

13  
2e.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

## "EFECTO DE LA REDUCCION EN FRIO EN LA FORMABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES 304"

T E S I S

Que para obtener el Título de:  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P r e s e n t a :  
HUGO ARMANDO MOSQUEDA ALTAMIRANO

MEXICO, D.F.

31084

1998

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.

**Jurado asignado:**

<b>Presidente</b>	Prof. Campillo Illanes Bernardo Fabián
<b>Vocal</b>	Prof. Atlatenco Tlapanco Eusebio Cándido
<b>Secretario</b>	Prof. Robert Nuñez Teresita
<b>1<sup>er</sup>. suplente</b>	Prof. Aramburo Pérez Gerardo
<b>2<sup>do</sup>. suplente</b>	Prof. Ramírez Vieyra José Guadalupe

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad  
de Química, U.N.A.M.  
Laboratorio de Pruebas Mecánicas de Mexinox, S.A.

Asesor del Tema:

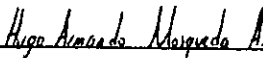


Mtra. en Ing. Teresita Robert Nuñez

Supervisor Técnico:

  
Dr. Javier Avila Mendoza

Sustentante:



Hugo Armando Mosqueda Aitamirano

## **PROLOGO.**

Durante una práctica profesional realizada en San Luis Potosí, específicamente en Mexinox, el doctor Javier Ávila, gerente de Investigación y Desarrollo me propuso la idea de realizar este trabajo. El propósito general es perfeccionar sus procesos, buscando mayores rendimientos y una mejor calidad de sus productos.

El cliente, quien es la mayor preocupación de la empresa, compra el material para una variedad de operaciones de conformado y por eso la necesidad de lograr un acero con las mejores propiedades de formabilidad, independientemente del uso posterior del material.

El objetivo era encontrar el grado de deformación ideal para la obtención de un mejor acero en el proceso de laminado y consecuentemente satisfacer completamente las necesidades de los clientes. El estudio de la dependencia de la formabilidad con el porcentaje de deformación para encontrar este parámetro es vital y así tener el mejor material tanto para procesos de embutibilidad y de estiramiento.

Pero la aparición de este factor mágico, y la manera en el cual afecta la deformación al material debe tener una explicación científica y de ahí la gran pregunta: ¿A que se debe la variación de las propiedades finales de la lámina, si en el proceso de recocido se elimina toda la energía consumida en el conformado?.

Al comprender lo interesante del tema y todo lo que se podría aprender en la realización de este me hizo aceptar, siempre había soñado que mi tesis no sería una más sino que debería ser muy especial y este tema satisfacía mi ego. En aquellos momentos no sabía yo la verdadera dimensión del reto, los problemas ha los que me habría de enfrentar, hablándose de defectos míos como fue mi pésima redacción que retrasó el aterrizaje del trabajo, mi ignorancia total sobre estos temas, pues aunque se tienen los conocimientos básicos si me costo trabajo asimilar la información que llegaba a mis manos.

Vale la pena comentar que la influencia de la orientación de conformado en las propiedades del material es un tema en el cual las industrias europeas y

norteamericanas realizan fuertes inversiones. La imposibilidad de no contar con los recursos económicos y con el equipo necesario ha originado que en México no se halla profundizado en el estudio de las causas de la dependencia de las propiedades del material con la deformación previa al recocido.

La respuesta a la variación de las propiedades después del recocido es la alteración previa en la orientación de la red cristalográfica, textura, y dependiendo de la cantidad de deformación, de la velocidad de calentamiento, de la temperatura de recocido y del enfriamiento después del tratamiento térmico, a este fenómeno se conoce como "textura de recristalización".

Y aunque la textura no es el tema central de esta tesis, su relevancia en las propiedades de formabilidad del material es fundamental, y por lo tanto hay que comprender esta influencia si se quiere llegar más lejos en esta investigación.

Actualmente sólo existen tres lugares en México en donde tienen un goniómetro de rugosidad que es básico para el estudio y medición de la textura, en el Instituto Politécnico Nacional, el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

En lo personal estoy orgulloso de lo realizado pues además satisfacer mi vanidad, ha ampliado mi panorama en la metalurgia y espero que todo esto le sirva a Mexinox y de ser posible cooperar para el éxito.

## SALUDOS Y AGRADECIMIENTOS

En un momento tan especial en mi vida, me llena de felicidad tener el deber de saludar a tantas personas que me han brindado su amistad y su apoyo a lo largo de mi vida, sin los cuales no sería yo.

Si por un descuido de mi parte me olvidó de muchos de ustedes, mis amigos, espero me comprendan porque el espacio disponible es muy reducido y mi memoria falla muy seguido.

Esta sección me será de utilidad para retribuir a aquellos a quién les debo todo lo que soy, mis logros presentes y futuros, en primer lugar quiero agradecer a mi familia que es lo más importante y me han soportado por más de 24 años, a mis maestros, quienes con cariño y paciencia, mucha paciencia, me donaron sus conocimientos, a mis compañeros y amigos por los muchos momentos felices y su apoyo en los momentos difíciles, en ustedes siempre encontré comprensión y es por eso les dedico esta tesis.



Mamá: Tu eres la persona más importante para mí, te debo la vida y todo lo logrado en ella, en especial el haber terminado mi carrera, tu cariño ha sido inmenso y además nos has dado todo lo posible y lo que estuvo a tu alcance, por ti soy todo lo que soy.

"Mamá:

MUCHAS GRACIAS, TE QUIERO MUCHO."

**Abelardo:** Sin tu apoyo no sé lo que hubiera sido de la familia, lucha por conseguir lo que quieres, recuerda el que no arriesga no gana, y CUENTA CONMIGO

**Andy:** Mi compañero de juegos te deseo lo mejor de la vida y nunca desfallezcas, se que lograras todo lo que te propongas pues eres difícil de doblegar. SUERTE Y BESOS A TU HIJA

**Papá:** Se de tu gran cariño, te agradezco ese espíritu que me inculcaste. Tu apoyo me hizo falta en muchos momentos, pero no era posible. Me inculcaste tu espíritu de lucha. SOY QUIEN ANHELASTE.

**Fernando y Carlos Hndz.:** Me enseñaron que para uno solo la vida es una lucha muy dura, y entre TRES ES MEJOR, gracias por su amistad y su comprensión.

**Carlos San Vicente:** De ti aprendí la filosofía de la vida, las razones de vivir, en tu amistad he encontrado el CONSEJO OPORTUNO, gracias por tus enseñanzas.

**Claudia** siempre conte contigo, a tu lado fueron excelentes momentos "GRACIAS MI GRAN AMIGA" llegarán mejores vientos ya lo veras.

**Diana, Atenea, Larisa, Luisa, Rodrigo, Carlos C.C.:** Luis, Carlos M., Ricardo y Enrique, Vivimos buenos y malos momentos pero el contar con un BASTIÓN para avanzar lo hace todo más fácil.

**Adriana, Nair, Maricela, Karina, Cristina** y a todos los amigos de la facultad en general, "UN GRAN SALUDO".

**Gerardo, Poblano, Armando, Chepe, Gonzaga, Carlos M, Sergio, Ismael, Oscar, etc.**  
METALURGIA ARRIBA.

**Curmen, Karina, Norma, Concha, Diana, Erika, Juan Manuel, Felipe, Rubén, Gabriel, Gustavo, Reyes, Pepe, Pablo, Lenin, Prof. Armando** y a todos mis compañeros en la mejor etapa de mi vida, "LA PREPA 7."

**Elsa, Gaby, Olga y Meche:** Gracias San Luis, fueron dos de los meses más maravillosos de mi vida, LAS RECORDARE SIEMPRE

**Yoko, Marta, Evelia, Mónica, Enrique, Carlos, Toño, Juan, David, Julio, Oscar, Ruy, 3° R** quién puede olvidar esos tres años de gran compañía, de alegrías, de tantos momentos felices.

**Pablo, Ismael Julio, David, Roberto Carlos, Paco,** mis primeros amigos les envío UN ABRAZO y un día el destino hará cruzar nuestros caminos.

**Maestra Arcelín, Mtra. Xochitl, Mtro. Amado** y a todos los profesores de mi "5 DE MAYO", me inculcaron el hambre del saber, alentaron mis anhelos y hicieron posible el viaje más maravilloso.

**José Luis Jiménez, Dr. Ávila y a todo el personal de Mexinex:** por su paciencia con mi persona, GRACIAS, ustedes son parte muy importante en este trabajo, espero no haberlos defraudado.

**Maestra Elvía,** agradezco su gran apoyo, y su intención de querer ayudarme y eso nunca lo olvidare.

**Maestro Monsuri,** por usted estoy aquí, por el cariño por la química que usted inculco en mí, le envié un saludo de todo corazón.

**Maestra Tere, José, M. Vázquez:** muchas gracias por el apoyo y la confianza "UN GRAN ABRAZO" de uno más de sus alumnos.

**Dr. Joan:** sin su apoyo no hubiera podido realizar todo lo que hice, lo felicito por el gran trabajo que realizo, y felicito aún más a Metalurgia por la suerte de tenerlo entre nosotros.



# ÍNDICE.

<i>Capítulo.</i>	<i>Pag.</i>
<b>1.- INTRODUCCIÓN.</b>	
1.1.- Proceso de Laminación	1
1.2.- Definición de Acero Inoxidable	
1.3.- ¿Qué es la Formabilidad?	6
1.4.- Coeficiente de Endurecimiento y Anisotropía Plástica	8
<b>2.- OBJETIVO</b>	11
<b>3.- CONFORMADO MECÁNICO</b>	
3.1.- Operaciones Básicas	12
3.2.- Parámetros Microestructurales	14
3.3.- Parámetros de Proceso	18
3.4.- Defectos	22
<b>4.- FORMABILIDAD</b>	
4.1.- Clasificación	24
4.2.- Inestabilidad	26
4.3.- Diagrama de Límite de Formabilidad, DLF	30
<b>5.- TEXTURA</b>	
5.1.- ¿Qué es la Textura?	35
5.2.- Textura - Estructura Cristalina	37
5.3.- Medición de Textura	38
5.4 - Textura -Propiedades Mecánicas	39

<i>Capítulo.</i>	<i>Pag.</i>
5.5.- Textura -Anisotropía	40
5.6.- Textura - Energía de Falla de Apilamiento	41
5.7.- Textura - Composición Química	42
<b>6.- ACERO AISI 304</b>	<b>43</b>
<b>7.- DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	
7.1.- Preparación de las muestras	47
7.2.- Pruebas tensiles	51
7.3.- Coeficiente de endurecimiento por deformación	51
7.4.- Anisotropía.	54
<b>8.- RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>55</b>
<b>9.- CONCLUSIONES.</b>	<b>83</b>
<b>10.- RECOMENDACIONES</b>	<b>84</b>
<b>11.- APÉNDICE</b>	
A.I.- Comportamiento Esfuerzo-Deformación.	85
AII.- Ensayos de Laboratorio	89
B.I.- Estructura Cristalina.	97
B.II.- Proyección Estereográfica	99
B.III.- Deformación	102
B.IV.- Energía de Falla de Apilamiento.	105
<b>12.-.- BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>108</b>

