.	TRABAJO: FRESADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
1	Entintar pieza.	
2	Marcar las ventanas a fresar procurando que éstas sean 2 mm más pequeñas a las especificadas (2 mm por cada lado de la ventana).	
3	Montar y centrar pieza en la fresadora universal.	
4	Posicionar el cortador en el punto 2; alimentar el corte (aproximadamente 3/8" de profundidad o más dependiendo del cortador) y avanzar hacia el punto 3.	
5	Avanzar el cortador hacia el punto 4 poco menos del diámetro del cortador (estando el cortador fuera de la pieza) e iniciar el avance de regreso hacia el punto 2, y así las veces necesarias hasta llegar al punto 4; cuando se haya llegado a estos, alimentar el corte (3/8" de profundidad aproximadamente) y repetir la misma secuencia de trabajo, tomando nuevamente el punto 2, como punto inicial. Esta operación de trabajo se hará las veces necesarias hasta traspasar la pieza de trabajo.	

<b>HOJA DE RUTA</b>	PROGRAMA: DISPOSITIVO PARA ENSAYOS DE EMBUTICIÓN.	PIEZA: CARCASA.	TRABAJO: FRESADO
DEPTO: MÁQUINAS HERRAMIENTAS	REVISÓ: Téc. Rosendo Méndez Gallo	FECHA: 06/ OCT./95	REFERENCIA:

Op.	DESCRIPCIÓN	CROQUIS
6	Para dar medida se iniciará en el punto 1, alimentando el corte con 0.5 mm y teniendo el cortador de manera que desvaste el ancho de la pared de la ventana; se avanzará la herramienta hacia el punto 2. De manera similar se desvastará 0.5 mm y se avanzará hacia el punto 3 y posteriormente hacia el punto 4, por último se maquina la pared restante avanzando hacia el punto 1. Esta operación se repetirá las veces necesarias hasta llegar a las medidas especificadas	

### II.3.9 Tratamientos Térmicos del Punzón y Matriz

Ya maquinados se deberán someter las piezas a un tratamiento térmico (templado y recocido), que es el último paso de su fabricación.

Anteriormente se había planteado que el material para la fabricación sería el acero para herramientas O1. De echo se recomienda que en un arreglo punzón-matriz, deben construirse ambos del mismo material, con lo cual se asegura un buen rendimiento del dispositivo.

Por circunstancia diversas no fue posible construir la matriz con el acero recomendado. Ésta se construyo en un acero grado maquinaria NOM 1045 y para el punzón se utilizó el acero O1. La composición química de ellos se puede ver en la tabla 6.

Tabla 6. Composición química de los aceros utilizados.

Material	C %	Mn %	Cr %	W %	P %	S %
(NOM) 1045	0.45	0.60			0.04	0.05
(AISI) O1	0.90	1.00	0.50	0.50		

Templado del Punzón.

Siendo diferentes aceros se debe hacer un templado diferente para cada uno y a continuación se describirá el proceso que se recomienda.

Para templar cualquier pieza se debe calentar a la par, tanto el horno como la pieza en cuestión. Para el punzón (acero O1) se calentará el horno a una temperatura en un rango de 830 °C hasta 1,000 °C, durante un tiempo de 30 a 40 minutos. Echo esto se sacará la pieza e inmediatamente se introducirá en aceite cubriendo totalmente la pieza.

Una vez que se ha enfriado la pieza (hasta que su temperatura permita tocarla con la mano), se tomará e inmediatamente se introducirá al horno para someterla a un revenido durante una hora a 200 °C de temperatura.

#### Templado de la Matriz.

Para el templado y revenido de la matriz se hará en forma similar como se hizo para el punzón, tan solo que el medio de endurecimiento será agua, ya que se trata de un acero grado maquinaria buscaremos igualar su dureza a la del punzón.

Para asegurar un mayor endurecimiento de la pieza la someteremos a un cementado durante cuatro horas a una temperatura de 850 °C.

Terminado el tratamiento de las piezas se someterán a una prueba de dureza para comprobar si es la especificada. Es importante, en el caso del punzón, comprobar la uniformidad del endurecimiento y si la deformación sufrida no afecta su funcionalidad.

## CAPÍTULO III

### TRABAJO EXPERIMENTAL

#### III.1 Ensayo de Tensión

Como se ha comentado nuestro trabajo está enfocado al estudio experimental de las propiedades plásticas en láminas de acero inoxidable 430, y una buena herramienta para determinarlas es el ensayo de tensión, que tiene como finalidad la medición de las cargas aplicadas a una probeta y su deformación.

Este ensayo consiste en aplicar, a una probeta, una fuerza tensora gradual y medir el alargamiento en cada instante de la prueba. (ver figura 29)

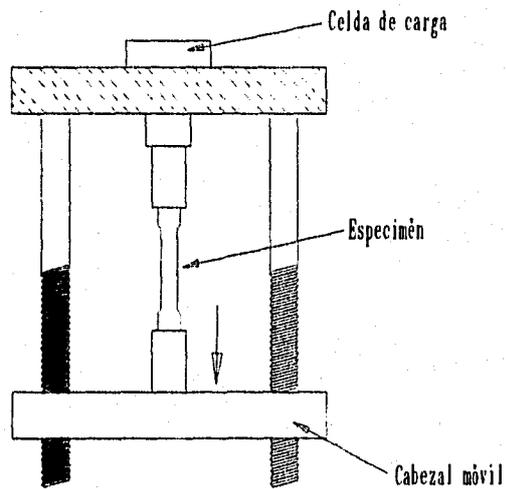


Figura 29. Esquema de una máquina para ensayos de tensión.

Si graficamos los valores del ensayo obtendremos una curva esfuerzo-deformación (ver figura 31). Ésta consta de dos partes principales.

La primera está representada por una línea recta que corresponde a la porción elástica de la probeta. La pendiente observada es llamada "de proporcionalidad" ya que el esfuerzo en esta parte es proporcional a la deformación y es limitada por una ligera curva cuyo punto es conocido como "límite elástico" o "punto de cedencia". Si dejamos de aplicar la fuerza, la deformación sufrida por la probeta desaparecerá, es decir no es permanente.

En la segunda parte encontramos el rango plástico. A menudo la curva tiene un aspecto parabólico pero esto no es representativo de todos los materiales. Después de pasar el punto de cedencia ésta es más pronunciada y tiende más hacia una deformación permanente, es decir, si dejamos de aplicar la carga nuestra probeta no recuperará su forma original. Aquí encontramos los siguientes puntos de interés: punto de fluencia (superior e inferior en algunos casos), resistencia a la tracción y resistencia a la rotura o final. En dicha etapa, la curva alcanza su mayor elevación hasta el valor máximo, llamado resistencia a la tracción, después la curva empieza a descender hasta llegar a la fractura del material (resistencia de rotura).

Debemos señalar que no todos los materiales tienen este comportamiento, es decir, no presentan una gráfica similar y algunos llegan a la fractura inmediatamente después de la región elástica (sobre todo los materiales cerámicos).

A grandes rasgos hemos descrito un ensayo de tensión y los parámetros de interés. De esta curva se obtiene generalmente el límite elástico, la carga máxima y el alargamiento máximo que son los parámetros más importantes a considerar.

### **III.1.1 Máquina de Ensayos**

En el Laboratorio de Pruebas Mecánicas del Anexo de Ingeniería de Ciudad Universitaria se realizaron alrededor de 100 ensayos en una máquina para ensayos Instron Series IX Automated Materials Testing System 1.04 (ver figura 30), que cuenta con una consola de control la cual está interconectada a una computadora por medio de una interfase serie 4200.

En ella se pueden llevar a cabo ensayos de tensión y de compresión. La tensión mínima que aplica la máquina a la probeta es de 10 gr (0.1 N) y la máxima es 10,000 Kg (100 KN), la carga mínima para compresión que puede aplicar es de 100 gr (1 N) y la máxima es de 10,000 Kg (100 KN). El rango de velocidad a la cual se aplica la carga va desde 0.05 a 500 mm/min (0.002 a 20 plg/min) además cuenta con una opción de alta velocidad de 1000 mm/min (40 plg/min)<sup>(21)</sup>.

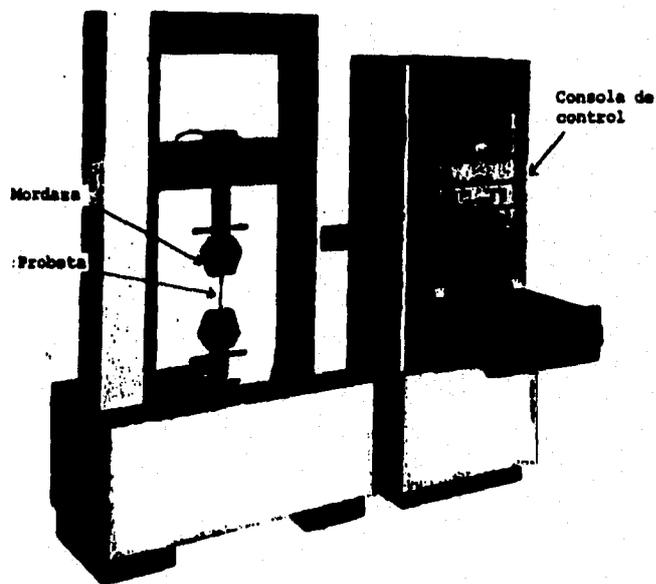


Figura 30. Máquina para ensayos de tensión marca INSTRON.

Para conocer los valores de deformación se cuenta para ello con un extensómetro electrónico, que registra y transmite dichos valores a la computadora. Este es calibrado a dos pulgadas y se sujeta a la sección calibrada de la probeta, ya que es en esta zona donde se experimenta el fenómeno de cuello y regularmente es donde se fractura.

Antes de iniciar un ensayo debemos capturar en la computadora una serie de datos que son de gran importancia para la buena realización del experimento y son:

- Temperatura y humedad del medio ambiente.
- Velocidad del ensayo (velocidad a la que la máquina tensionará o comprimirá la probeta).
- Norma bajo la cual se realiza el ensayo.
- Dimensiones del espécimen.
- Comentarios personales.

Al termino del ensayo y una vez registrados todos los datos, podemos mandar a imprimir los resultados así como la gráfica correspondiente, una muestra de tales se puede ver en la figura 31 y 32.

### **III.1.2 Especificaciones de la Probeta**

Las probetas que se usaron fueron hechas de lámina de acero inoxidable tipo 430 en un espesor de 0.395 mm, para el corte de ellas se utilizó un suaje respetando en lo posible la norma ASTM E 8M <sup>(22)</sup>. (ver figura 33)

Posteriormente fueron tratadas térmicamente a una temperatura en un rango de 850 °C a 1000 °C; los tiempos del tratamiento fueron desde 5 hasta 45 minutos, haciendo así un total de 111 probetas (incluyendo un grupo control de 3 probetas a las cuales no se les realizó tratamiento alguno), esto en lo que se refiere a probetas calentadas en atmósfera de aire. Las probetas calentadas en atmósfera de argón, sumaron alrededor de 30 probetas.