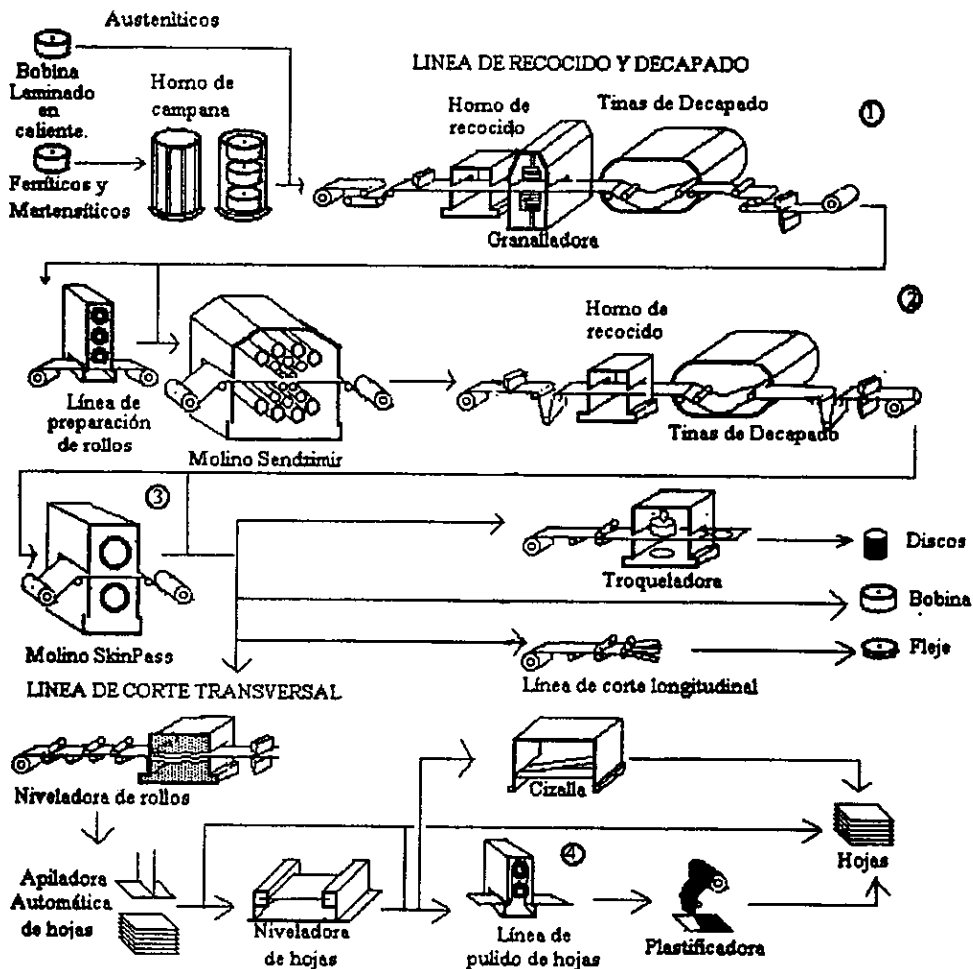


Fig. 1.- Esquema del Proceso de Laminación en Mexinox, S.A. de C.V. 21/08/1995.

Acabados: 1)No. 1 (Laminación); 2) 2D (Dull); 3) 2B (Bright); 4) P3 y

# 1.- INTRODUCCIÓN.

## 1.1.- Proceso de Laminación.

Mexinox, S.A. de C. V. localizada en San Luis Potosí, México, es la empresa líder en el campo de la laminación de acero inoxidable en América Latina y en sus instalaciones se realizó el trabajo experimental de esta tesis.

A continuación se hace una breve descripción del proceso llevado a cabo en esta industria y un esquema del proceso se encuentra en la figura 1

La materia prima utilizada para el proceso llega en forma de bobinas laminadas en caliente, provenientes de las acerías de diversos países como Estados Unidos, Francia, España, Alemania, Italia, etc. Al material de llegada se le efectúa un tratamiento previo de recocido antes de la laminación, el cual se efectúa de manera continua sobre la línea primaria (línea de recocido y decapado No. 2, L.R.D. 2 en Mexinox.) para los aceros austeníticos y en hornos tipo campana para los aceros ferríticos y martensíticos.

Una vez recocidos ambos aceros se decapan en la línea y pasan directamente a los molinos Sendzimir donde son deformados hasta el espesor necesario. Posteriormente se efectúa en la línea No. 1, el recocido y decapado de ambos tipos de aceros. Ver Fig. 1. Finalmente el material pasa a la sección de corte donde se le da la forma deseada por el cliente (Hojas, Círculos, Tiras, etc.).

La empresa desea rediseñar los métodos empleados en la actualidad en el conformado mecánico, desde el diseño de la herramienta hasta los parámetros de velocidad, carga, etc., del proceso. Los métodos actuales se basan en reglas empíricas y en la habilidad del mecánico. Se trata de encontrar el comportamiento del material para posteriormente asociarlos a la simulación numérica de las operaciones de conformado (1).

Uno de los métodos existentes en la simulación de un proceso consiste en analizar cada uno de los componentes independientes del sistema:

- 1.- Cálculos de la deformación plástica y de la carga necesaria para efectuarla.
- 2.- Propiedades del material antes y después de la deformación.
- 3.- Herramental.
- 4.- Tribología de la zona de contacto material - herramienta.
- 5.- Equipo.
- 6.- Automatización.

Es de hacer notar la falta de información sobre las propiedades de formabilidad de los aceros inoxidable, pues las industrias guardan celosamente estos resultados, además de tener un costo muy elevado. En la actualidad se utilizan parámetros de formabilidad de hojas de acero de medio y bajo carbón en la elaboración de piezas de acero inoxidable, con un gran desacierto por la extraordinaria diferencia existente en composición química, propiedades, estructura, etc.

## 1.2.- Definición De Acero Inoxidable.

El material de trabajo es el acero inoxidable austenítico AISI 304, el de mayor demanda en el mercado y con una variedad muy grande de usos.

Se desean obtener las mejores propiedades del 304 y por eso la necesidad de estudiar el comportamiento de su formabilidad después del recocido con diferentes grados de trabajado en frío y conocer bien la influencia de esta variable a conciencia.

Cuando se habla de acero inoxidable se hace referencia a una gama de diferentes aceros, cuya virtud principal es su alta resistencia a la corrosión, por su gran habilidad de pasivación y de formar una capa de óxido de cromo muy estable, con lo cual se disminuye considerablemente la corrosión del material (2).

Para ser considerado como inoxidable el acero debe tener un mínimo de 11 % de cromo. Estos aceros presentan una gran variedad de diferentes propiedades mecánicas y metalúrgicas, y se identifican de acuerdo a su composición química.

### **CLASIFICACIÓN**

La Sociedad de Ingenieros Automotrices, SAE, y la American Iron and Steel Institute, AISI, dan una nomenclatura especial a los inoxidables en sistemas numéricos de tres cifras, la primera cifra nos indican el grupo al que pertenecen, y las dos segundas de sus aleantes más significativos (2), ver tabla 1.

**Tabla 1.- Clasificación de los aceros inoxidables de acuerdo a la SAE. (2).**

DESIGNACIÓN SAE	GRUPO
2XX	Cromo - Níquel - Manganeso; Austenítico.
3XX	Cromo - Níquel; Austenítico.
4XX	Cromo, Ferrítico, Magnético.
5XX	Bajo en Cromo, Resistente a Altas Temperaturas.

Para poder establecer un panorama adecuado y claro de las características de los aceros inoxidable es necesario ubicarlos en tres grandes grupos: ferríticos, austeníticos y martensíticos.(2).

◊ El acero ferrítico tiene un alto contenido en cromo el cual proporciona al material su resistencia a la corrosión. Como es de suponerse, su microestructura esta formada principalmente de ferrita.

◊ El acero austenítico contiene níquel además de cromo, su alta resistencia a la corrosión es debida a la presencia de los óxidos correspondientes. El níquel es un elemento estabilizador de la fase austenítica, lo cual origina que este acero presente a cualquier temperatura únicamente austenita.

◊ El acero martensítico es aquel que forma fácilmente martensita por tratamiento térmico o por trabajado mecánico.

Además de los anteriores, existen otros grupos de aceros inoxidable entre los que podemos citar los aceros dúplex (Ferrítico - Austenítico) y superferríticos entre algunos.

Durante la selección de un acero inoxidable así como de todo material para un proceso específico se necesita de un conocimiento previo de los siguientes parámetros o requerimientos, (2):

- |  |  |
|--|--|
| a) Propiedades mecánicas.                              | g) Niveles críticos de deformación.              |
| b) Endurecimiento por Deformación y por Precipitación. | h) Resistencia al ondulado.                      |
| c) Soldabilidad.                                       | i) Resistencia a la posible distorsión de Forma. |
| d) Apariencia final.                                   | j) Resistencia a la Corrosión y a la Oxidación.  |
| e) Resistencia a la Fractura.                          | k) Tribología del sistema.                       |
| f) Habilidad de distribuir los esfuerzos.              |  |

Por ejemplo, muchos componentes que requieren una resistencia a la corrosión moderada y en los cuales la apariencia no es tan importante se fabrican de acero inoxidable ferrítico de bajo contenido de carbono, por su excelente combinación en propiedades de formabilidad y costos.

A medida que se requieren propiedades más específicas el contenido de cromo debe ser mayor lo cual aumenta considerablemente los costos.

Las características mecánicas de cada categoría son las siguientes (2):

◊ Ferríticos (AISI 405, 409, 430, 446, etc.). Presentan características muy similares a los aceros de bajo carbono con un ligero aumento en la resistencia a la tracción y una disminución en la ductilidad.

◊ Martensíticos (AISI 403, 410, 420, 431, 440, etc.). Sus características son comparables a la de los aceros microaleados y los aceros al alto carbono, su ductilidad es casi nula y tienen una gran resistencia a la fluencia.

◊ Austeníticos (serie AISI 200 y 300). Presentan características de un gran endurecimiento por deformación, no presentan similitud alguna con otros aceros. En este grupo se encuentra nuestro material de estudio el AISI 304.

◊ Especiales, en esta categoría se encuentran aceros con endurecimiento por precipitación, formadores de carburos, etc. tampoco se ha encontrado semejanza alguna con un tipo de acero al carbón.



### 1.3.- ¿Qué es la Formabilidad?

La formabilidad es un concepto tan difícil de definir debido a que se refiere al comportamiento del material en un sinnúmero de procesos diferentes de conformado.

La factibilidad de deformar plásticamente un material se conoce como formabilidad (3), que en particular se refiere al conformado de hojas, a la transformación de tochos se le suele llamar trabajabilidad "workability".

La evaluación de la formabilidad de un metal involucra mediciones de esfuerzo, ductilidad y la cantidad de deformación requerida para causar la fractura. Mishra (8) define la formabilidad como la capacidad de un material a deformarse debido a la aplicación de una carga y Mielnick (35) dice que la formabilidad es la capacidad de un material de resistir las estricciones y/o la fractura durante la deformación.

Los rangos factibles de deformación de un material se conocen como límites de formabilidad, su descripción es más sencilla al ser parámetros tangibles. Se indican en curvas de flujo y como condiciones críticas de formabilidad (resistencia al corte, al ondulado, límite de embutibilidad (L.D.R.), límite de altura del domo (L.D.H.), etc.) (3).

#### ***Límites de Formabilidad:***

Algunos límites de formabilidad son (3):

Límite de embutibilidad "Limiting drawing ratio, LDR" y el límite de altura del domo "LDH", el límite de fractura  $\epsilon_f$ .

La obtención de estos valores se realiza por medio de los ensayos de Copa Swift y el Punzón hemisférico respectivamente.

El LDR se determina por medio de la formación de copas de fondo plano con esferas de diámetros variables. El límite de embutibilidad es igual a:

$$\text{LDR} = D/d, \quad \text{y} \quad \% = 100(D-d)/D.$$

siendo D el diámetro de la lámina y d el diámetro del punzón.

El límite de altura del domo se calcula como  $h = (D^2 - d^2)/4d$ , por medio de una prueba con un punzón hemisférico, Ver Anexo AII.

El límite de fractura,  $\epsilon_f$ , es la deformación máxima antes del surgimiento de una estricción localizada y como consecuencia del agrietamiento del material.

Otros parámetros importantes son la resistencia a los esfuerzos cortantes al plano y a los esfuerzos compresivos, los cuales es común representarlos en un diagrama de formabilidad "DFL".

Los parámetros y propiedades del material y del proceso se agrupan en función de su influencia en las diferentes operaciones de conformado. En la tabla 2 se proporciona una clasificación de las propiedades que caracterizan a un material y su dependencia con la formabilidad (4).