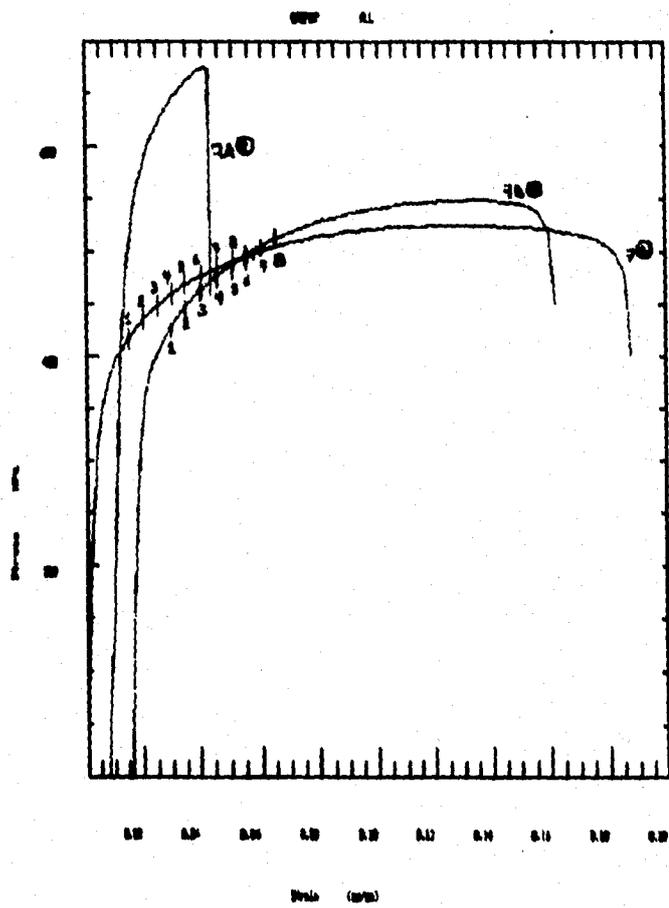


Figura 31. Curva esfuerzo-deformación de tres probetas ensayadas. Cortesía del Laboratorio de Pruebas Mecánicas de Ciudad Universitaria.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LABORATORIO DE PRUEBAS MECÁNICAS

Modo de tensión para láminas delgadas.

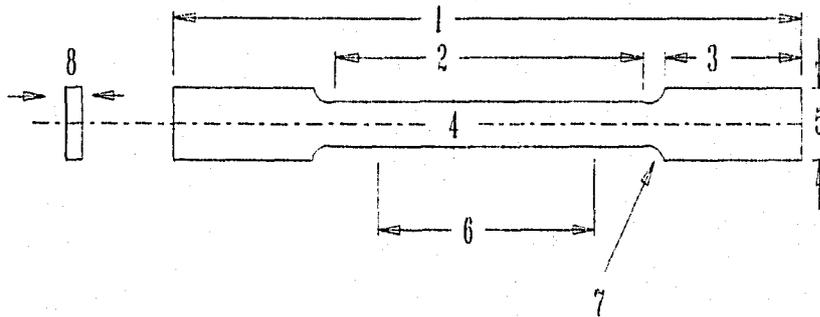
Test type: Tensile  
Operator name: Adolfo Alzamora N.  
Sample Identification (NOM):  
Interface Type: 4220 Series  
Machine Parameters of test:  
Sample Size (mm): 5.00  
Crosshead Speed (mm/s): 10.000  
Automatic catch value: 20.0000 offset  
Machine Corporation: Instron Corporation  
Series: 13 Automated Materials Testing System 1.04  
Test Date: 23 Jan 1978  
Sample Type: 0270  
Humidity (%): 20  
Temperature (deg. C): 18

Dimensions:  
Spec. 1 Spec. 2 Spec. 3  
Width (mm): 12.500 12.500 12.500  
Thickness (mm): .0000 .0000 .0000  
Ext. gauge len (mm): 50.000 50.000 50.000  
Spec. gauge len (mm): 110.00 110.00 110.00

Out of 3 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Condition	Elongation			Stress			Elongation			Elongation at 0.2% Yield (mm)
		Peak (mm)	at 0.2% (%)	at 0.2% (mm)	Peak (MPa)	at 0.2% (MPa)	at 0.2% (mm)	Peak (MPa)	at 0.2% (MPa)	at 0.2% (mm)	
1	00-1000	11.000	12.040	2.420	320.1	10.900	10.470	2.000	419.7	.3700	
2	00-1000	2.000	2.372	2.370	470.0	2.720	2.612	2.210	442.2	.4100	
3	00-1000	9.720	12.140	2.742	340.3	11.000	14.470	2.200	477.7	.3140	
Mean		7.000	9.701	2.910	350.1	9.747	12.100	2.099	519.9	.2490	
Standard Deviation		4.409	3.411	.400	51.1	6.300	7.000	.623	126.6	.0510	
Specimen Number	Elongation at 0.2% Yield (%)	Elongation at 0.2% Yield (mm)	Load at 0.2% Yield (MPa)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy at Yield (MPa)	Energy at Break (MPa)				
1	.4720	1.711	320.4	10000.	.0001	20.490					
2	.0190	2.327	470.6	21000.	.0014	7.702					
3	.3923	1.706	320.2	10700.	.0009	29.320					
Mean	.4617	1.931	350.4	10700.	.0004	24.500					
Standard Deviation	.0620	.344	68.7	2010.	.0004	12.070					

Figura 32. Hoja de datos obtenidos de un ensayo de tensión.



Dimensiones (mm)	
Concepto	Medida
1. Largo total de la probeta (min.)	200 ± 0.1
2. Largo de la sección reducida	57
3. Largo de la sección de agarre	50
4. Ancho (sección reducida)	12.5 ± .02
5. Ancho de la sección de agarre	20
6. Largo de la sección calibrada	50
7. Radio del filete (min.)	12.5
8. Espesor	Espesor del material

Figura 33. Probeta para ensayos de tensión y tabla de dimensiones. Fuente: Norma ASTM E 8M-92

### III.1.3 Cálculo del Factor de Anisotropía $r$

Para calcular el factor de anisotropía  $r$ , nos basaremos en el método descrito según la norma ASTM E 517-74, y cuyas ecuaciones fueron descritas en la sección I.1. Cabe señalar que dichas ecuaciones describen como calcular el factor  $r$ , ya sea por medio del espesor y ancho de la probeta, o bien en base a la longitud y ancho. Aclaremos que se hará el cálculo utilizando los cambios en el espesor y ancho de la probeta, ya que presenta mayor facilidad por el hecho de que tan solo debemos tomar la probeta y hacer la lectura de sus dimensiones.

Para obtener una medida confiable de la probeta, tenemos que limpiar la superficie de ésta, con el fin de tener una área limpia de óxido e impurezas que contribuyan a una mala lectura.

El valor inicial de la probeta se obtiene haciendo una plantilla de cualquiera de las dos partes de ésta sobre una hoja blanca, extenderemos las líneas rectas de la zona de la longitud calibrada hacia la parte final de la sección de sujeción para las mordazas y, en la parte en la cual se aprecie que éstas se hacen tangentes al radio (véase figura 34), haremos una marca tanto en la plantilla como en la probeta y ese será nuestro punto en el cual tomaremos lectura de sus dimensiones iniciales.

En lo referente a las dimensiones finales, debemos analizar que en la zona de fractura de ésta existen dos zonas de deformación; la zona de deformación homogénea y la heterogénea. Para tomar las lecturas finales se hará en la parte en la cual se puede apreciar un cambio drástico en ancho de la probeta, que es lo que se conoce como el cambio de una zona de deformación homogénea a una heterogénea, de igual manera marcaremos dicha zona para tomar las dimensiones finales.

Como se mencionó anteriormente, se hará el cálculo de  $r$  y  $n$  para una parte representativa del lote total, por lo que a nuestra consideración elegimos solamente tres grupos de especímenes y el grupo control cuyas dimensiones se pueden apreciar en la tabla 7 en donde están, en forma ordenada, todas y cada una de las lecturas

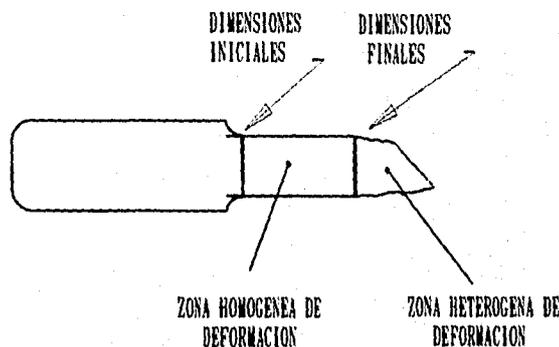


Figura 34. Esquema de una parte de la probeta ensayada en donde se puede apreciar las zonas en donde se deben tomar las lecturas correspondientes.

Cada grupo de los elegidos está formado por tres especímenes o probetas, las cuales fueron cortadas en forma longitudinal y transversal a la dirección de rolado de la lamina, pero no existe probeta alguna que haya sido cortada en una dirección a 45 grados a partir de la dirección de rolado por lo que, si revisamos nuestras ecuaciones veremos que nos faltaría el cálculo del factor  $\alpha$  para dicha dirección y con ello poder calcular los factores  $r_m$  y  $\Delta r$ , por lo que tan solo podremos hacer el cálculo para la anisotropía normal.

De las tres probetas de cada grupo se les asigno una letra para distinguirlas de entre ellas y en la tabla se podrá observar éstas, además se les asigno un subíndice el cual determina el valor inicial (0) y el valor final (1).

TABLA 7. Dimensiones de las probetas ensayadas a tensión.

PROBETA	GRUPO CONTROL		GRUPO 23 900 °C 45 min.		GRUPO 14 950 °C 45 min.		GRUPO 8 1000 °C 45 min.	
	t	w	t	w	t	w	t	w
<b>Eo</b> <b>Ef</b>	0.0153 0.0143	0.481 0.433	0.0120 0.0115	0.4650 0.4375	----- -----	----- -----	0.0155 0.0148	0.4830 0.4570
<b>Ao</b> <b>Af</b>	0.0158 0.0145	0.472 0.441	0.0120 0.0113	0.4790 0.4375	0.0158 0.0154	0.4918 0.4750	0.0120 0.0115	0.4910 0.4640
<b>Bo</b> <b>Bf</b>	----- -----	----- -----	0.0120 0.0116	0.4690 0.4485	0.0170 0.0162	0.4900 0.4600	0.0117 0.0112	0.4880 0.4620

donde:

t= Espesor del espécimen  
w= Ancho del espécimen

Ahora, aplicando la ecuación número 5, obtendremos los valores de  $r_z$  para cada una de las probetas.

**GRUPO CONTROL.**

**PROBETA E**

$$r_z = \frac{\ln\left(\frac{0.433}{0.481}\right)}{\ln\left(\frac{0.0143}{0.0153}\right)} = 1.5553$$

**GRUPO 23**

**PROBETA 23E**

$$r_z = \frac{\ln\left(\frac{0.4375}{0.4650}\right)}{\ln\left(\frac{0.0115}{0.0120}\right)} = 1.4323$$

**PROBETA 23A**

$$r_A = \frac{\ln\left(\frac{0.4375}{0.479}\right)}{\ln\left(\frac{0.0113}{0.0120}\right)} = 1.5077$$

**PROBETA 23B**

$$r_B = \frac{\ln\left(\frac{0.4485}{0.469}\right)}{\ln\left(\frac{0.0116}{0.0120}\right)} = 1.3183$$

**GRUPO 14**

**PROBETA 14E**

$r_z$  No se pudo tomar lectura

**PROBETA 14A**

$$r_A = \frac{\ln\left(\frac{0.4750}{0.4918}\right)}{\ln\left(\frac{0.0154}{0.0158}\right)} = 1.3554$$

**PROBETA 14B**

$$r_B = \frac{\ln\left(\frac{0.460}{0.490}\right)}{\ln\left(\frac{0.0162}{0.0170}\right)} = 1.3107$$

**GRUPO 8**

**PROBETA 8Z**

$$r_Z = \frac{\ln\left(\frac{0.457}{0.483}\right)}{\ln\left(\frac{0.0148}{0.0155}\right)} = 1.1973$$

**PROBETA 8A**

$$r_A = \frac{\ln\left(\frac{0.464}{0.491}\right)}{\ln\left(\frac{0.0115}{0.0120}\right)} = 1.3289$$

**PROBETA 8B**

$$r_B = \frac{\ln\left(\frac{0.462}{0.488}\right)}{\ln\left(\frac{0.0112}{0.0117}\right)} = 1.2535$$

#### III.1.4 Cálculo del Índice de Endurecimiento por Trabajo $n$

La norma ASTM E 646-91, nos guiará en el cálculo del índice  $n$  (ver sección I.1), ya que en ella se encuentran tanto las ecuaciones así como también el método a seguir. Cabe señalar que para dicho cálculo existe un programa de computo que fue creado en Ciudad Universitaria, pero el cual requiere de una serie de transformación de unidades y lo cual arrojaría un buen número de páginas innecesariamente.

Utilizando las gráficas obtenidas en los ensayos realizados en el Laboratorio de Pruebas Mecánicas, obtendremos los valores respectivos de esfuerzo y deformación en un instante para las probetas que a nuestro criterio representen un comportamiento más uniforme, aunque tan solo se calcule el índice para una probeta por grupo.

Para el cálculo de  $n$  se deben colocar puntos sobre la gráfica esfuerzo-deformación en la zona siguiente del límite elástico. Estos pueden ser tantos como uno quiera hacer más preciso el cálculo, por lo que en nuestro caso tomaremos ocho pares de datos, es decir, colocaremos ocho puntos sobre la gráfica. Trataremos en lo posible de colocarlos en lugares donde el valor de la deformación sea más claro.

Los valores que obtengamos no requieren de transformación de unidades para poder aplicar la ecuación 21, de ahí el porqué de utilizar principalmente este método y el programa de computo nos servirá para comprobar más adelante nuestros resultados.

Los datos de cada gráfica están, en forma ordenada, colocados en las siguientes tablas de acuerdo a cada espécimen y el cálculo de  $n$  se podrá observar a continuación de cada una de ellas.

Tabla 8. Probeta control Z

DATOS	$\sigma$ (MPa)	$\gamma$	$\gamma^2$	$\epsilon$ (%)	$X$	$X^2$	$XY$
1	389.1891	2.5901	6.7089	0.050	-1.3010	1.6929	-3.3697
2	397.2973	2.5991	6.7554	0.055	-1.2596	1.5866	-3.2738
3	408.1081	2.6107	6.8161	0.060	-1.2218	1.4929	-3.1897
4	412.1621	2.6150	6.8385	0.065	-1.1870	1.4091	-3.1040
5	416.2162	2.6193	6.8608	0.070	-1.1549	1.3379	-3.0250
6	421.0810	2.6243	6.8872	0.075	-1.1249	1.2654	-2.9520
7	424.8648	2.6282	6.9077	0.080	-1.0969	1.2032	-2.8828
8	429.7297	2.6331	6.9337	0.085	-1.0705	0.1461	-2.8187
SUMA TOTAL		20.9198			-9.4166	11.1341	-24.6157

$$n = \frac{(8 \cdot -24.615) - (-9.4166 \cdot 20.9198)}{(8 \cdot 11.1341) - (-9.4166)^2} = 0.1693$$

Tabla 9. Probeta control B

DATOS	$\sigma$ (MPa)	$\gamma$	$\gamma^2$	$\epsilon$ (%)	$X$	$X^2$	$XY$
1	410.8108	2.6136	6.8311	0.050	-1.3010	1.6929	-3.4002
2	416.2162	2.6193	6.8608	0.055	-1.2596	1.5866	-3.2992
3	421.6216	2.6249	6.8902	0.060	-1.2218	1.4929	-3.2071
4	424.8648	2.6282	6.9077	0.065	-1.1870	1.4091	-3.1196
5	429.7297	2.6331	6.9337	0.070	-1.1549	1.3379	-3.0409
6	432.4324	2.6359	6.9480	0.075	-1.1249	1.2654	-2.9651
7	436.4864	2.6399	6.9694	0.080	-1.0969	1.2032	-2.8987
8	439.1891	2.6426	6.9836	0.085	-1.0705	0.1461	-2.8289
SUMA TOTAL		21.0375			-9.4166	11.1341	-24.7567

$$n = \frac{(8 \cdot -24.7567) - (-9.4166 \cdot 21.0375)}{(8 \cdot 11.1341) - (-9.4166)^2} = 0.12017$$

Tabla 10. Probeta 23

DATOS	$\sigma$ (MPa)	$\gamma$	$\gamma^2$	$\epsilon$ (%)	$X$	$X^2$	$XY$
1	303.1250	2.4816	6.1584	0.015	-1.8239	3.3266	-4.5262
2	321.2500	2.5068	6.2842	0.020	-1.6989	2.8864	-4.2588
3	335.9375	2.5262	6.3819	0.025	-1.6020	2.5666	-4.0470
4	348.4375	2.5421	6.4624	0.030	-1.5228	2.3191	-3.8711
5	359.3750	2.5555	6.5308	0.035	-1.4559	2.1197	-3.7205
6	369.3750	2.5674	6.5918	0.040	-1.3979	1.9542	-3.5889
7	378.7500	2.5783	6.6479	0.045	-1.3467	1.8138	-3.4721
8	386.8750	2.5875	6.6955	0.050	-1.3010	1.6926	-3.3664
SUMA TOTAL		20.3456			-12.1491	18.6790	-30.8510

$$n = \frac{(8 * -30.8510) - (-12.1491 * 20.3456)}{(8 * 18.6790) - (-12.1491)^2} = 0.2031$$

Tabla 11. Probeta 23B

DATOS	$\sigma$ (MPa)	$\gamma$	$\gamma^2$	$\epsilon$ (%)	$X$	$X^2$	$XY$
1	368.750	2.5667	6.5881	0.025	-1.6020	2.5666	-4.1118
2	400.000	2.6020	6.7707	0.030	-1.5228	2.3191	-3.9623
3	423.437	2.6267	6.9000	0.035	-1.4559	2.1197	-3.8242
4	440.625	2.6440	6.9911	0.040	-1.3979	1.9542	-3.6960
5	450.000	2.6532	7.0395	0.045	-1.3467	1.8138	-3.5730
6	465.625	2.6680	7.1184	0.050	-1.3010	1.6926	-3.4710
7	471.875	2.6738	7.1493	0.055	-1.2596	1.5866	-3.3679
8	484.375	2.6851	7.2102	0.060	-1.2218	1.4929	-3.2806
SUMA TOTAL		21.1195			-11.1077	15.5455	-29.2868

$$n = \frac{(8 * -29.2868) - (-11.1077 * 21.1195)}{(8 * 15.5455) - (-11.1077)^2} = 0.2997$$

Tabla 12. Probeta 14Z

DATOS	$\sigma$ (MPa)	$\gamma$	$\gamma^2$	$\epsilon$ (%)	$X$	$X^2$	$XY$
1	725.0	2.8603	8.1815	0.0150	-1.8239	3.3266	-5.2169
2	750.0	2.8750	8.2659	0.0175	-1.7569	3.0869	-5.0510
3	767.5	2.8850	8.3236	0.0200	-1.6989	2.8865	-4.9013
4	780.0	2.8920	8.3642	0.0225	-1.6478	2.7153	-4.7654
5	792.5	2.8989	8.4041	0.0250	-1.6020	2.5666	-4.6440
6	802.5	2.9044	8.4358	0.0275	-1.5606	2.4356	-4.5326
7	810.0	2.9084	8.4592	0.0300	-1.5228	2.3191	-4.4289
8	820.0	2.9138	8.4903	0.0325	-1.4881	2.2145	-4.3360
SUMA TOTAL		23.1378			-13.1010	21.5511	-37.8761

$$n = \frac{(8 * -37.8761) - (-13.1010 * 23.1378)}{(8 * 21.5511) - (-13.1010)^2} = 0.15469$$

Tabla 13. Probeta 14B

DATOS	$\sigma$ (MPa)	$\gamma$	$\gamma^2$	$\epsilon$ (%)	$X$	$X^2$	$XY$
1	612.50	2.7871	7.7679	0.0150	-1.8239	3.3266	-5.0833
2	670.00	2.8260	7.9867	0.0175	-1.7569	3.0869	-4.9649
3	715.00	2.8543	8.1470	0.0200	-1.6989	2.8865	-4.8491
4	744.00	2.8715	8.2459	0.0225	-1.6478	2.7153	-4.8491
5	762.50	2.8822	8.3073	0.0250	-1.6020	2.5666	-4.7316
6	780.00	2.8920	8.3642	0.0275	-1.5606	2.4356	-4.5132
7	792.50	2.8989	8.4042	0.0300	-1.5228	2.3191	-4.4144
8	802.50	2.9044	8.4358	0.0325	-1.4881	2.2145	-4.3220
SUMA TOTAL		22.9164			-13.1010	21.5511	-37.4958

$$n = \frac{(8 * -37.4958) - (-13.1010 * 22.9164)}{(8 * 21.5511) - (-13.1010)^2} = 0.33819$$

Tabla 14. Probeta 8Z

DATOS	$\sigma$ (MPa)	$\gamma$	$\gamma^2$	$\epsilon$ (%)	$X$	$X^2$	$XY$
1	390.2777	2.59137	6.71521	0.010	-2.00000	4.00000	-5.18274
2	369.4442	2.56754	6.59230	0.015	-1.82390	3.32664	-4.68293
3	408.3333	2.61101	6.81740	0.020	-1.69897	2.88649	-4.43602
4	419.4444	2.62267	6.87842	0.025	-1.60206	2.56666	-4.20167
5	427.7777	2.63122	6.92330	0.030	-1.52287	2.31916	-4.00700
6	436.1111	2.63959	6.96747	0.035	-1.45593	2.11974	-3.84305
7	441.6666	2.64509	6.99652	0.040	-1.39794	1.95423	-3.69767
8	448.6111	2.65187	7.03241	0.045	-1.34678	1.81383	-3.57148
SUMA TOTAL		20.96036			-12.8484	20.9866	-33.6225

$$n = \frac{(8 \cdot -33.62256) - (-12.8484 \cdot 20.96036)}{(8 \cdot 20.98669) - (-12.8484)^2} = 0.11656$$

Los resultados anteriores son para las probetas representativas del total que comprenden tres familias que fueron tratadas a 900 °C, 950 °C y 1,000 °C respectivamente y a diferentes tiempos de permanencia en el horno.

Ahora se dará el cálculo del índice  $n$  para la familia tratada a 900 °C y todos los tiempos empleando el paquete de computo.

Para poder utilizar dicho paquete debemos de igual manera utilizar ocho puntos de sus gráficas y teniendo los valores de esfuerzo y deformación los transformaremos a fuerza aplicada y longitud deformada.

Para poder hacer dicha conversión nos basaremos en las ecuaciones de esfuerzo ingenieril y deformación (ver sección 1.1.3) quedando de la siguiente forma:

$$F = A_0 S$$

$$\Delta L = L_0 e$$

donde:

- F. Fuerza aplicada
- A<sub>0</sub>. Area de la sección transversal (5 mm)
- S. Esfuerzo ingenieril
- e. Deformación
- L<sub>0</sub>. Longitud de la sección calibrada (50.8 mm)
- ΔL. Longitud deformada

Aplicando dichas ecuaciones y haciendo las conversiones de unidades convenientes tenemos las tablas de resultados para cada una de las probetas que se creyó tiene un mejor comportamiento.

Tabla 15. Grupo 31 a 900 °C y 5 minutos.

F (kg)	ΔL (cm)
205.289	0.2286
210.952	0.2540
215.907	0.2794
220.155	0.3048
224.402	0.3302
227.234	0.3355
230.065	0.3810
232.897	0.4064

$$n = 0.2839$$

Tabla 16. Grupo 30 a 900 °C y 10 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
152.9052	0.1270
160.4005	0.1524
167.8959	0.1778
173.5923	0.2032
178.3894	0.2286
182.8866	0.2540
187.3838	0.2794
191.1315	0.3048

n = 0.2987

Tabla 17. Grupo 31 a 900 °C y 15 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
205.9972	0.1270
212.3683	0.1524
218.0314	0.1778
222.7035	0.2032
226.5262	0.2286
230.4904	0.2540
232.8927	0.2794
236.1535	0.3048

n = 0.3517

Tabla 18. Grupo 28 a 900 °C y 20 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
154.4042	0.1270
161.8996	0.1524
168.6454	0.1778
173.8921	0.2032
179.8884	0.2286
183.6361	0.2540
187.3838	0.2794
190.3819	0.3048

n = 0.2856

Tabla 19. Grupo 27 a 900 °C y 25 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
142.4117	0.08636
152.1556	0.10668
158.9014	0.12192
164.8977	0.13716
170.8940	0.15748
175.3912	0.17272
179.8884	0.18796
184.3856	0.20320

n = 0.3289

Tabla 20. Grupo 26 a 900 °C y 30 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
209.8698	0.1270
216.6157	0.1524
222.6119	0.1778
227.8587	0.2032
231.6064	0.2286
235.3540	0.2540
237.6026	0.2794
241.3503	0.3048

n = 0.2002

Tabla 21. Grupo 25 a 900 °C y 35 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
150.6565	0.0762
158.9014	0.1016
166.3968	0.1270
173.8921	0.1524
178.3894	0.1778
183.6361	0.2032
188.1333	0.2286
191.1315	0.2540

n = 0.2332

Tabla 22. Grupo 24 a 900 °C y 40 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
218.8643	0.1778
227.8587	0.2032
235.8038	0.2286
239.1017	0.2540
244.3485	0.2794
248.0961	0.3048
251.8438	0.3302
254.5421	0.3556

n = 0.1834

Tabla 23. Grupo 23 a 900 °C y 45 minutos.