**Tabla 2.- Propiedades de formabilidad y metalúrgicas de un material. (4).**

PARÁMETROS METALÚRGICAS.	PARÁMETROS QUE MIDEN LA FORMABILIDAD.	PARÁMETROS INDEPENDIENTES A LA FORMABILIDAD.
<ul style="list-style-type: none"> <li>◊ Estructura cristalina.</li> <li>-Microestructura (Fases, Impurezas, Precipitados y Tamaño de grano).</li> <li>-Textura (Orientación Preferencial).</li> <li>◊ Composición química.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◊ Comportamiento <math>\sigma</math> vs. <math>\epsilon</math>:</li> <li>-n, m, Resistencia a la Tracción y a la Fluencia.</li> <li>◊ Anisotropía plástica: <math>\bar{r}</math>, <math>\Delta r</math>.</li> <li>◊ Límites de formabilidad: "LDR", "LDH", Compresibilidad, <math>\epsilon_f</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◊ Dureza</li> <li>- Microdureza: Vickers.</li> <li>- Macrodureza: Brinell, Rockwell.</li> <li>◊ Energía de impacto.</li> <li>◊ Resistencia a la corrosión.</li> <li>◊ Constante de concentración de esfuerzos (K<sub>Ic</sub>).</li> </ul>

## 1.4.- Coeficiente de Endurecimiento y Anisotropía Plástica.

### 1.4.1.- Coeficiente de endurecimiento.

Se han propuesto diferentes ecuaciones para definir la variación del esfuerzo en función de la deformación.

Ludwik propuso la siguiente ecuación

$$\sigma = \sigma_0 + Ae^n \quad (11).$$

donde  $\sigma_0$  es la tensión de fluencia,  $A$  es una constante y  $n$  es el coeficiente de endurecimiento.

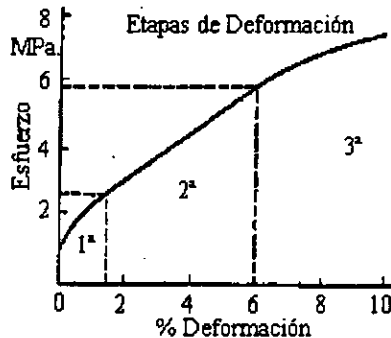


Fig. 2.- 3 etapas de la deformación plástica en Aluminio Puro, (12).

Joaul dividió la curva esfuerzo-deformación en tres etapas, fig. 2. La primera, hasta 1-2% de deformación, en la que se sigue una relación parabólica (12).

$$\sigma = \sigma_0 + Ae^n \quad \text{hasta } \epsilon = \epsilon_1$$

Esta etapa es insensible a la temperatura en el rango de 77-293 °C y el coeficiente de endurecimiento es sensible al tamaño de grano.

La segunda etapa es un relación lineal donde

$$\sigma = \sigma_0' + P\epsilon \quad \text{entre } \epsilon_1 \text{ y } \epsilon_2.$$

Y finalmente otra etapa que se caracteriza por una disminución gradual del endurecimiento, con un comportamiento parabólico, su rango es de  $\epsilon_2$  hasta la carga máxima.

$$\sigma = \sigma_0'' + B\epsilon^m.$$

Hollomon propone una ecuación más simple (11).

$$\sigma = K\epsilon^n$$

donde: K es el coeficiente de resistencia y n es el coeficiente de endurecimiento por deformación.

### 1.4.2.- Anisotropía

Cuando nos referimos a anisotropía plástica hablamos de la diferencia entre la resistencia del plano y normal a la hoja. La Norma ASTM E517 (13), la define como la razón existente entre la deformación en el plano de la hoja (ancho) y la normal a esta (espesor).

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad \text{donde} \quad \epsilon_w = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right) \quad \text{y} \quad \epsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right).$$

Donde:  $w_0$  es el ancho inicial, w el ancho final,  $t_0$  el espesor inicial y t el espesor final.

Como existe una variación del valor de la anisotropía en los diferentes sentidos de una lámina deformada, es preferible caracterizarla por una anisotropía promedio de los valores obtenidos en las muestras cortadas en las direcciones diferentes respecto a la dirección de laminación.

El valor de  $\bar{r}$  se determina por:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

siendo:  $r_0$  el valor de r de probetas cortadas en la dirección de laminación,  $r_{45}$  a  $45^\circ$  de esta dirección y  $r_{90}$  perpendicular a la misma.

Significando:

$\bar{r} = 1$ ; material isotrópico.

$\bar{r} < 1$ ; material con resistencia promedio del plano mayor que la resistencia promedio en el espesor, por lo que el material tendera a adelgazarse y a fallar.

$\bar{r} > 1$ ; material con resistencia promedio mayor en el espesor que en el plano, por lo que este material preferirá la deformación en el plano al adelgazamiento.

El factor  $\Delta r$ , conocido como "anisotropía planar o plástica", es un indicador de la homogeneidad de la deformación, ya que establece la diferencia existente entre la anisotropía en cada dirección. En algunos ocasiones, en la industria, el éxito o fracaso de un proceso dependen de la posición de la hoja. El calculo de  $\Delta r$  se realiza así.

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2}$$

El defecto en el proceso de conformado cuando  $\Delta r$  es positiva, es la presencia de orejas en la dirección de laminación ( $0^\circ$ ) y a  $90^\circ$ .

Cuando  $\Delta r$  es negativa las orejas tienden a presentarse a  $45^\circ$  de la dirección de laminación.

Y un  $\Delta r$  igual a cero indica que no existe una dirección preferencial de deformación, por lo tanto no hay formación de orejas y se tiene una mayor zona de material útil.

En resumen la relación de deformación plástica "r" es el parámetro indicativo de la habilidad de una hoja de metal a resistir al adelgazamiento cuando está sujeto a fuerzas de compresión y/o tensión en el plano de la lámina.

La anisotropía es el indicador más utilizado en los procesos de embutición.

## 2.- OBJETIVOS.

Presentar una caracterización de las propiedades de formabilidad del acero inoxidable austenítico 304, para diferentes porcentajes de reducción en frío del material, a partir de ensayos tensiles típicos en especímenes planos: la formabilidad se caracteriza en términos de coeficientes de deformación total y planar, así como de parámetros de anisotropía volumétrica y planar y de endurecimiento por deformación.

Encontrar la influencia del porcentaje de reducción en frío del acero inoxidable AISI 304 en las propiedades de formabilidad y, colateralmente, en las propiedades mecánicas y determinar el porcentaje de reducción óptimo para alcanzar el máximo en estas propiedades.

Para eliminar las variables ajenas al grado de deformación que afectan la formabilidad, como son el rango de la composición química (proveedores), el historial térmico en el proceso de laminación en caliente (microestructuras, precipitados, formación de fases secundarias, etc.), tamaño de grano original, etc. se escogió una sola bobina de acero 304 del material de llegada a las instalaciones de Mexinox y se hizo un seguimiento en todas las etapas del proceso.

### 3.- CONFORMADO MECÁNICO.

#### 3.1.- Operaciones Básicas.

El término de conformado se refiere a un conjunto de procesos de manufactura para la realización de una pieza a partir de un tocho o una hoja inicial sin un cambio de composición o de masa (1).

Los procesos de conformado metálico tienen una serie de aplicaciones industriales de gran importancia como son:

- ◊ Componentes para automóviles y partes de maquinaria industrial.
- ◊ Herramientas: martillos, alicates, instrumental quirúrgico, tornillos, clavos, tuercas, etc.
- ◊ Contenedores, cajas metálicas, tarjas, etc.
- ◊ Elementos de construcción.
- ◊ Puertas y ventanas.

En la conformación de hojas metálicas se presentan cuatro fenómenos en mayor o menor proporción dependiendo del proceso (3). Estos tipos de deformación son el dobléz (bending), el estirado (stretching), el embutido (drawing) y el estampado (stamping).

◊ El dobléz consiste en darle a la hoja un cierto radio de curvatura. Si el radio es del orden de la longitud equivalente a la mitad del espesor de la lamina, o más pequeño se corre el riesgo de formar hendiduras, para estos ángulos agudos no se recomienda la lubricación por provocar una deformación más localizada.

◊ Embutido.- La operación más representativa de este tipo de deformación es la fabricación de latas de aluminio. Para un buen proceso es necesario que el material se deforme en el sentido del plano sin provocar una disminución crítica del espesor, esta capacidad se conoce como embutibilidad.

◇ El estirado se realiza aplicando esfuerzos tensiles con un aumento considerable del área paralela al plano de la hoja. A la capacidad de un material para soportar esta operación se le conoce como estirabilidad.

◇ El estampado es una compresión entre 2 dados como sucede en la fabricación de monedas. La ventaja de este proceso es la reducción de la distorsión de forma, pero el material puede fracturarse si se localiza demasiado la deformación.



## 3.2- Parámetros Microestructurales.

### 3.2.1.- Tamaño de Grano.

Si un material recristalizado tiene un tamaño de grano pequeño y por consecuencia una cantidad mayor de bordes de grano, tiene una dureza mayor a si tuviera un tamaño más grande con las mismas condiciones metalúrgicas, figuras 3 y 4.

Hall Petch (5) encontro la relación entre el esfuerzo de fluencia y el tamaño de grano.

$$\sigma = \sigma_f + K_y d^{-n}$$

donde:

$\sigma_f$  = Constante del esfuerzo de fricción en la red,  $K_y$  = Constante asociada con la propagación de la deformación a través de los bordes,  $d$  = Diámetro del grano,  $n$  = Constante numérica

Los bordes de grano son zonas de concentración de esfuerzos (6) por tener una alta densidad de dislocaciones y por lo tanto una mayor acumulación de energía. Debido a esto el deslizamiento es diferente en el centro del grano a los bordes del mismo, pues las dislocaciones actúan como ancla (7).

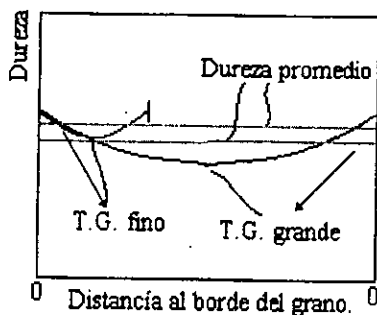


Fig. 3.- Dureza en dos granos con diferente tamaño, observar la diferencia entre la dureza del borde al centro, (7).

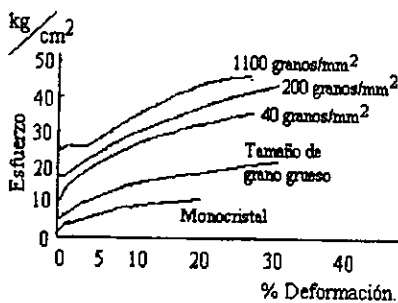


Fig. 4.- Comparación de una curva  $\sigma$  vs  $\epsilon$  a diferentes tamaños de grano (7).

Si el grano es muy grande el material se suaviza demasiado lo cual origina un defecto conocido como "cascara de naranja" por la apariencia tan arrugada del mismo, regularmente este fenomeno aparece a un tamaño ASTM 6 (8).

Cuando un metal se deforma aproximadamente entre 1 y 5% se observan planos atómicos que emergen a la superficie del metal (6), dependiendo de los sistemas de deslizamiento inducidos, ver Apéndice BIII.

En la figura 5 se puede observar como varía la anisotropía promedio en función del tamaño de grano.

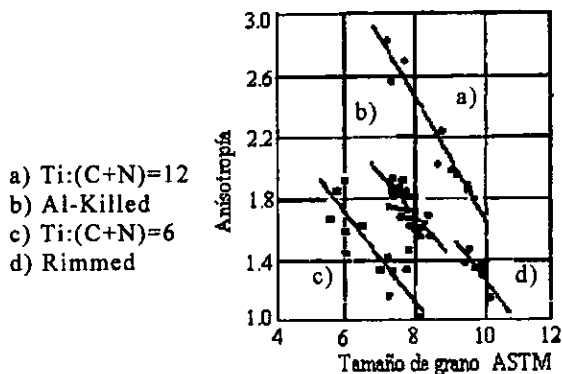


Fig. 5.- Relación existente entre el T.G. y el valor de la anisotropía promedio para diferentes materiales con 70 % de deformación, (8).

### 3.2.2.- Distribución de los Esfuerzos.

Durante un proceso de conformado se requiere una distribución homogénea de las cargas en todo el material, una distribución heterogénea provoca adelgazamientos críticos en algunas zonas del material (10).

Mientras menor es el valor del coeficiente de endurecimiento,  $n$ , mayores son las deformaciones localizadas presentes.

Los aceros austeníticos tienen un alto endurecimiento incrementando así la resistencia de las zonas deformadas y la deformación se transfiere a zonas adyacentes con menor resistencia, en la figura 6, se observa la distribución de esfuerzos de un acero al carbono y un acero inoxidable 304, (10).