F (kg)	$\Delta L$ (cm)
154.4496	0.0762
163.7166	0.1016
169.8946	0.1270
176.0726	0.1524
181.4783	0.1778
186.8800	0.2032
190.7453	0.2286
195.3788	0.2540

n = 0.2247

### **III.2 Temple del Acero Inoxidable**

Cuando nos referimos a un tratamiento térmico como el templado, casi instantáneamente pensamos en un endurecimiento del metal. Si consultamos algunos libros, generalmente nos encontramos que en ellos se habla de diversos materiales templables, temperaturas de templado, medios de temple, dureza aproximada obtenida, etc. Pero ninguno de ellos trata de un templado para aceros inoxidable, por lo que muchos creen, y de hecho así lo maneja la mayoría de personas, que este material no es templable.

Al hablar de un temple en aceros inoxidables no necesariamente nos referimos a un endurecimiento, tan solo en los inoxidables martensíticos si se aprecia un endurecimiento del material.

En los aceros austeníticos (100% austenita) ciertamente no lo hay, más sin embargo, a temperatura ambiente y alta lo que ocurre es que el material se ablanda y este tipo de temple se le llama de homogenización.

Los ferríticos se comportan de distinta forma, en ellos se puede observar que existe un temple de homogenización o de transformación parcial de fase.

En conclusión, si se temple un acero inoxidable se logrará un endurecimiento sólo si es martensítico, si no, se logrará un temple de homogenización (austeníticos) o transformación parcial de fase (ferríticos).

### III.3 Tratamiento Térmico y los cambios mecánicos

Tanto las probetas usadas para los ensayos de tensión como para las de embutido en las pruebas Erichsen, fueron tratadas térmicamente. Como ya lo mencionamos en la sección III.1, todas eran de acero ferrítico inoxidable 430.

Se ubicó la zona austeno-ferrítica en una sección del diagrama de fases Fe-Cr-C para transformarla mediante tratamientos térmicos en un acero con una composición aproximada de 15 a 20% de martensita y el resto de ferrita. (ver figura 35)

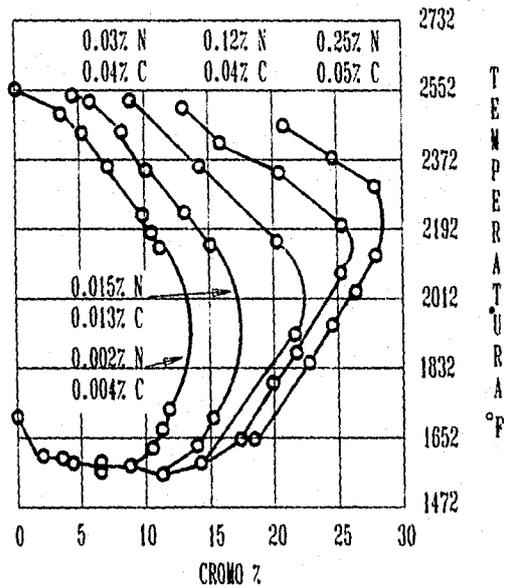


Figura 35. Líneas que marcan el límite austeno-ferrítico según el contenido de C y N del acero inoxidable bifásico ferrita + martensita, 400X. Fuente: XVII Simposio Nacional de Siderurgia, p. 6.7.

Los aceros inoxidable ferríticos difieren marcadamente de los austeníticos en virtud de su mayor límite de fluencia con una menor razón de endurecimiento por deformación. Estas diferencias hacen que los austeníticos sean mejor que los ferríticos <sup>(24)</sup>. Esto implica que los aceros Fe-Cr no son muy recomendables para trabajos donde está implicado el estiramiento.

Por ello el acero inoxidable ferrítico lo usaremos en su condición de recocido, cuando se requiera alta resistencia se recurre al rolado en frío. Lo antes señalado implica que el acero así tratado tiene baja ductilidad y una gran anisotropía dentro de su caracterización mecánica que los lleva a una pobre deformabilidad.

Los acero bifásicos tienen como característica morfológica poseer un 80-85% de ferrita limpia, sin precipitados y parcialmente endurecida por elementos aleantes solubles. El restante 15 a 20% de la estructura está formada por austenita nucleada en los límites de grano de la ferrita preexistente. Cuando esta austenita se transforma en martensita, origina dislocaciones frescas en la ferrita que la rodea y por ello no se producen bandas de Lüders <sup>(23)</sup> al inicio de la deformación con la consiguiente mejora en las características superficiales del acero.

Para convertir el acero ferrítico 430 en un acero bifásico es necesario realizar varias acciones.

1. Disolver los carburos precipitados en la estructura ferrítica.
2. Crear, por tratamiento térmico, un porcentaje de austenita entre 15 y 20% en la ferrita preexistente.
3. Realizar un temple adecuado para que la austenita se convierta en martensita, capaz de deformar la ferrita de su entorno, a fin de crear nuevas dislocaciones que se muevan con facilidad y que produzcan un endurecimiento en el material.

Este trabajo se realizó en láminas de 0.395 mm de espesor con la composición química siguiente:

C = 0.057 %	Si = 0.297 %	P = 0.020 %	Ni = 0.200 %
N = 0.032 %	Mn = 0.462 %	S = 0.008 %	
Mo = 0.030 %	Cu = 0.022 %	Cr = 16.34 %	

Tanto las probetas para tensión y Erichsen fueron calentadas hasta la zona austenoferrítica, las temperaturas de recocido empleadas fluctuaron en el rango de 850 a 1,000 °C y en tiempos de 5 a 45 minutos. Todas ellas fueron templadas en agua.

Para lograr obtener la doble fase en los aceros inoxidable ferríticos, debemos partir del diagrama Fe-Cr, se busca el punto en el cual exista de 80 a 85% de ferrita y 15 a 20% de austenita, sin embargo dicha zona en este diagrama es muy pequeña. Para obtener ésta con más precisión es necesario que nos apoyemos en la figura 35 (gráfica Fe-Cr), en la cual vemos que el contenido de carbón y nitrógeno determinan el efecto para formación de la austenita. En dicha figura la línea que se consideró para las muestras que se recocieron fue de 0.04% C y 0.12% N si se considera un contenido de 16.34% de Cr. En ambos vemos que hay más posibilidad de tener entre 15 y 20% de austenita a las temperaturas de 950 y 1,000 °C.

Sin embargo, parece ser que el nitrógeno y el carbón también bajan la línea, ya que a 900 °C este trabajo encontró la posibilidad de producir los aceros bifásicos <sup>(25)</sup>.

La mecánica del proceso fue la siguiente:

Calentar en el horno eléctrico por el tiempo establecido las probetas de una en una para formar grupos de 3 probetas con las mismas características de tiempo y temperatura, dándonos un total de alrededor de 145 especímenes templados para ensayos de tensión (118 especímenes calentados en atmósfera de aire y el resto en atmósfera de argón).

Del igual modo se les dio el mismo tratamiento a un total de alrededor de 55 probetas (27 calentadas en atmósfera de aire y el resto en atmósfera de argón) para ensayo Erichsen.

### III.4 Ensayos de Embutibilidad

Se realizaron varios ensayos de embutibilidad utilizando el dispositivo para ensayos Erichsen de la E.S.I.M.E Azcapotzalco, que se compone básicamente de una carcaza, en la cual se aloja la matriz, el pisador y el punzón (ver figura 27). La carga aplicada a la probeta es provista por una prensa hidráulica de 5 toneladas.

El ensayo se inicia colocando la probeta sobre la matriz, y fijandola con el pisador, se deja una holgura entre ambos de 0.05 mm. Después se coloca el indicador de penetración con el punzón a cero comenzado a aplicar la carga; el final de la prueba está determinada por la rotura de la probeta. La penetración máxima o deformación de la chapa es medida en milímetros y puede leerse en la graduación del punzón y el calibrador; por otra parte la carga máxima se lee en un indicador de carátula de la prensa.

Estos ensayos se realizaron con apego a la norma ASTM designación E643-84 denominada Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material.

La norma hace una serie de recomendaciones para llevar a cabo los ensayos, por ejemplo el uso de lubricantes es de gran ayuda para una mejor embutibilidad, que en nuestro caso no se utilizó, aunque cabe señalar que la cascarilla que se formo en el recocido hace las veces de lubricante.

Nos recomienda también que se hagan un mínimo de 3 ensayos para una mayor precisión del comportamiento de un mismo material bajo las mismas condiciones.

Por último otro aspecto importante es la velocidad de embutido; la norma nos recomienda un rango de 0.08-0.40 mm/seg. Aproximadamente la velocidad que nosotros empleamos fue de 0.20 mm/seg debido a que la prensa se accionó en forma manual.

El objetivo de realizar estos ensayos de embutición, fue el de observar el comportamiento mecánico bajo tensión biaxial de un mismo material, que como ya lo explicamos se sometió a un recocido para ver su comportamiento en comparación con una probeta control.

Lo representativo de estos ensayos se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 24. Resultados obtenidos de los ensayos realizados bajo criterio Erichsen en probetas de lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de aire y templada en agua.

PROBETAS			
TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (min.)	CARGA (kg.)	DEFORMACIÓN (mm)
Control	Control	685	8.8
850	15	578	8.1
850	45	552	6.9
900	15	565	5.7
900	30	408	5.6
900	45	460	6.2
950	15	535	6.3
950	30	496	4.9
950	45	410	6.0
1000	15	405	5.5
1000	30	275	4.9
1000	45	285	4.9

Tabla 25. Resultados obtenidos de los ensayos realizados bajo criterio Erichsen en probetas de lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de argón y templada en agua.

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (min)	CARGA (Kg)	DEFORMACION (mm)
900	5	590	6.9
900	10	585	7.0
900	15	555	7.1
900	30	575	6.45
900	45	570	6.2
950	5	620	6.1
950	10	600	6.0
950	15	620	6.0
950	30	590	5.0
950	45	570	5.6
1000	5	650	4.7
1000	10	552	5.4
1000	15	540	5.2
1000	30	520	5.2
1000	45	510	5.2

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

#### IV.1 Recopilación de la Información

El objetivo de este trabajo consiste en realizar una comparación entre los resultados de un ensayo Erichsen con respecto a los del cálculo de  $n$  y  $r$  que se obtienen con una prueba de tensión. No obstante lo anterior y aprovechando uno de los proyectos de investigación que se realizan en este campus, mostraremos la información relacionada con diversos tiempos y temperaturas de tratamiento térmico.

En las figuras de la 36 a 39 se muestran graficados los resultados de calcular  $n$  y  $r$  a tiempos de 45 minutos con temperaturas de 900, 950 y 1,000 °C.

Es característica la caída en los valores de  $r$  a medida que la temperatura se incrementó para poder templar, sin embargo al observar el comportamiento de  $n$  hay un punto a 900 °C en ambas en donde el valor es superior a la probeta control.

En la figura 40 se tiene la tabla y gráfica de los valores del índice  $n$  para la familia de probetas tratadas a 900 °C y con tiempos desde 5 hasta 45 minutos. En ella podemos comparar el resultado obtenido con el paquete de computo contra el método recomendado por la norma E646-91. Para la probeta a 45 minutos (que es la analizada anteriormente del grupo 23) el valor de  $n$  calculado es de 0.2247 y el obtenido por medio de las ecuaciones es de 0.2547. Tal diferencia la creemos, debido a que la norma recomienda se utilicen al menos 10 o más cifras significativas y nosotros tan solo utilizamos 4 dígitos, por lo cual creemos se debe la diferencia, aunque ésta no es demasiada.