Si se compara la fractura de estos aceros en un proceso de embutido profundo se observa una fractura más homogénea en el acero austenítico, en el punto geométrico donde se concentran los esfuerzos y no en la pared como en los ferríticos. Fig. 7. (3).

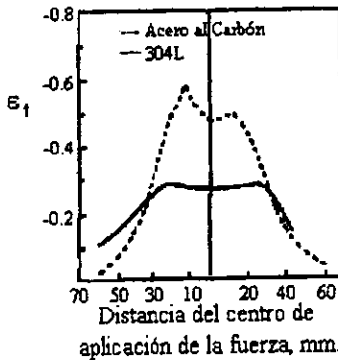
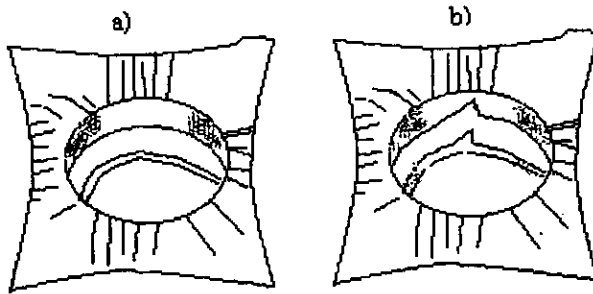


Fig. 6.- Se observa la distribución de esfuerzos entre un acero al carbón y un acero inoxidable., en función al centro del área de aplicación de la carga (10).



### 3.2.3.- Composición química.

La concentración de diferentes aleantes provoca cambios notables en la formabilidad de un material, principalmente por alterar la energía de falla de apilamiento, y por lo tanto los sistemas de deslizamiento, y las propiedades mecánicas del material.

En la figura 8 se observa la variación de la anisotropía en un acero con 70% de deformación, dependiendo de la composición de los aleantes (9).

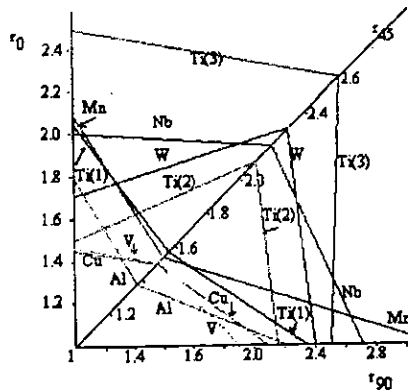


Fig. 8.- Efectos de elementos aleantes en el valor de la anisotropía de un acero al Carbono (9).

### 3.3.- Parámetros de Proceso

#### 3.3.1.- Temperatura.

Si un material deformado en frío se somete a un tratamiento térmico se origina la liberación de la energía acumulada, dando lugar a un crecimiento de grano y una disminución de la densidad de dislocaciones.

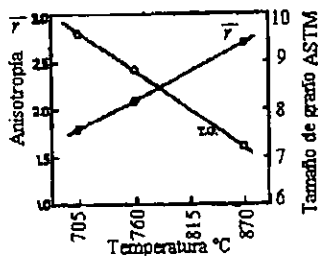


Fig. 9.- Efecto de la temperatura de recocido en la anisotropía y el tamaño de grano en un acero estabilizado con titanio. Ti / (C+N)=12, (17)

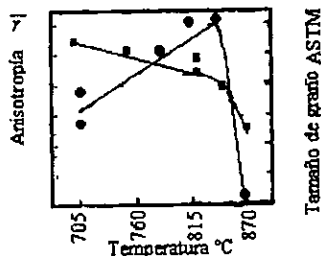


Fig. 10.- Dependencia de los valores de anisotropía y tamaño de grano con la temperatura de recocido en un acero Al-Killed laminado en frío al 70% de reducción, (17)

La temperatura influye al facilitar el deslizamiento de los planos atómicos al aumentar la energía de falla de apilamiento, ver B.IV, y provoca la variación de los planos preferenciales de deformación facilitando el movimiento de las dislocaciones, (17).

Si el material se deforma bajo condiciones de temperatura mayores a la mitad del valor de su temperatura de fusión en grados Kelvin, el material elimina las acumulaciones de energía durante el conformado con la subsecuente disminución del nivel de carga necesario y la desaparición casi completa del endurecimiento por deformación, "Conformado en caliente".

En las figuras 11 y 12 se observa como en un acero 304 disminuye sus propiedades al incrementarse la temperatura de trabajo (18).

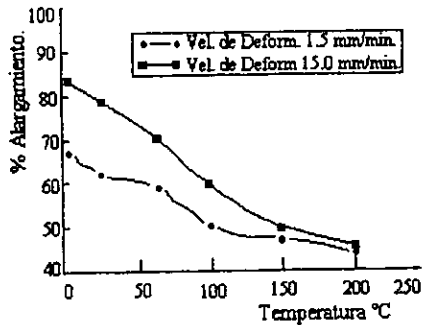


Fig. 11.- Efecto de la temperatura sobre el nivel de alargamiento del acero austenítico AISI 304, (18)

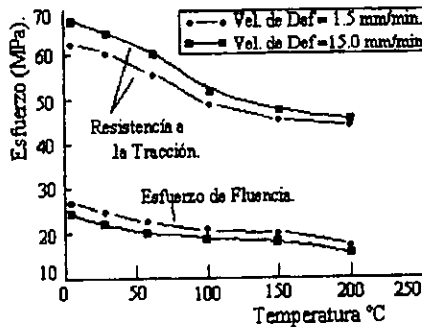


Fig. 12.- Dependencia del esfuerzo de fractura y el de fluencia con la temperatura para un acero AISI 304, (18)

### 3.3.2.- VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

La velocidad de deformación afecta de forma crucial al material pues de esta depende que tenga tiempo de acondicionarse a la carga aplicada o no, (19). Mientras mayor sea la velocidad menos oportunidad tienen las dislocaciones de acomodarse y la deformación es más homogénea, aunque el proceso requiere mayor carga para mover dichas dislocaciones y la ductilidad del material disminuye, ver figuras 11 y 12.

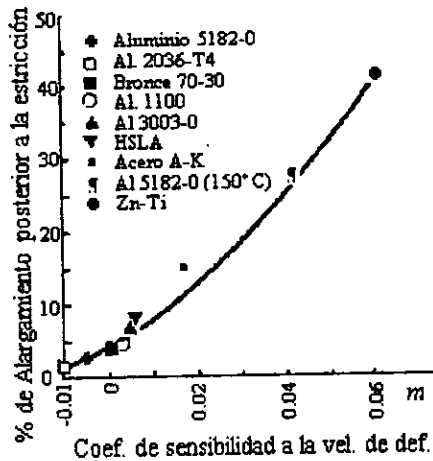


Fig. 13.- Dependencia de la elongación postestricción del coeficiente de sensibilidad.

Cuando el material se deforma a altas velocidades se activan los diferentes planos de deslizamiento sin importar las variaciones de resistencia entre ellos, debido al aumento de la carga utilizada en estos procesos.

El coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación es otro factor que influye en las propiedades del material al provocar una mayor elongación posterior a la aparición de la estricción a medida que es mucho mayor su valor, fig 13.

### 3.3.3.- PORCENTAJE DE DEFORMACIÓN

Durante la deformación en frío el material consume aproximadamente un 10% de la energía aplicada para su conformación acumulándola en la red y incrementando su energía interna, (19).

El acopio de energía provoca un aumento en la resistencia mecánica del material y por lo tanto una disminución de su ductilidad también la disminución de la conductividad eléctrica, fig. 14. Se presenta un alargamiento de los granos en la dirección principal de deformación y un reordenamiento de los mismos.

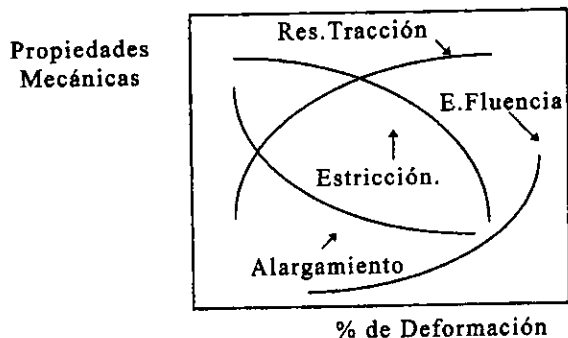


Fig. 14.- Variación esquemática de las propiedades mecánicas debido a la deformación, (19)

### 3.3.4.- Fricción.

La fricción es importante por limitar el movimiento de la lámina con respecto a la superficie del material, ocasionando un sinnúmero de problemas. Entre los problemas provocados por una fricción alta están un incremento en el nivel de esfuerzos, adherencia del material sobre los dados, incremento de temperatura, etc.

El control de la fricción se hace por medio de lubricantes, dependiendo del tiempo de contacto de la pieza y la herramienta, la relación de áreas superficial original y final, la velocidad relativa entre la pieza y el dado, el deslizamiento deseado entre las superficies metal - herramienta, etc. En el caso del acero inoxidable se recomienda el uso de dados de bronce y lubricantes para altos esfuerzos con un comportamiento newtoniano, (10).



### 3.4.- Defectos.

Entre los problemas que se presentan durante el conformado de los metales se encuentran: la fractura, la distorsión de la forma, las superficies indeseables, el ondulado, etc., que a continuación se explican brevemente (3):

◊ La fractura.- Cuando la fractura se debe a una sobredeformación mayor a la elongación del material, con la aparición de una fractura dúctil, y si es ocasionada por la superación del límite de resistencia a esfuerzos cortantes al plano se da la fractura por cizallamiento la cual no esta precedida de una deformación plástica significativa ni a la aparición de una estricción localizada.

◊ La distorsión de forma (springback) se presenta principalmente en las operaciones de doblez. Se produce debido a la distribución heterogénea de esfuerzos en la dirección radial, lo cual provoca la recuperación elástica del material al eliminarse las cargas y con esto su distorsión, depende completamente de las propiedades mecánicas del material, la geometría de la pieza y la relación de esfuerzos externos e internos.

La distorsión se aproxima a (16):

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left( \frac{R_i Y}{E t} \right)^3 - 3 \left( \frac{R_i Y}{E t} \right) + 1$$

donde:

$R_i$  = Radio de curvatura durante la deformación.

$R_f$  = Radio final, libre de carga.

$E$  = Modulo de Young.

$Y$  = Estado de esfuerzos.

$t$  = Espesor de la lámina.

◊ Cascara de naranja (orange peel) es una apariencia rugosa que presentan materiales con un grano muy grande, cuando son severamente deformados en frío.



Fig. 15.- Orejas en una pieza obtenida por embutido profundo (14).

◊ Arrugas (wrinkles) y torceduras (buckles). Se originan cuando el material se comprime provocando una disminución del perímetro como sucede con la lámina en un proceso de embutido y si el nivel de los esfuerzos es igual al nivel crítico del material a ese espesor, se forman pequeñas ondulaciones conocidas como torceduras, si estas son muy pronunciadas se les conoce como arrugas.

◊ La formación de orejas (earring) es un problema muy común en el embutido, se produce debido a una deformación no homogénea y porque hay zonas donde la pieza se deforma más que en otras originando, en la parte superior, una semejanza a orejas y un desperdicio de material al reducirse la zona útil.

## 4.-FORMABILIDAD

### 4.1.- CLASIFICACIÓN

Los parámetros de formabilidad se clasifican de acuerdo a su influencia en los procesos de conformado en estirabilidad y embutibilidad (8).

◊ La embutibilidad es la propiedad de presentar una resistencia mayor en la dirección normal a la hoja que en el plano de la misma. Esta diferencia de resistencias favorecerá la deformación en el plano de la hoja y no su adelgazamiento. Se relaciona directamente con la anisotropía planar y plástica, parámetros indicadores de esta diferencia en resistencias.

Si se define la embutibilidad de un acero inoxidable como el diámetro máximo de punzón que soporta en la prueba de LDR, se observa una mejor formabilidad en los aceros al carbón al soportar un mayor diámetro, pero si se toma la embutibilidad como la profundidad alcanzada para un mismo tamaño de punzón se observan mejores propiedades en el acero inoxidable.