Otro aspecto interesante de esta figura es que se puede apreciar una tendencia descendente del valor del índice  $n$  conforme aumenta el tiempo de templado.

Por lo tanto, podemos afirmar que para el índice  $n$  se tendrán valores inferiores conforme se aumente el tiempo y temperatura de templado en comparación al que no es tratado térmicamente.

Al consultar en el XVII Simposio Nacional de Siderurgia<sup>(25)</sup> en los cuadros 41 al 44 se aprecian los datos de la figura 40 pero además se complementan a 950 y 1,000 °C, aquí es conveniente resaltar la tendencia a la baja en los valores y expresar la congruencia con el comportamiento de  $\epsilon$  tanto en las figuras 36 y 37 como en las 43 y 44.

Al observar las figuras 45 a 48 es posible llegar al alma de esta tesis, la cual pretende demostrar que hay una interrelación entre los resultados que se pueden obtener con Erichsen, Olsen y los diversos ensayos de embutibilidad mencionados en el capítulo primero con el comportamiento del factor de anisotropía y el exponente de endurecimiento por deformación.

Es importante remarcar que es poco acentuada la diferencia de las láminas control con respecto a los resultados graficados de  $n$  y  $\epsilon$ . Lo anterior se confirma cuando cruzamos la información carga-deformación en las figuras 49 y 50 en donde se puede establecer que la mejor embutibilidad se obtiene con aquel material cargado lo más a la derecha posible y también lo más alto que se pueda. En la figura 49 las muestras se calentaron con una atmósfera de aire y en la 50 en argón, sin embargo la tendencia fue captada perfectamente al correlacionarla con las anteriores (de la 45 a la 48).

#### **IV.2 Análisis de la Información Obtenida**

Como se señala en el subcapítulo anterior hay una interrelación entre el índice Erichsen y los factores  $n$  y  $\epsilon$ , así se demuestra en las figuras 51 y 52, en donde se aprecia correlación de  $n$  y Erichsen tanto en atmósfera de argón como de aire, así mismo sucede algo igual en las figuras 53 y 54.

El ejemplo que se toma en este trabajo corresponde a la investigación de las transformaciones de fase para los aceros inoxidable 430, dichos tratamientos térmicos generan el surgimiento de la martencita en mayor proporción a medida que la temperatura es más alta; los libros de metalurgia<sup>(20)</sup> nos señalan que la martencita fragiliza al material y por lo

tanto a medida que tengamos más pierde su tenacidad para la embutición.

En base a lo anterior estas trasformaciones ocurridas nos demuestran que hay una correlación (no lineal) entre los factores que estamos analizando.

PROBETA	VALOR $r$
Control 2	1.5553
23Z	1.4323
23A	1.5077
23B	1.3083
14A	1.3554
14B	1.3107
8Z	1.1973
8A	1.3289
8B	1.2535

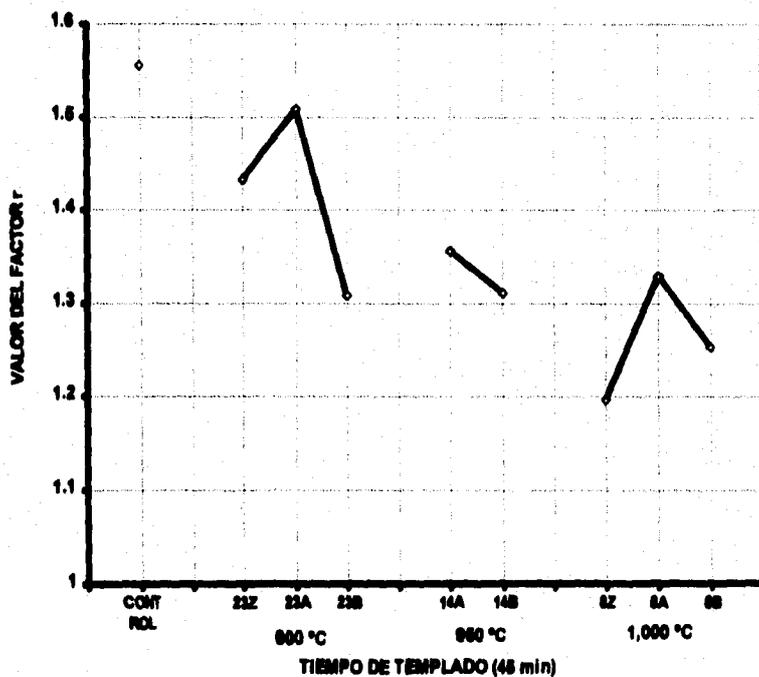


Figura 36. Tabla de valores del índice de anisotropía para los tres grupos considerados y gráfica representativa de la tendencia de su valor conforme a la temperatura de templado.

GRUPO	VALOR MEDIO DE $r$
CONTROL	1.5553
23	1.4104
14	1.333
8	1.2599

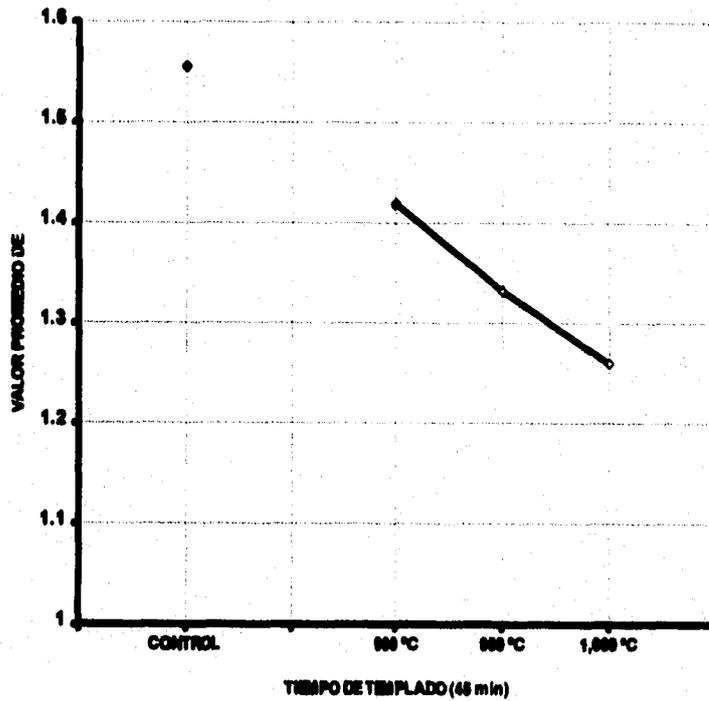


Figura 37. Tabla del valor medio del índice de anisotropía  $r$  y gráfica representativa de la tendencia en su valor de acuerdo a la temperatura.

PROBETA	VALOR n
CONTROL 2	0.1693
23Z	0.2031
23B	0.2997
14Z	0.1546
8Z	0.1165

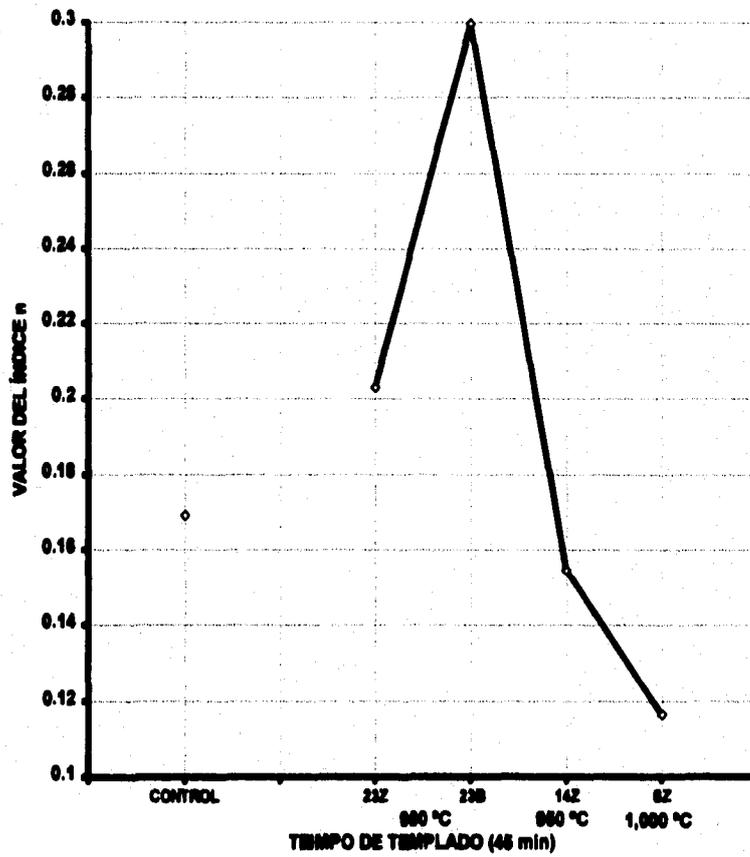


Figura 38. Tabla de valores del exponente de endurecimiento por trabajo  $n$  de las probetas ensayadas y gráfica representativa.

GRUPO	VALOR $\bar{n}$
CONTROL 2	0.1693
23	0.2514
14	0.1547
8	0.1165

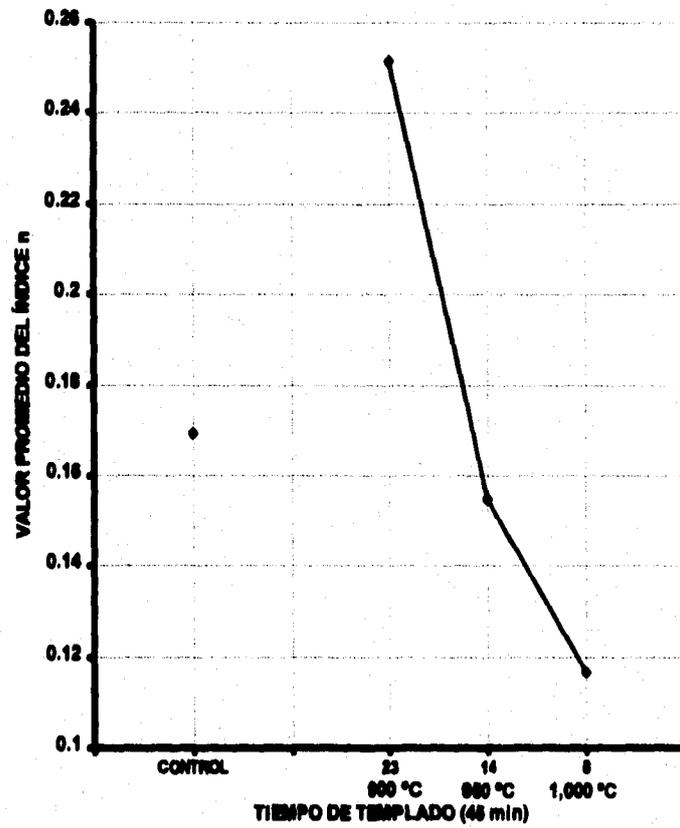


Figura 39. Tabla de valores promedio del índice  $\bar{n}$  y gráfica de los mismo en la cual se aprecia una clara tendencia descendente de su valor.

TIEMPO	VALOR n
5	0.2839
10	0.2987
15	0.3517
20	0.2856
25	0.3289
30	0.20028
35	0.2332
40	0.2309
45	0.2247

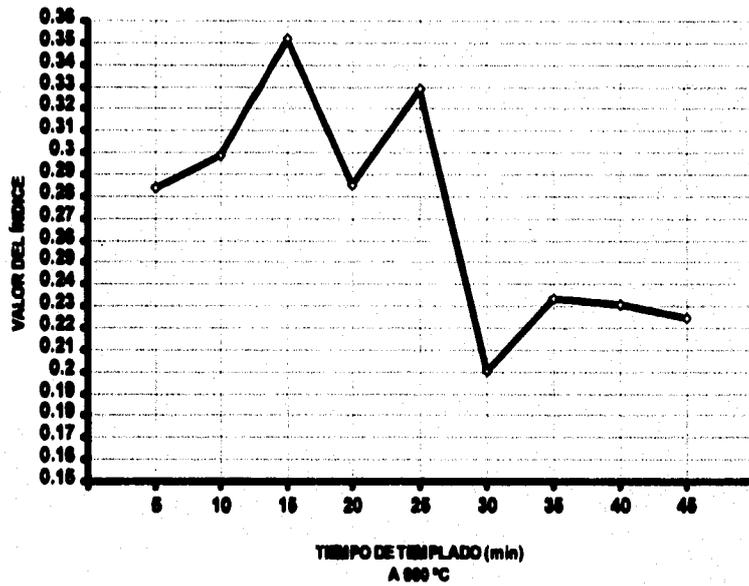


Figura 40. Tabla de valores del índice n para la familia de probetas tratadas a 900 °C y con tiempos desde 5 hasta 45 minutos.

**PROBETAS CALENTADAS EN ATMÓSFERA DE ARGÓN  
Y TEMPLADAS EN AGUA.**

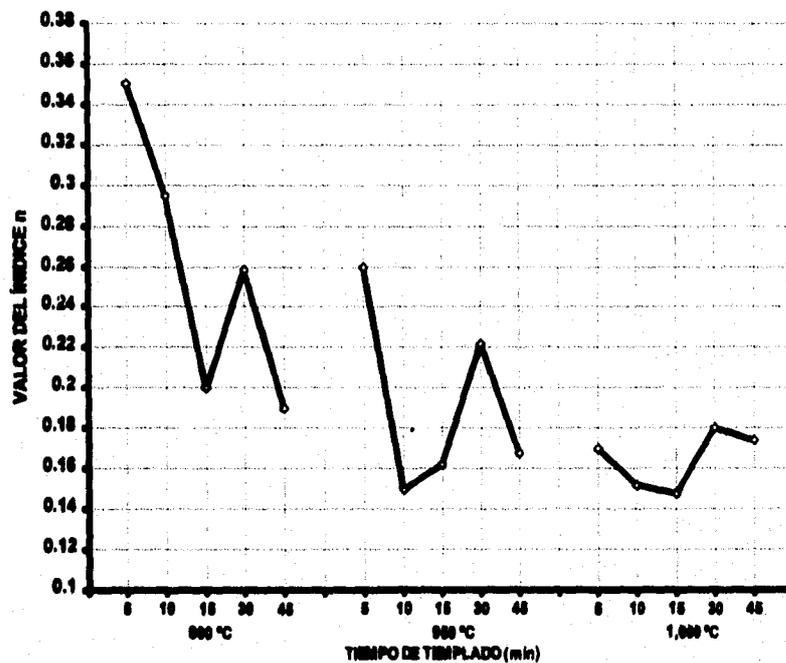


Figura 41. Gráfica de valores del índice n para las tres familias de probetas ensayadas con diferentes tiempos de templeado en atmósfera de argón.

**PROBETAS CALENTADAS EN ATMÓSFERA DE AIRE  
Y TEMPLADAS EN AGUA.**

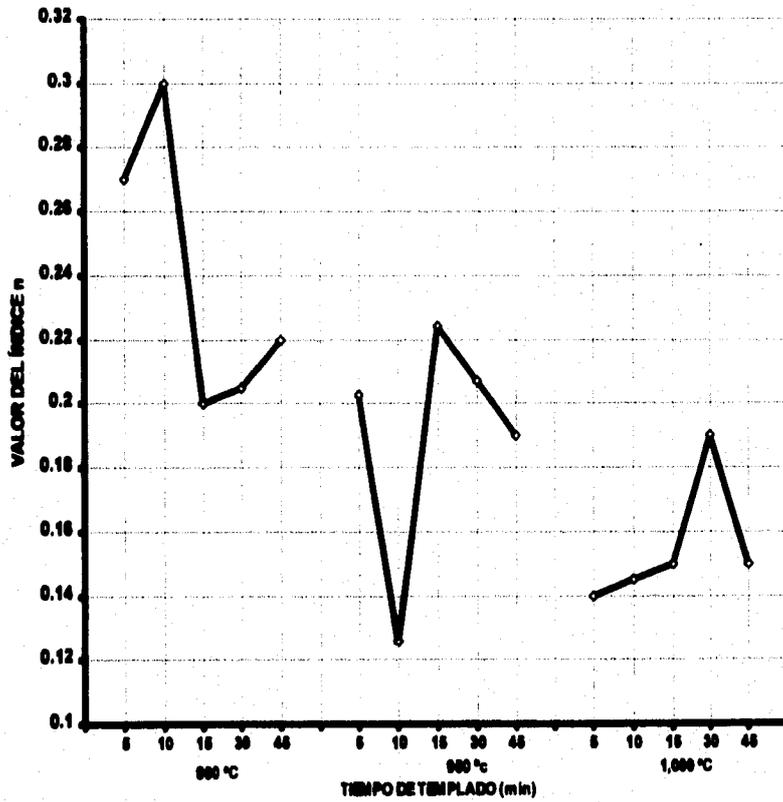


Figura 42. Gráfica de valores del índice n para las tres familias de probetas ensayadas con diferentes tiempos de templado en atmósfera de aire.

**COEFICIENTE DE ANISOTROPÍA DE MUESTRAS CALENTADAS  
EN ATMÓSFERA DE AIRE.**

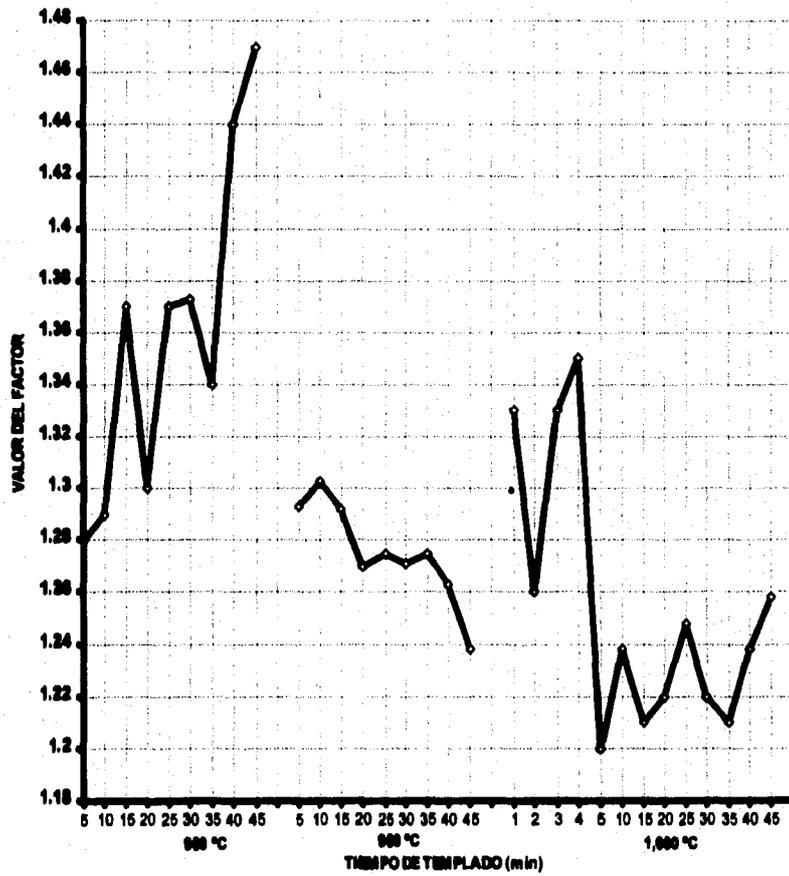


Figura 43. Gráfica del índice de anisotropía  $r$  en función del tiempo y la temperatura para las probetas calentadas en atmósfera de aire.

**COEFICIENTE DE ANISOTROPÍA DE MUESTRAS CALENTADAS  
EN ATMÓSFERA DE ARGÓN.**

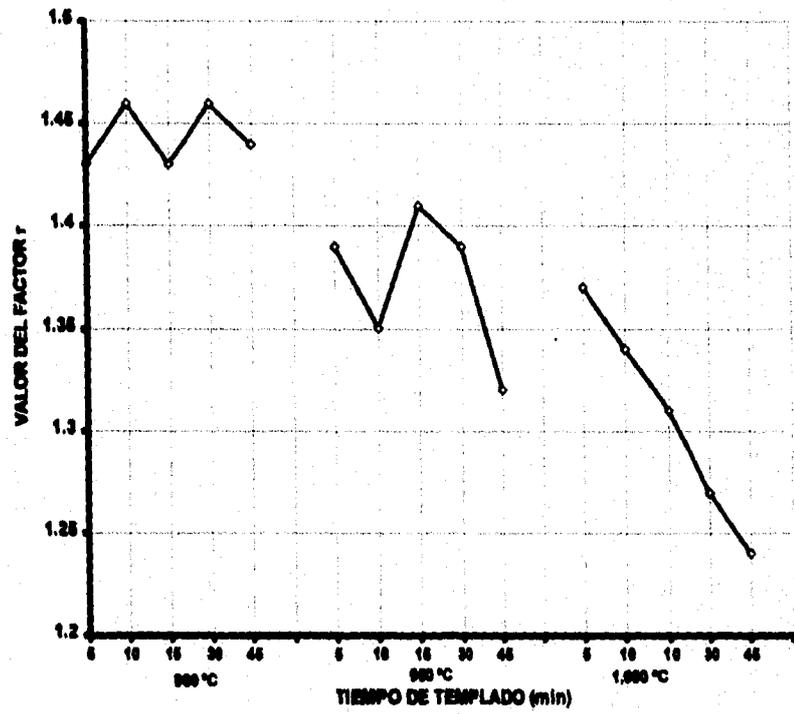


Figura 44. Gráfica del índice de esbutilidad  $r$  en función del tiempo y la temperatura para las probetas calentadas en atmósfera de argón.

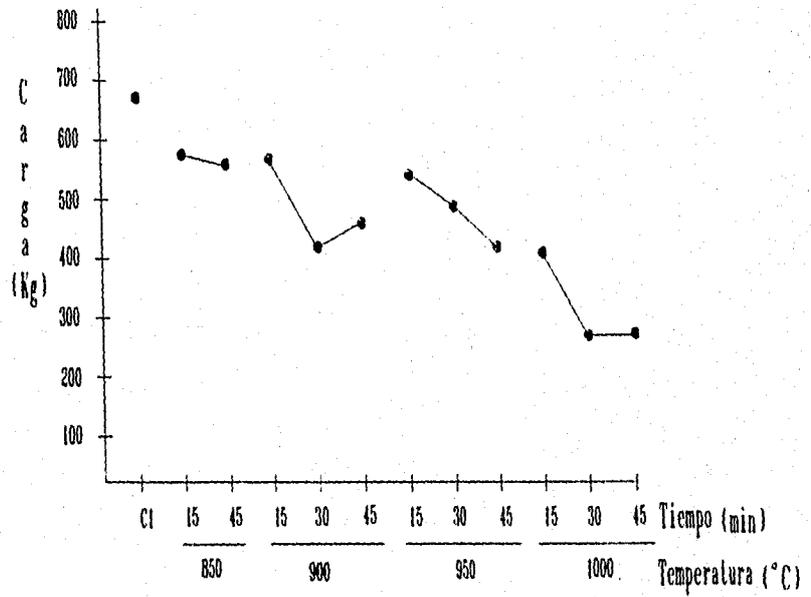


Figura 45. Gráfica que muestra la carga máxima hasta antes de la rotura para lámina de acero inoxidable calentada en una atmósfera de aire y templada en agua. Ensayada bajo criterio Erichsen.