◊ Estirabilidad. Es la capacidad de distribuir la acumulación de tensiones en todo el plano y presentar una deformación lo más homogénea posible, la cual se incrementa a medida como aumenta el coeficiente de endurecimiento por trabajado mecánico  $n$  y el coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación  $m$ . (18)

Al analizar la elongación de diferentes materiales se observa como la longitud de la elongación del material dependen del coeficiente de endurecimiento  $n$  antes de la aparición de una estricción localizada y del coeficiente de sensibilidad posterior a la aplicación de la carga máxima. En la Tabla 3 se proporciona una lista de materiales analizados y sus valores respectivos de  $n$ ,  $m$  y  $r$  y la comparación de sus curvas esta en la figura 16.

**Tabla 3.- Propiedades de formabilidad de diferentes aleaciones.**

Aleación	m	n	r
a) Zn-Ti.	0.06	0.05	0.35
b) Acero A-K	0.012	0.23	1.60
c) Acero HSLA (Cb-Si).	0.005	0.16	0.80
d) Aluminio 3003-O	0.005	0.22	0.70
e) Aluminio laminado en frío.	0.003	0.04	0.76
f) Bronce 70-30.	0	0.55	0.90
g) Aluminio 2036-T4.	0.005	0.28	0.77
h) Aluminio 5182-O.	0.01	0.36	0.80

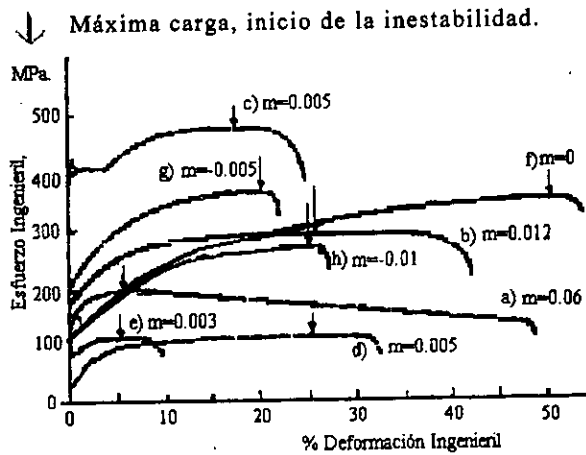


Fig. 16.- Curvas de los materiales listados en la tabla 3 para relacionar con los parámetro de formabilidad (14).

## 4.2.- Inestabilidad

Se conoce como inestabilidad a las condiciones de conformado donde el material sufre formación de grietas o estricciones. La estricción es un adelgazamiento localizado que ocurre cuando un esfuerzo tensil no se distribuye uniformemente en la pieza, y la grieta es una separación a nivel atómico del material (14).

A la reducción del área máxima en el instante de ocurrir la fractura se le conoce como el límite de la deformación de fractura " $\epsilon_f$ " (14). Cuando este factor por área transversal es muy alto, son las variables del proceso quienes causan la aparición de grietas o estricciones antes de lo esperado.

En una hoja metálica se pueden presentar dos tipos de estricciones: la deformación localizada y la difusa.

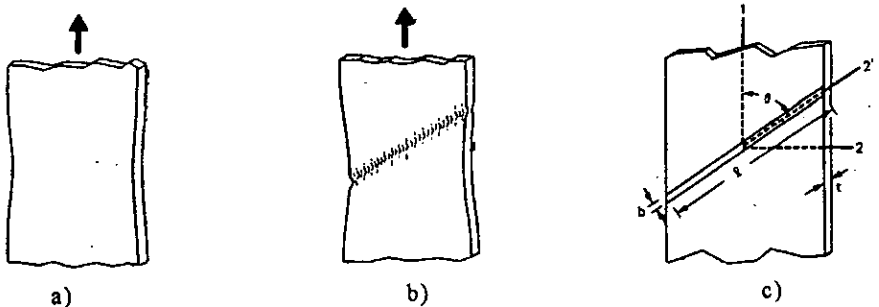


Fig. 17.- a) Estricción difusa.  
b) Estricción localizada.  
c) Coordenadas utilizadas en su estudio, (14).

La estricción localizada o estrechamiento es, en realidad, una sección donde el área normal a la carga fue alterada aún mas que el resto del material, por lo que el esfuerzo aplicado es mayor al resto de la muestra y por consecuencia el material esta propenso a fallar en este sitio. Una estricción

difusa solo daña la presentación del material y no afecta la distribución del esfuerzo. (14).

Para el estudio de las condiciones de estabilidad se utilizara una expresión del comportamiento esfuerzo-deformación.

La mejor expresión del esfuerzo en función de la deformación es la ecuación de Holloman, Ver Capítulo 1.5,  $\sigma = K\epsilon^n$ , y así expresar el inicio de la inestabilidad en una ecuación donde la deformación se describa con respecto a los parámetros de formabilidad del material.

La primera suposición es pensar que el ensayo tensil será aplicado en un tocho geoméricamente uniforme (15), la segunda suposición es que la estricción localizada aparece cuando se ejerce la carga máxima sobre el material. Para encontrar el máximo en cualquier función se utiliza la definición de derivada, la cual nos dice que la pendiente en ese instante es cero, por lo tanto:

$$dF=0. \quad (1)$$

El esfuerzo es igual a fuerza entre el área normal de aplicación.

$$F = \sigma * A \quad (2)$$

Derivando la expresión 2, y sustituyendo en la expresión (1):

$$dF = \sigma * dA + A * d\sigma = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A} = d\epsilon \quad (4)$$

Utilizando la ecuación de Holloman

$$\sigma = K * \epsilon^n \quad (5)$$

Derivando

$$d\sigma = n * K * \epsilon^{n-1} * d\epsilon \quad (6)$$

Sustituyendo la expresión (5) y (6) en (4) tenemos lo siguiente:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{n * K * \epsilon^{n-1} * d\epsilon}{K * \epsilon^n} = d\epsilon \quad (7)$$

$$n * \epsilon^{-1} * d\epsilon = d\epsilon \quad (8)$$

$$n = \epsilon \quad (9)$$

y el cual es el criterio de inestabilidad para la estricción localizada.

La dependencia lineal de la inestabilidad con el coeficiente de endurecimiento se observa en la figura 9. Para definir la estricción difusa, hay que considerar la deformación (contracción) en los dos sentidos transversales a la carga aplicada.

Para un material isotrópico podemos decir que:

$$d\varepsilon_2 = d\varepsilon_1 = \frac{d\varepsilon_1}{2} \quad (1)$$

El ángulo característico,  $\theta$ , de la estricción con el eje longitudinal, ver figura 10c, depende de la geometría de la pieza y si la estricción es muy ancha, la deformación paralela a la estricción  $d\varepsilon_2$  puede ser cero, Ref (14).

Por lo que

$$d\varepsilon_2 = d\varepsilon_1 \cos 2\theta + d\varepsilon_1 \sin 2\theta = 0. \quad (2)$$

Swift encontró que para un metal anisotrópico (15)

$$\varepsilon_1^* = \frac{2n(1+r+r^2)}{(\rho+1)(2\rho^2-\rho+2)}$$

donde  $\rho$  es la relación entre deformaciones ingenieriles,  $\rho = \frac{e2}{e1}$ .

A partir de estas consideraciones propone una curva indicadora del inicio de la inestabilidad, figura 18, la cual se le conoce como limite de formabilidad teórico de un material en específico, el cual depende de  $n$  y de  $r$ , es decir de las propiedades de embutibilidad y estirabilidad del material.

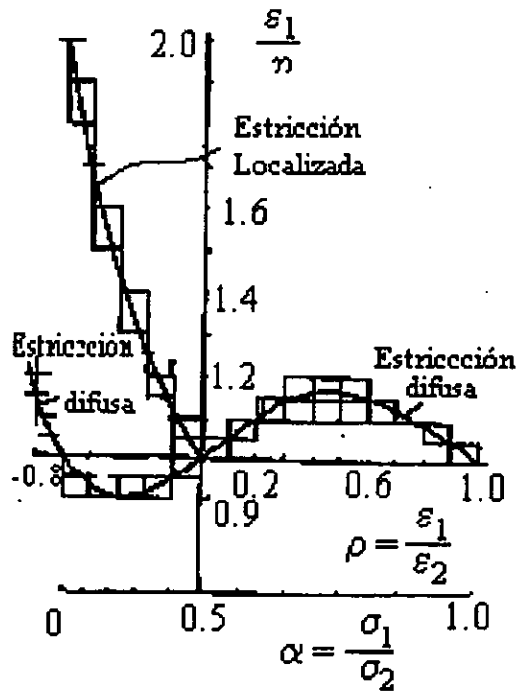


Fig. 18 .- Diagrama mostrando las condiciones de inestabilidad para las diferentes estricciones en función de  $\rho$ , (15)



## **4.3.- DIAGRAMA DE LÍMITE DE FORMABILIDAD, DLF.**

### **4.3.1.- Límites de formabilidad.**

Un proceso de conformado no es uniaxial por lo cual Kellier-Goodwin propusieron realizar un diagrama en función de las deformaciones principales, este diagrama lleva sus nombres o se conoce comúnmente como Diagrama de Límite de Formabilidad, DLF (14).

En la fig. 19 se plasma la equivalencia de las diferentes operaciones de conformado con el valor de deformaciones principales. En este tipo de diagramas se representan los límites de fractura y los de ondulado, etc. proporcionando el rango de trabajo donde no habrá defectos.

Existen diferentes límites que se representan en estos diagramas por ejemplo:

◊ Límite de fractura por estricción.

La curva que representa este límite se obtiene a partir de la aparición de estricciones localizadas, las cuales siempre se presentan a niveles de deformación constantes para determinado proceso y características del material.

◊ Límite de deformación compresiva plana.

En un proceso de tracción-compresión se corre el riesgo de la aparición de arrugas si el nivel del esfuerzo compresivo es muy alto, fig. 20.

◊ Límite de fractura por cizallamiento o corte.

Cuando aparecen grietas sin la aparición previa de estricciones se habla de una fractura por corte, las deformaciones críticas donde se da este comportamiento se conoce como curva límite curva de fractura por corte, fig. 21.

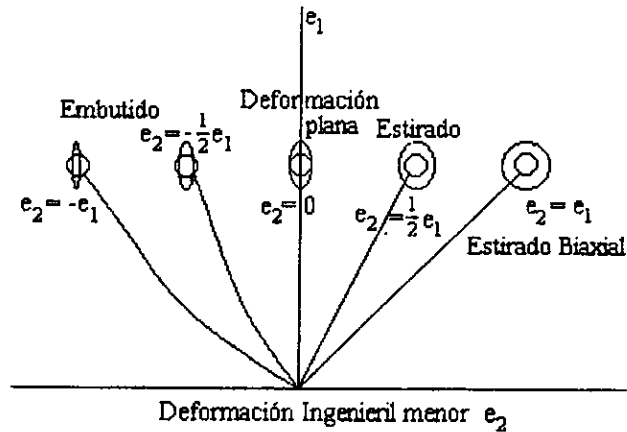


Fig. 19.- DLF. mostrando la equivalencia de procesos en relación a las deformaciones principales  $\epsilon_1$  y  $\epsilon_2$ . (14)

### 4.3.2.- Técnica de construcción

Una de las técnicas más utilizadas es la del campo de círculos, que consiste en grabar o fotografiar una red de círculos en láminas. Usualmente los círculos son de 0.100 pulgadas de diámetro pero se pueden usar círculos mas pequeños (21), figura 22.

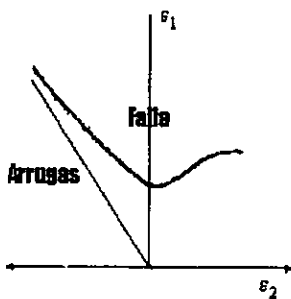


Fig. 20.- Diagrama  $\epsilon_1$  vs  $\epsilon_2$  con las condiciones de falla (arrugas ó fractura) en la deformación de un material. (14)

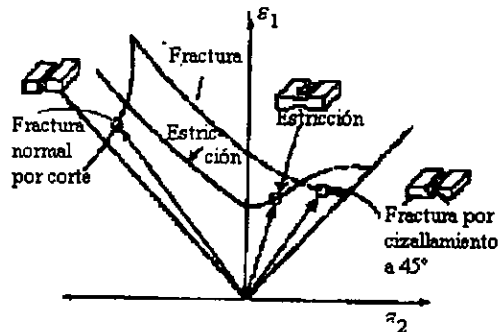
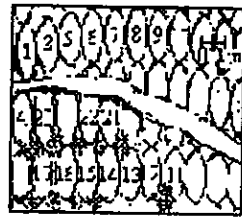


Fig. 21.- Diagrama  $\epsilon_1$  vs  $\epsilon_2$  mostrando las condiciones en que ocurre la fractura por cizallamiento, (14)



- Fractura
- Semifractura
- Libres de falla

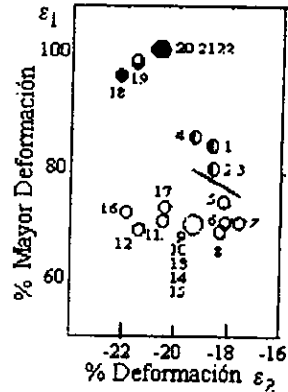


Fig. 22.- Muestra la formación de la grieta y su análisis por un campo de círculos, (20).

Los especímenes son estirados sobre una esfera al aplicarse el esfuerzo se produce una deformación biaxial y los círculos iniciales se distorsionan en elipses hasta observar la primera estricción, figura 23.

Se miden los diámetros finales (mayor y menor) de los círculos cercanos a la falla y con esto se calculan las deformaciones principales:

$$e_1^* = \ln(d_1 - d_0) \quad e_2^* = \ln(d_2 - d_0),$$

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

donde  $d_1$  es el diámetro mayor y  $d_2$  es el diámetro menor.

Los resultados se utilizan para construir el diagrama considerando los círculos localizados muy cerca de la estricción como fallados y se dibuja una curva límite entre los fallados y los no afectados por la estricción, como se muestra en la fig. 22.

Si se desean obtener las condiciones para un proceso de estirado se utilizan láminas de un ancho mayor. Si los datos son para un proceso de embutido necesita una mejor lubricación y una disminución en la longitud de la pestaña, pues las láminas angostas exhiben datos correspondientes a la parte izquierda del diagrama.

El ancho mínimo necesario para la aparición de la grietas varía según el material, el aluminio necesita de 4 a 4.5 pulgadas de ancho y el acero al carbón 5 a 5.5, este valor depende también de la lubricación, una buena lubricación provoca que se alcancen valores más altos de deformación (21).

### 4.3.3.- Características del DLF.

La línea que separa los procesos de tracción biaxial y los de tracción - compresión se conoce como deformación plana, siendo el valor de la deformación menor  $\epsilon_2$  igual a cero, y a la intersección entre la curva de estricción con esta línea se le llama  $DLF_0$ .

Este límite tiene una relación directamente proporcional con respecto al coeficiente de endurecimiento  $n$ , y al espesor de la lámina, fig. 24, por lo que se puede obtener una ecuación que relacione el espesor,  $n$  y  $DLF_0$

$$\text{Para un } n \leq 0.21 \quad DLF_0 = \frac{233 + 359t}{0.21} n$$

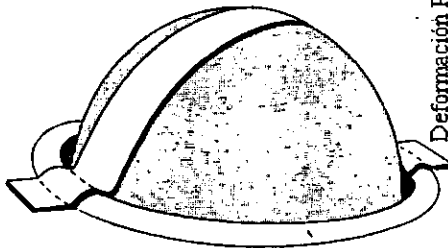


Fig. 23.- Herramental para obtener un DLF, (21).

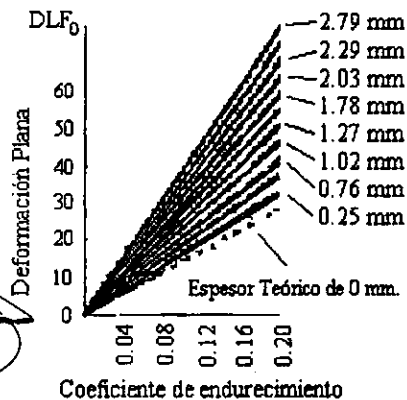


Fig. 24.- Diagrama  $n$  vs. esfuerzo de deformación plana,  $DLF_0$ , a diferentes espesores, (14).

Marciniak y Kuczyski (22) sugieren un método para calcular la curva de estricción teórica, asumiendo la preexistencia de un defecto en la forma de una estria orientada perpendicularmente al eje del esfuerzo principal y dependiendo del incremento de esfuerzo y deformación sobre el material dentro y fuera de la muestra, para ver el cálculo consultar el apéndice de la referencia (22). En la fig. 25 se compara una curva de estricción con una curva teórica.

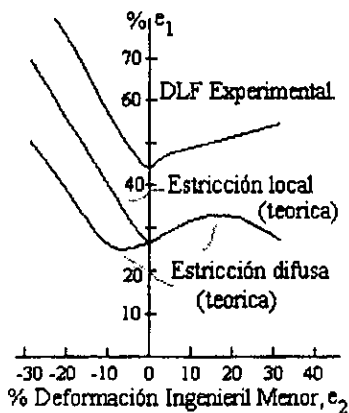


Fig. 25.- Comparación entre un DLF. teórico y uno experimental.

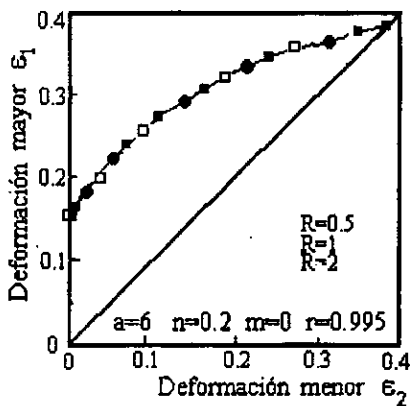


Fig. 26.- DLF teórico para diferentes valores de anisotropía, (14).

Es importante señalar que solo se obtiene la curva teórica de estricciones localizadas cuando  $\epsilon_2$  es negativa. La dependencia de la curva de estricción con la anisotropía se realizó con el criterio de Hill (14).

$$(\sigma_x^a + \sigma_y^a + r(\sigma_x - \sigma_y)^a) = (r+1)Y^a$$

y valuando para diferentes valores de  $a$ , fig. 26, se encontró que su relación con la anisotropía plástica es nula.

## 5.- TEXTURA

### 5.1.- ¿Qué es la Textura?

Se conoce como textura a la alineación de planos y direcciones cristalográficas preferenciales en una red (35).

Los granos que forman un material presentan una orientación dependiendo de las condiciones de solidificación y como cada núcleo crece independientemente cada grano tiene su propia orientación.

Cuando el metal sufre un grado de deformación intenso los granos tienden a orientarse hacia la dirección de deformación desarrollando una orientación preferencial en este sentido.

El descubrimiento de la orientación de los cristales fue realizado en 1950 por Lankford por medio de mediciones de torques magnéticos (8). La orientación preferencial, textura, depende de cuatro factores (22):

- ◇ Tipo de deformación.
- ◇ Cantidad de deformación.
- ◇ Temperatura de deformación
- ◇ Mecanismos de deslizamiento en el metal.

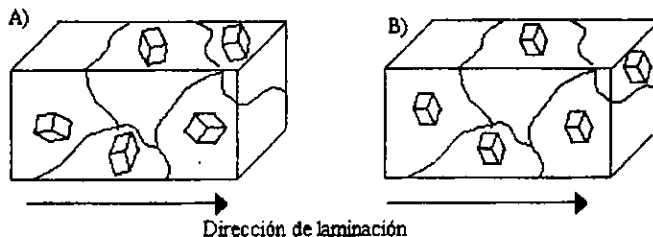


Fig. 27.- Orientaciones Preferenciales, (22).  
A)Textura al azar.                      b)Textura ideal.

Weissenberg, clasificó la textura en cuatro tipos (8):

◊ Al azar, lo cual da como resultado propiedades cuasi-isotrópicas. En aplicaciones prácticas este caso puede ser solamente aproximado. Ver fig. 27a.

◊ Planar (lámina) debido a la inexistencia de una simetría axisimétrica, la textura cambia en las diferentes direcciones de deformación, haciendo de este el caso más importante de anisotropía en el conformado de metales.

◊ Fibras (para el caso de barras o alambres), es decir se presenta una dirección distintiva en el material, las propiedades del material son axisimétricas con respecto a esta dirección.

◊ Ideal, para lo cual, todos los granos presentan una orientación cristalográfica idéntica, ver fig. 27b.

Generalizando se puede decir que un material deformado entre un 20 % y un 30 % aproximadamente presenta una dispersión casi al azar, y al aumentar la reducción a valores de 80% o 90% se obtiene una orientación cercana al ideal.

## 5.2. Textura - Estructura Cristalina

La estructura cristalina es determinante para el desarrollo de una textura especial debido a las diferentes combinaciones de planos y direcciones de deslizamiento activados, en la fig. 28 se observan diferentes orientaciones de un cristal BCC.

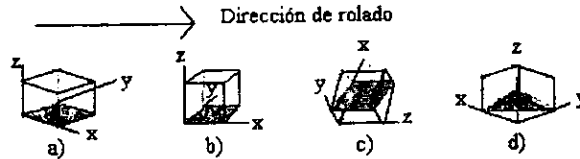


Fig. 28.- Texturas típicas de un sistema BCC (22).

**Tabla. 4.- Textura típica de laminación en aleaciones industriales selectas, (22).**

Estructura	Aleación	Textura Preferencial
FCC	Bronce, Plata, Acero Inoxidable	$(110)[\bar{1}12]$ ; $(110)[001]$
	Cobre, Níquel, Aluminio	$(123)[\bar{4}12]$ ; $(146)[\bar{2}11]$ ; $(112)[1\bar{1}\bar{1}]$
BCC	Hierro, Tungsteno, Molibdeno, Tantalio, Niobio	$(001)[\bar{1}10]$ a $(111)[\bar{1}10]$ ; $(112)[\bar{1}10]$ a $(110)[\bar{1}12]$ ,
HCP ( $c/a > 1.633$ )	Zinc, Cadmio	$(0001)$ a un ángulo $\pm 20-25^\circ$ $(10\bar{1}0)$ en un sentido transversal
( $c/a \approx 1.633$ )	Magnesio, Cobalto	$(001)[2\bar{1}\bar{1}0]$
( $c/a < 1.633$ )	Titanio, circonio, berilio	$(0001)$ a un ángulo $\pm 30-40^\circ$ $[10\bar{1}0]$ dirección de rolado

Una estructura cristalina FCC presenta 12 sistemas deslizantes posibles con 384 combinaciones durante la deformación, y la combinación que se activa es aquella donde los esfuerzos cortantes son mínimos.



En la Tabla 4 se indican las texturas típicas para diferentes materiales clasificadas de acuerdo a la estructura cristalina de cada material.

### 5.3.- Medición de la textura

El estudio de la textura (23) de un policristal se realiza por reflexión y transmisión de rayos X y se representa en una figura de polos. La figura de polos es una proyección estereográfica donde se grafican las intensidades relativas de las diferentes orientaciones de los cristales. La textura del centro hasta  $50^\circ$  de la figura de polos se mide por la técnica de reflexión y la zona periférica hasta  $60^\circ$  hacia el centro es analizada por transmisión. La zona común de ambas técnicas sirve como base para relacionar ambas mediciones.

En años recientes, se han utilizado técnicas matemáticas para deducir la distribución de la textura tridimensionalmente, ODF's, (24).