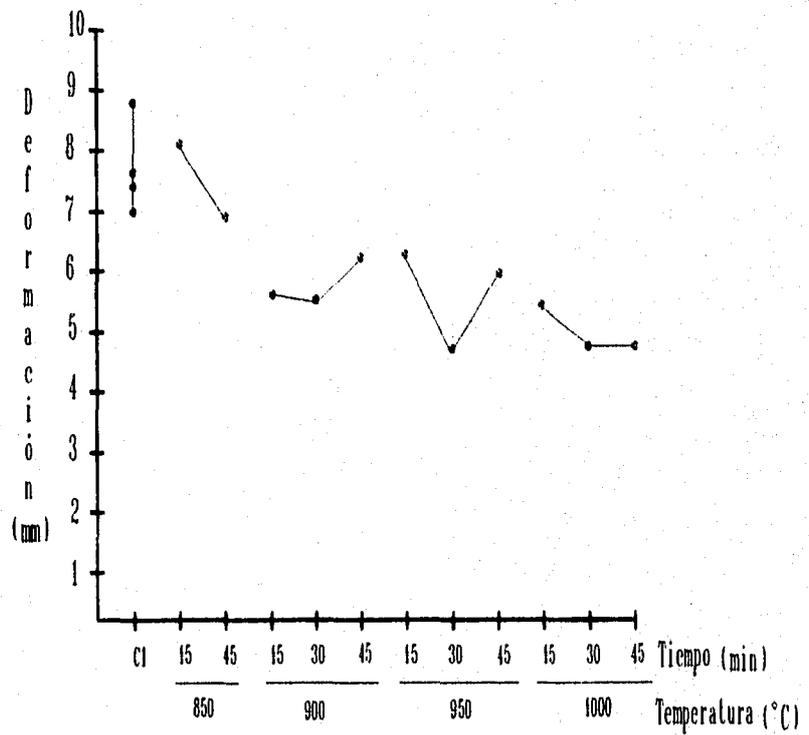


Figura 46. Gráfica donde se puede apreciar la deformación de lámina de acero inoxidable bajo criterio Erichsen, calentadas en atmósfera aire y templadas en agua.

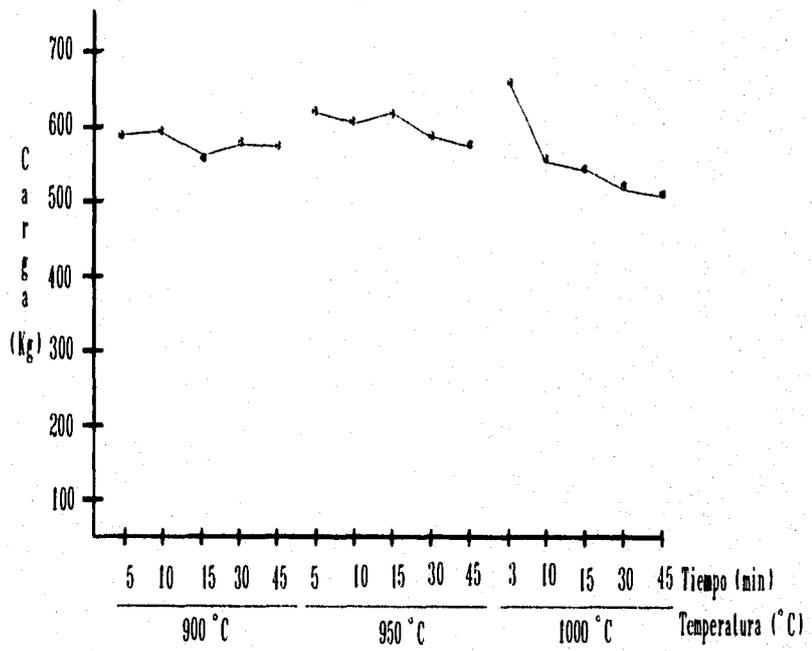


Figura 47. Gráfica de carga máxima hasta antes de la rotura de lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de argón y templada en agua. Ensayada bajo el criterio Erichsen.

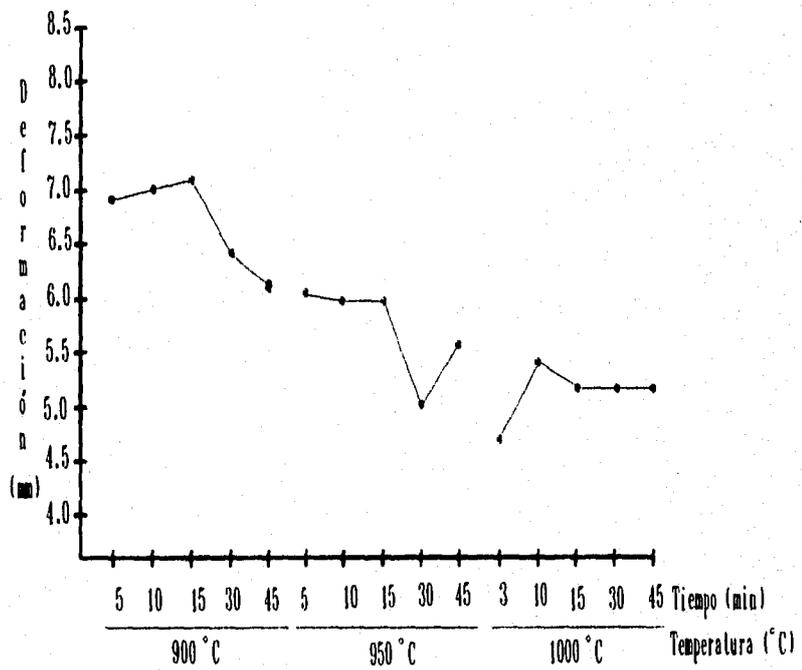


Figura 48. Gráfica donde se aprecia el valor de la deformación de lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de argón y templada en agua. Ensayadas bajo criterio Erichsen.

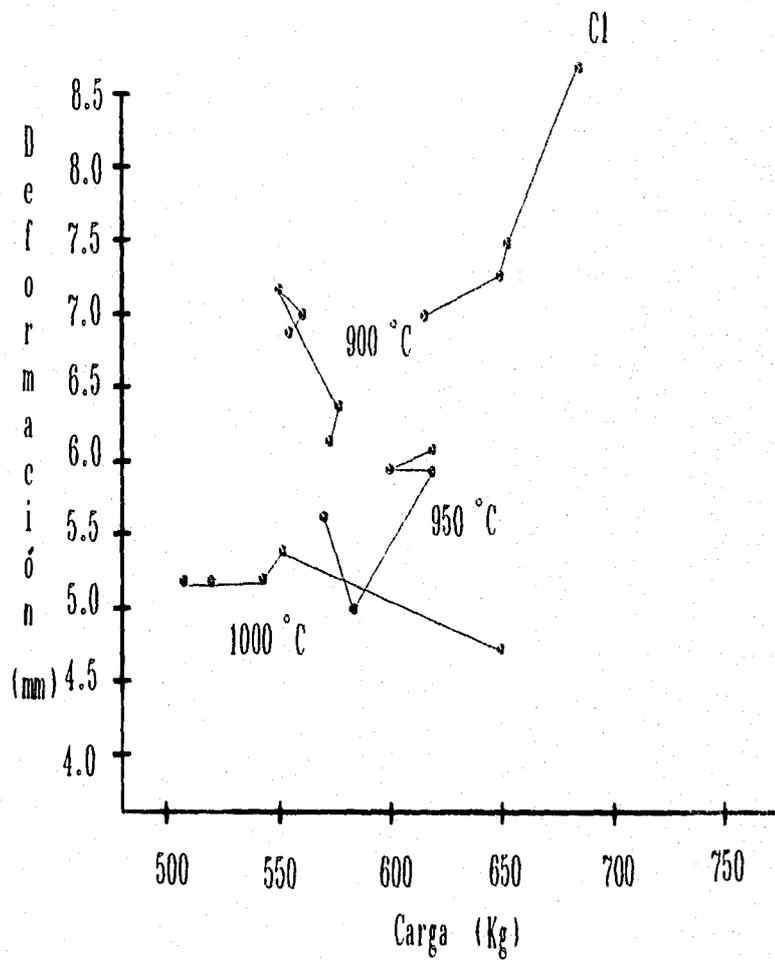


Figura 49. Gráfica de deformación vs carga de lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de argón y templada en aire. Ensayo Erichsen.

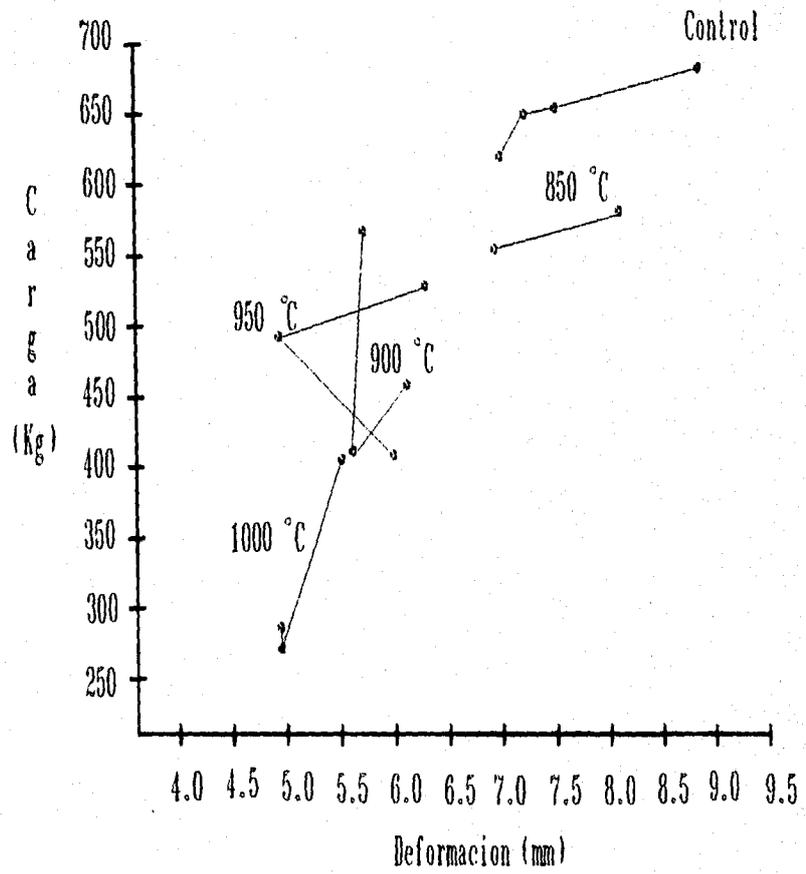


Figura 50. Gráfica de carga vs deformación para lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de aire y templada en agua. Ensayo Erichsen.

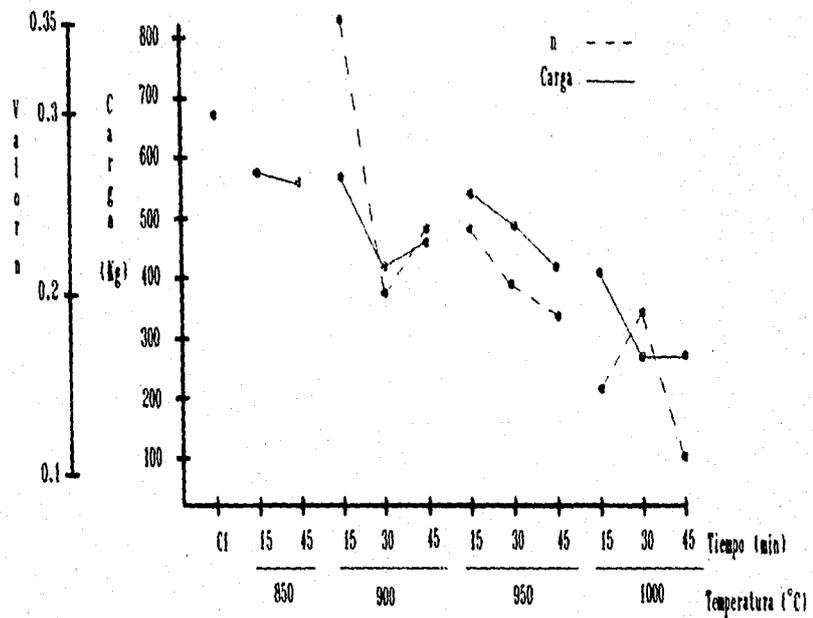


Figura 51. Gráfica donde se aprecian valores de carga y n para lámina calentada en atmósfera de aire y templada en agua, a diferentes temperaturas y tiempos. Se observa la tendencia hacia la derecha de ambos valores, conforme se aumenta el tiempo y la temperatura