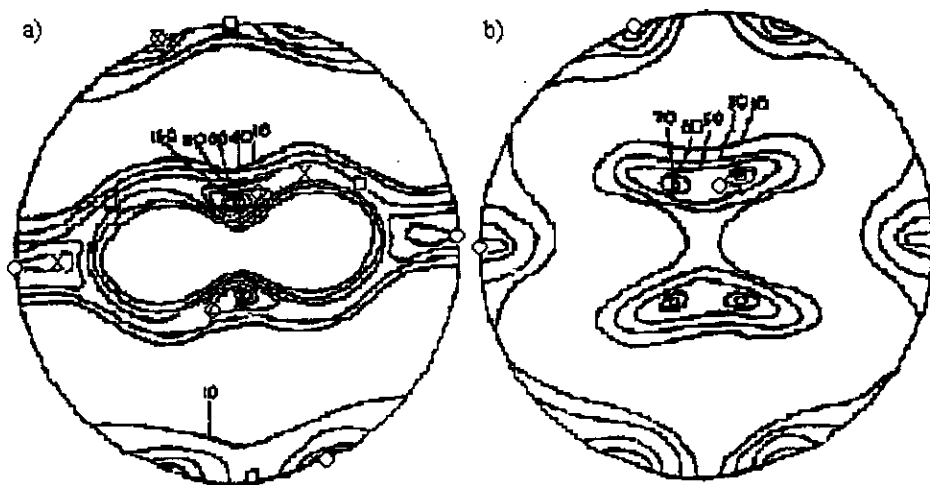


Fig. 29.- Figura de polos 111. (36)

a) Oro puro

b) Oro -Plata 60 % at.

## 5.4.- Textura - propiedades mecánicas

La textura altera las propiedades de formabilidad, eléctricas y mecánicas del material. La movilidad de las dislocaciones depende de la orientación de los granos. Las propiedades mecánicas son afectadas con la formación de una textura preferencial, por ejemplo el valor del Modulo de Young para los componentes característicos de un acero ferrítico son diferentes (25):

$$[100] E= 13.1 \times 10^4 \text{ MPa.}$$

$$[110] E= 21.7 \times 10^4 \text{ MPa.}$$

$$[111] E= 27.7 \times 10^4 \text{ MPa.}$$

Perlovich (26) realizó un estudio de las propiedades mecánicas de un acero austenítico 09Kh16N15M3B (Designación Rusa similar a un acero AISI 316) sin recocido y al comparar los parámetros medidos observó como a 90° se tienen las mejores propiedades mecánicas por la formación en este sentido de una textura más propicia. Tabla 5.

**TABLA 5.- Propiedades mecánicas del acero  
09Kh16N15M3B, (26)**

% de Reducción	Dirección de laminación.			Dirección transversal 90°		
	Esfuerzo Fluencia (MPa)	Resis. a la Tracción (MPa)	% de Alargamiento	Esfuerzo. Fluencia (MPa)	Resis. a la Tracción. (MPa)	% de Alargamiento
Recocido	210	595	55	208	565	46
20 %	631	726	12.4	748	798	21
30 %	802	838	9.0	843	885	14
40 %	881	907	4.2	958	1020	7

## 5.5.- Textura - anisotropía

Pero la textura influye drásticamente en la anisotropía plástica y planar. En las figuras 30 y 31 se observa la variación de la textura {111} con la anisotropía. En un sistema BCC, la intensidad relativa {111} tiene la mayor influencia en la anisotropía, no así la intensidad de la textura {001}.

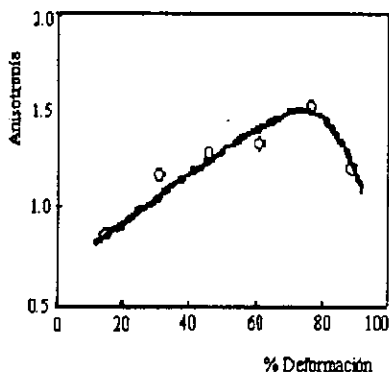


Fig. 30.- Anisotropía vs. Porcentaje de deformación en frío para un acero al carbón, (8).

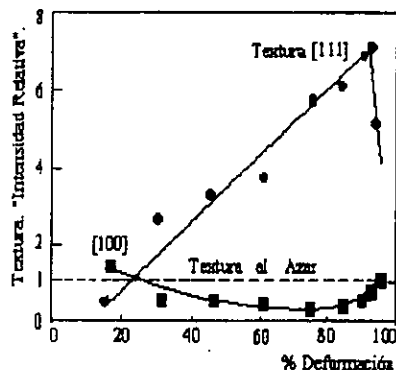


Fig. 31.- Observe como cambia la intensidad de la textura {001} y {111} con la reducción en frío, (8).

Esta relación entre la orientación preferencial y la anisotropía es tan estrecha, ver figura 31, que para un acero al carbono mientras mayor es la intensidad relativa de la textura {111} el material presenta índices mayores de embutibilidad.

Para obtener valores altos de anisotropía plástica por medio de laminación en frío se recomienda un porcentaje de deformación de 60 a 75, (8). Los valores altos de anisotropía son correlacionados con la textura {111}<110> y si la reducción excede el 75% aparecen componentes {111}<112>.

## 5.6.- Textura - Energía de Falla de Apilamiento

El crecimiento de una textura dada depende de la energía de falla de apilamiento, EFA. Para un sistema cristalográfico FCC con un valor bajo de EFA los planos preferenciales típicos son  $(110)[112]$ , o  $(110)[001]$ , en el caso del acero AISI 304 sus planos preferenciales son  $(110)[112]$ , a esta orientación se le conoce como "textura de la plata o de bronce". El cobre tiene un mayor nivel de EFA y presenta como componentes predominantes de textura a  $(123)[\bar{4}12]$ ,  $(146)[\bar{2}\bar{1}1]$ , y  $(112)[1\bar{1}\bar{1}]$  que reciben el nombre genérico de "textura de cobre". El níquel y el aluminio, que poseen una energía de intermedia a alta respectivamente, también presentan normalmente esta textura (22).

Otro ejemplo claro de la influencia de la EFA en la textura es cuando es alterada por ejemplo al incrementar la temperatura, los mecanismos de deslizamiento cambian, y por ejemplo, un acero austenítico 18-8 vislumbra una alteración de una textura de "plata" a una de "cobre" a una temperatura de laminación entre  $200^\circ$  y  $800^\circ$ .

En nuestro caso la laminación del acero inoxidable AISI 304 se trabaja en frío, por lo cual la textura predominante es  $(110)[\bar{1}12]$ .

## 5.7.- Textura - Composición Química

Como la energía de falla de apilamiento de dislocaciones, EFA, aumenta con la cantidad de elementos aleantes, se puede concluir que los componentes de textura también varían con la cantidad de aleantes. Por ejemplo, un acero desoxidado con aluminio, Al Killed, cuando tiene un nivel mayor de fósforo tiende a mostrar un crecimiento de textura [111] o la presencia de nitruros en los aceros calmados o desoxidados, Rimmed, provoca la desaparición de la textura [111] y de ahí su efecto fatal en las propiedades mecánicas del material.

Para obtener valores altos de anisotropía en un acero de bajo carbono es necesario minimizar el componente {100} y maximizar {111}, una forma de lograrlo es precipitar nitruros de aluminio durante el recocido. En un acero ferrítico la energía almacenada en granos con una orientación {111} es mucho mayor que con una orientación {100}, (27). Por ejemplo en la figura 32 se observa como la cantidad de oxígeno altera la textura.

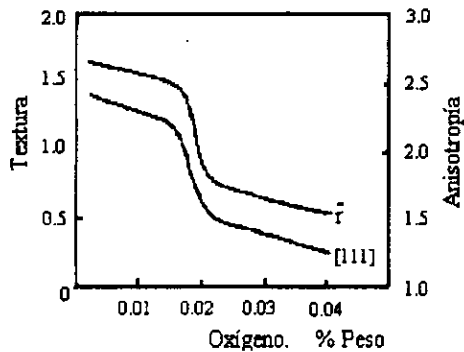


Fig. 32.- Efecto del oxígeno en el componente de textura {111} y la anisotropía, (8).

En la figura 5 en el Capítulo 1.4.3. se muestra como los elementos aleantes alteran la anisotropía y consecuentemente la textura también.

## 6.- ACERO AISI 304

El acero tipo AISI 304 es un acero inoxidable austenítico, hay innumerables variantes (el 304L, el 304H, el 304 DDQ, etc.), el estudio se realiza sobre el 304 normal, cuya rango de composición química es:

0.08 %C máx	18.0-20.0 %Cr	8.0-10.5 %Ni
2 %Mn	0.045 %P máx	0.03 %S máx.

Los aceros austeníticos poseen excelentes propiedades de formabilidad pero también tienen una acción muy abrasiva sobre la herramienta, debido a las altas presiones necesarias en su conformado. Los dados utilizados suelen ser de bronce al aluminio y con una excelente lubricación para poder reducir la fricción tan alta y la adherencia con la herramienta (10).

Algunos valores de las propiedades del acero AISI 304 en comparación con otros aceros estan en la tabla 6.

**Tabla 6.- Propiedades de formabilidad para los aceros más característicos, (28)**

Material	Resist. Tracció n. MPa.	Esfuerzo Fluencia. MPa.	L.D.R.	L.D.H. mm.	<i>n</i>	<i>r<sub>m</sub></i>	% de Alarga miento
Acero al Carbón.	565	520	2.15-2.50	63	0.22	1.0-.8	12.0
301	1340	1100			0.50-0.7		18.0
304	1000	860	2.18-2.25	79	0.45-0.5	1.0	16.5
305	790	710			0.45		17
405	585	565			0.20		5
409	690	670	2.15-2.30	62	0.20	1.0-1.5	2.5
430	725	705		52	0.20		2.5

\* Para un diámetro de punzón de 178 mm. de diámetro.

Para caracterizar mejor al 304 en la figura 33 se hace una comparación de las curvas esfuerzo deformación de diferentes tipos de aceros, en la figura 34 se puede observar la diferencia existente en las propiedades mecánicas de un acero ferrítico y un acero austenítico con la deformación.

Para medir la estirabilidad de un acero se utiliza en la mayoría de las ocasiones, la prueba de Olsen. Shedin (10) comparó la formabilidad de diferentes tipos de aceros, utilizando probetas de diferente geometría, para lo cual utilizó un ensayo similar al de Olsen pero con un punzón de 100 mm de diámetro.

En la figura 35 se observa la máxima profundidad alcanzada en función de la Resistencia a la Tracción, para cada acero. El acero inoxidable 304L, mostró una mejor estirabilidad, debido a su capacidad de distribuir mejor los esfuerzos, y por lo tanto una mejor formabilidad, como se puede observar en la figura 36.

Sin embargo a pesar de la mejor distribución de esfuerzos del acero 304L, sus valores de embutibilidad y de anisotropía son muy semejantes a las de un acero al carbón y en ocasiones menor a estos, pero la formabilidad de un material depende de las propiedades de estirabilidad y embutibilidad y en la primera el acero austenítico es muy superior.

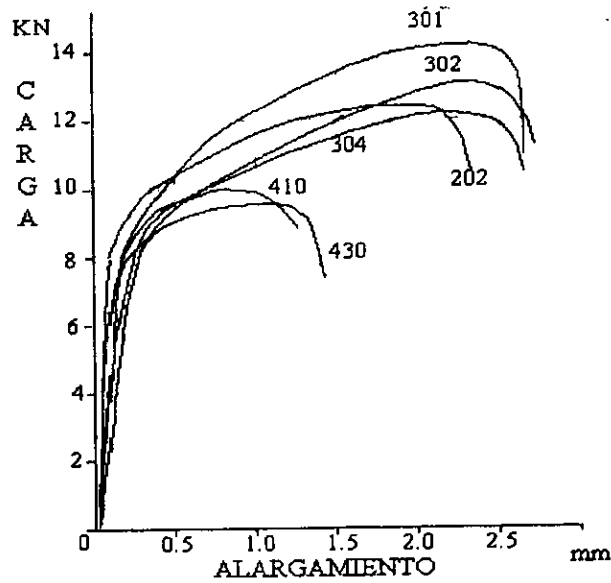


Fig. 33.- Curvas de  $\sigma$  vs  $\epsilon$  para aceros inoxidables austeníticos y ferríticos en probetas estandar de 50mm, (3)

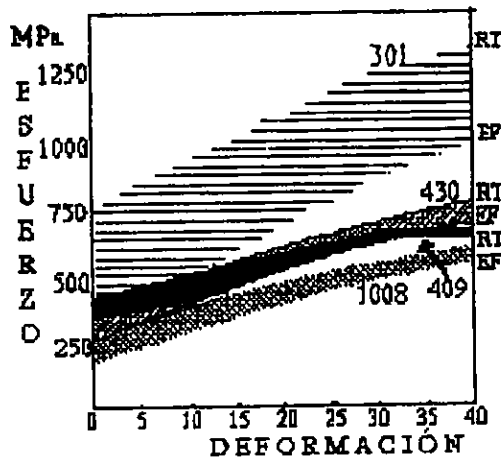


Fig. 34.- Dependencia de la Resistencia a la Tracción y el Esfuerzo de Fluencia con el porcentaje de deformación, (28)



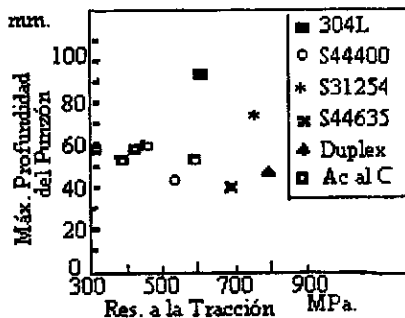


Fig. 35.- La relación existente entre la máxima profundidad del punzón y la carga máxima para diferentes aceros, (10).