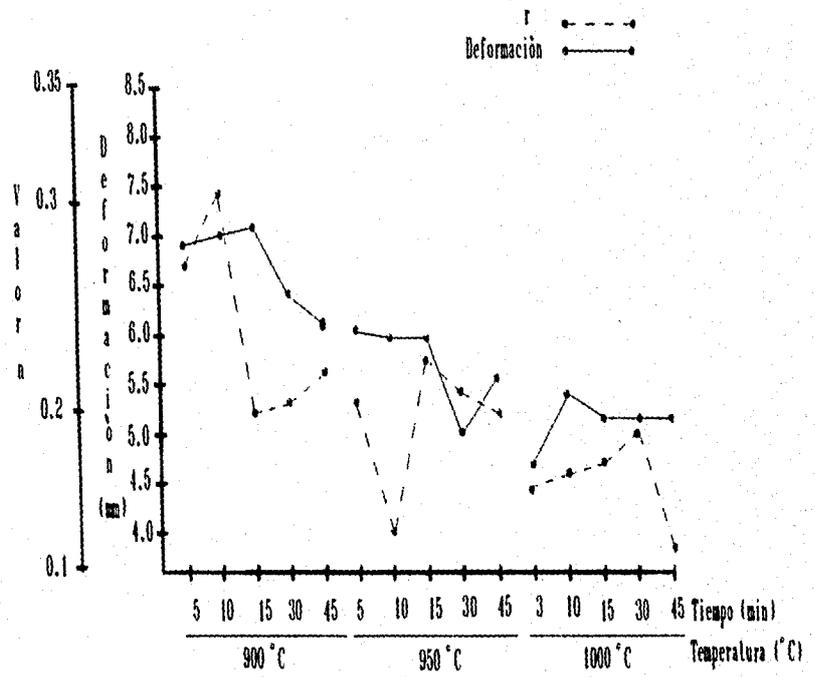


Figura 52. Gráfica donde se aprecian valores de deformación y n para lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de argón y templada en aire a diferentes tiempos y temperaturas. Se puede observar la tendencia decreciente conforme se aumenta la temperatura y el tiempo.

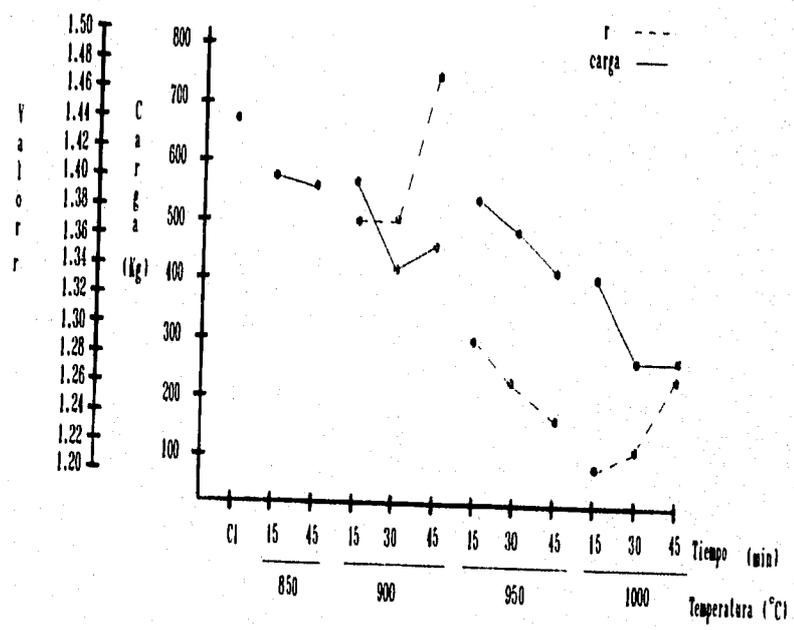


Figura 53. Gráfica donde se observan valores de carga y r para lámina de acero inoxidable calentada en atmósfera de aire y templada en agua a diferentes temperaturas y tiempos.

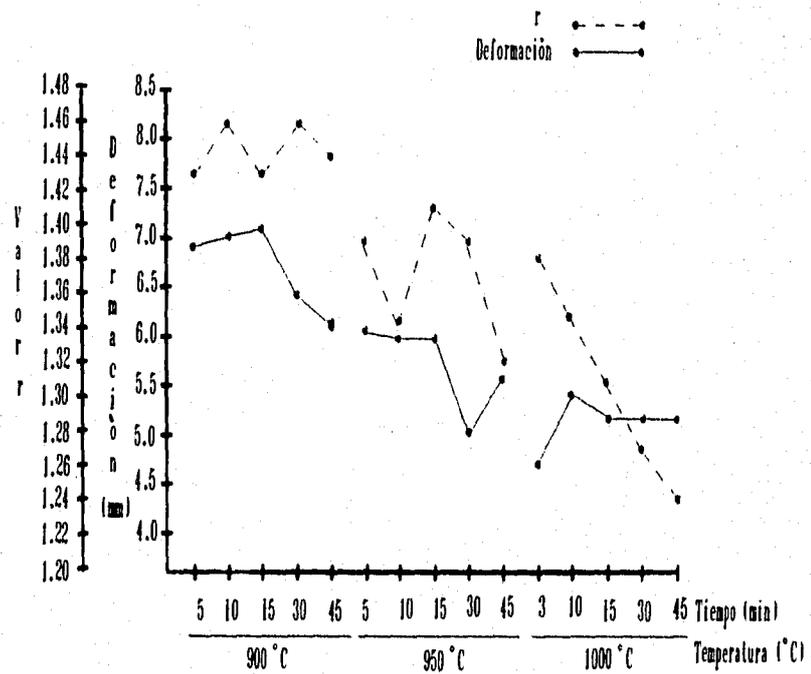


Figura 54. Gráfica en la que se muestran valores de deformación y r para lamina de acero inoxidable calentada en argón y templada en aire, a diferentes temperaturas y tiempos.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Primeramente es necesario resaltar la importancia de este trabajo el cual es útil para los futuros ingenieros mecánicos que trabajan el embutido de la chapa. Los resultados analizados nos permiten concluir que hay una relación directa entre los ensayos tradicionales de embutibilidad y los datos relacionados con los ensayos de tensión, en el trabajo nos referimos a estos datos como "n y r".

Al correlacionar los resultados con el marco teórico establecido se concluye también que se puede predecir la embutibilidad con la apreciación de las consecuencias de estiramiento (por ejemplo, la formación de orejas) cuando interpretamos de una manera correcta los datos n y r.

Al calcular el exponente n fue posible utilizar un paquete de computación (EXPENT), elaborado en forma conjunta por la E.N.E.P. Aragón y la Unidad de Servicio de Cómputo Académico de la Facultad de Ingeniería. Al realizar los cálculos fue posible ver la efectividad de éste, utilizando como marco de referencia el procedimiento que recomienda la norma ASTM E-646-91.

Para realizar este trabajo diseñamos y construimos un equipo Erichsen. Con este trabajo cumplimos dos objetivos: el equipo forma parte de la infraestructura para los ensayos mecánicos del Campus Aragón. La segunda meta que se logró con este trabajo, es la de demostrar un diseño que no se había tocado en otro trabajo de esta índole.

Este trabajo sirvió para apoyar en algunos puntos la investigación "Transformación de Aceros Inoxidables Ferríticos en Aceros Inoxidables Bifásicos". El proyecto que se menciona está entre los registrados en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y se está realizando en forma conjunta con un estudiante a nivel doctoral quien dirigió este trabajo.

Se Concluye que los datos que asocian  $n$  y  $r$  evitarán la exagerada formación de orejas, lo cual conlleva a un ahorro de material de embutición y por lo tanto a incrementar la productividad en este proceso. Por lo anterior recomendamos que se usen estos parámetros en lugar de los ensayos tradicionales.

Si se opta por hacer el cálculo del índice  $n$  según la norma, se debe en lo posible tomar el mayor número de cifras significativas.

Al utilizar el paquete EXPEND se recomienda, se tenga las unidades, ya sea en sistema métrico o inglés, porque el programa no hace correctamente la conversión de unidades.

Para futuras mejoras en la fabricación del arreglo punzón-matriz del aditamento, recomendamos se fabriquen ambos elementos del acero que se recomienda en la sección II.3.4.

Al realizar el análisis de alternativas de diseño y revisando las normas que rigen el ensayo, damos una serie de recomendaciones en la sección II.2.

En este trabajo se mencionaron algunos parámetros del proceso de embutición, así como recomendaciones al rededor del mismo, que pueden ser consultadas en la sección I.2.

El embutido de piezas debe ser cuidadoso desde el cálculo del diámetro inicial "D" (desarrollo) al final (pieza final), para no desgarrar las paredes por una reducción excesiva de ésta, o por otro lado que haya un exceso de material. Consultar sección I.2.5.

Para no provocar una rotura de la pieza durante el proceso, se recomienda no exceder la resistencia a la tensión del material. Consúltese sección I.2.1.

## BIBLIOGRAFIA.

- (1) Dieter, Mechanical Metallurgy, International Student Edition, U.S.A., pp. 269-272.
- (2) Robert E. Reed-Hill, Principios de Metalurgia Física, pp. 24-60.
- (3) H.P. Stüwe, Introducción a las Texturas de los Materiales Metálicos, Ed. Montecorvo, Madrid España, 1969, pp. 21-220.
- (4) Schmid, E., y Boas, W.: Kristallplastizität. Springer, Berlin, (1935).
- (5) W. A. Backofen, A. J. Shaler, y B. B. Hundy, Trans. ASM, vol. 46, pp. 665-680.
- (6) Norma ASTM E517-74.
- (7) Marc. A. Meyers, Mechanical Metallurgy: Principles and Application, Prentice-Hall Inc, U.S.A., 1984, pp.71-642.
- (8) R. S. Smallman, Modern Physical Metallurgy, Butterworth and Co., 1985, pp. 198-363.
- (9) R. Hill, Proc. Roy Soc. (London), A193 (1948), p.281.
- (10) W. A. Backofen, Deformation Processing, Addison-Wesley, 1973, p. 46.
- (11) J. G. Tweedale, Propiedades Mecánicas de los Metales, Ed. Tecnos, España, 1970, pp. 68-83.
- (12) P. Ludwick, Elemente der Technologischen Mechanick, Springer, Berlin, 1909, p. 32.
- (13) J. H. Hollomon, Trans AIME, 162 (1945), p. 268.
- (14) Norma ASTM E646-91.
- (15) Raymond A. Higgins, Ingeniería Metalúrgica, Ed. Continental, México, 1982, pp. 262-295.
- (16) Ulrich Scharer, Ingeniería de Manufactura, Ed. Continental, México, 1984, pp. 448-479.
- (17) B. Wassilief, Embutición, Ed. Hispano Europea, Barcelona España, 1966, pp. 105.

- (18) Norma ASTM E 643-84.
- (19) Zeferino Damián Noriega, Tecnología de Fabricación Metalmeccánica, 1ª Ed., AGT Editor, México, pp. 149-155.
- (20) Sydney H. Avner, Introducción a la Metalurgia Física, 2ª Ed., México, McGraw-Hill, pp. 384-419.
- (21) Onwers Manual Universal Testing Instrument, Instron Model 1125.
- (22) Norma ASTM E 8M.
- (23) P. Castro, P. Tricot, Study of the Isothermal Transformations (in 17% Cr stainless Steels. Part I Nature and Morphology of the Transformation Products Memories Scientifiques, 1962, pp 230.
- (24) J. Avila, J. L. Jimenez, P. L. Torres, M. A. Zapata, Recrystallization Behaviour of Cold Rolled Dual Phase Ferritic Stainless Steels and It's effecton Formability, Innovation Stainlees Steel, Florence Italy 11-14 October 1993.
- (25) D. Aladama A., XVII Simposio Nacional de Siderurgia: Transformación de Aceros Inoxidables Ferríticos en Aceros Inoxidables Bifásicos, ASSAB/UDDEHOLM, 1995, Sección 6.1.