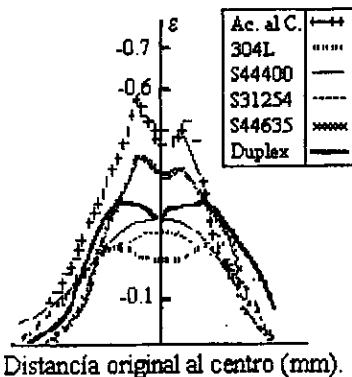


Fig. 36.- Distribución de esfuerzos. El acero 304 muestra una homogeneidad con relación a la distancia al punzón, (10)

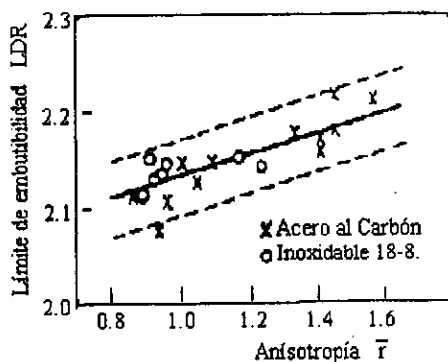


Fig. 37 Relación lineal entre el LDR y la anisotropía promedio sin importar el tipo de acero.

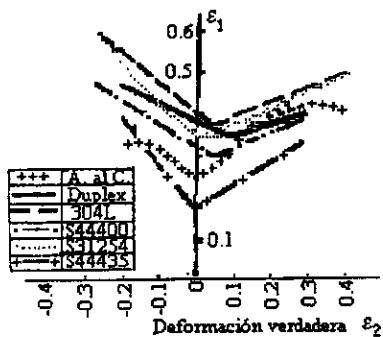
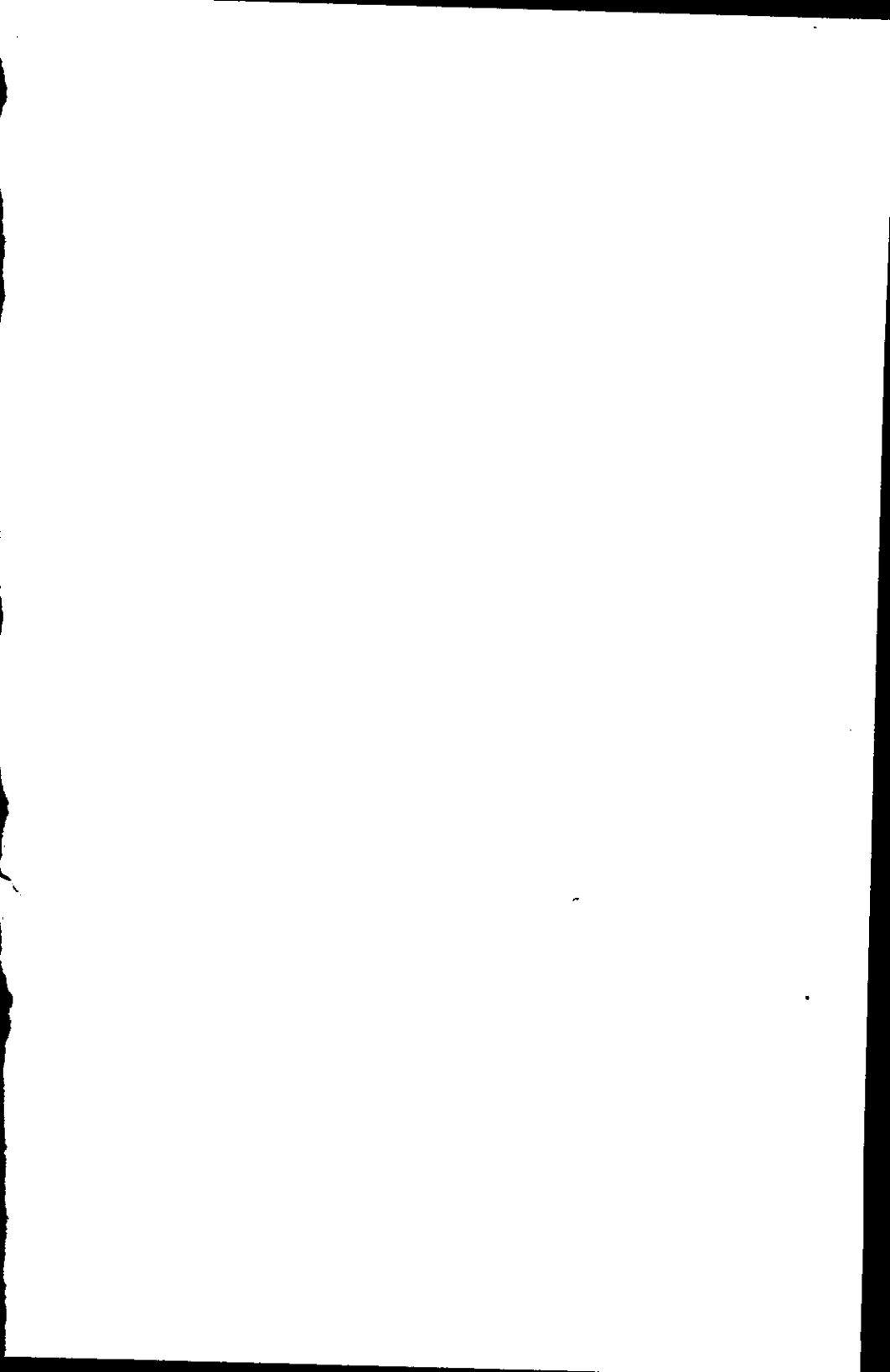


Fig. 38.- DLF para diferentes aceros, los límites de formabilidad del 304 son mayores a los del resto de materiales.



## 7.- DISEÑO EXPERIMENTAL

### 7.1.- Preparación de las Muestras.

Este estudio se enfoca a conocer únicamente la influencia de la deformación en la formabilidad y debido a esto se mantuvieron constantes la temperatura, el tiempo de recristalización, el tamaño de grano y la velocidad de calentamiento igualando estos al proceso en planta. También se eliminaron las posibles diferencias de composición, distribución de las inclusiones y condiciones de colado siendo todas las muestras de una sola bobina de acero inoxidable 304.

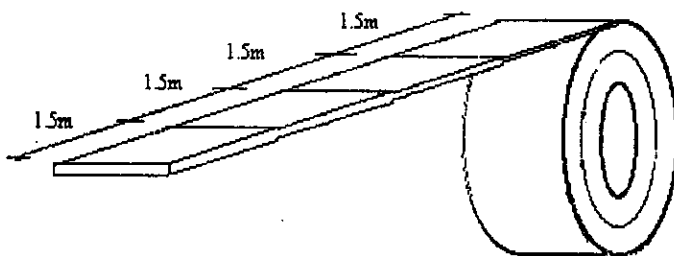


Fig. 39.- Esquema de la elaboración de los escalones en el molino Sendzimir en uno de los extremos de las bobinas.

Para la obtención de las probetas de acero inoxidable con diferentes porcentajes de deformación se utiliza un sistema de escalones propio de los molinos Sendzimir. El molino Sendzimir para reducir una lamina a un espesor deseado lo hace en varios pasos, en cada uno deja un tramo sin reducir, considerado normalmente como desperdicio y muy útil en nuestro caso pues proporciona diferentes espesores. La longitud aproximada de cada escalón fue de 1.5 m por el ancho de la bobina, como muestra la figura 39

Los porcentajes de reducción de los cinco escalones obtenidos de la bobina seleccionada se reporta en la Tabla 7.

**Tabla 7.- Especificaciones de los escalones estudiados.**

Número de Escalón	Espesor mm.	porcentaje de reducción.
Inicial.	3.00	0
1	1.40	52.67
2	1.14	62.33
3	0.96	68.00
4	0.69	76.77
5	0.56	81.33

No se estudiaron porcentajes de deformación menores al 50% por no ser redituable, tampoco se tomo en cuenta reducciones mayores al 85% por necesitar una carga demasiado elevada por el mismo endurecimiento del material y a la posibilidad de fractura.

De cada escalón se cortaron probetas de aproximadamente 20 cm x 2.5 cm a tres diferentes orientaciones con respecto al sentido de laminación: Longitudinal (0°), Transversal (90°) y Diagonal (45°).

El tratamiento de recocido realizado normalmente en la línea fue simulado en el laboratorio en una mufla Thermolyne, a una temperatura de 1100°C, basándose en la obtención de un tamaño de grano ASTM 8 y una dureza de 77 HRB. Los tiempos de recocido para cada espesor (escalón), se indican en la tabla 8, se determinaron en base al tiempo utilizado en la línea de recocido de la planta y con una pequeña compensación para sustituir las zonas de calentamiento del horno.

**Tabla 8.- Parámetros del Tratamiento Térmico del Acero 304.**

Reducción. %	Velocidad de la línea (m/s)	tiempo de consigna, línea Mexinox (seg.)	tiempo de compensación por calentamiento (seg.)	tiempo total en la mufla (min.).
52.67	18.8	105.32	20	2:05
62.33	22.6	87.6	20	1:47
68.00	27.2	72.8	20	1:33
76.77	38.1	51.47	20	1:12
81.33	40.9	48.41	20	1:08

De las probetas tratadas se escogieron como testigos la primera probeta tratada, una intermedia y la final para analizarlas metalográficamente y comprobar su homogeneidad y el logro de la microestructura deseada.

El tamaño de grano se midió de acuerdo a la Norma ASTM E12 (13), utilizando el método de Intersección para cada una de las probetas testigo. La medición de dureza se realizó en todas las probetas y si la probeta estaba fuera del rango preestablecido, entre 78 y 76 HRB, se desechaba. Una vez analizadas fueron enviadas a maquinarse, con las dimensiones especificadas en la Norma ASTM E8 para ensayos de tracción de probetas planas.

Una vez maquinadas se dividieron en tres grupos, el primero para medir propiedades tensiles, el segundo estirabilidad y el tercero embutibilidad en la máquina universal Tinius Olsen, propiedad de Mexinox con sistema computarizado integrado y un extensómetro de 20 mm.

Las propiedades tensiles medidas son:

- Resistencia a la Fluencia, 0.2%.
- Resistencia a la Tracción.
- Elongación.

Las propiedades de estirabilidad:

- Coeficiente de endurecimiento,  $n$ .
- Constante de resistencia al esfuerzo,  $K$ .

Las propiedades de embutibilidad:

- Anisotropía plástica,  $r$ .
- Anisotropía promedio,  $r_m$
- Anisotropía planar,  $\Delta r$ .

## 7.2.- Pruebas Tensiles.

Se desea conocer las propiedades mecánicas básicas que caracterizan a un material, además de ser las más fáciles de calcular por medio de un simple ensayo de Tracción (Ver Apéndice AII), estas propiedades son la Resistencia a la Tracción, la Resistencia a la Fluencia y el Porcentaje de Alargamiento. La Resistencia a la Tracción se calcula en función del esfuerzo y deformación reales en las condiciones de carga máxima durante el ensayo.

Cada ensayo se realizara por cuadruplicado para cada espesor y sentido en la máquina de Tracción universal Tinius Olsen del Laboratorio de Propiedades mecánicas de Mexinox, el esfuerzo de fluencia de acuerdo a la relación con el 0.2% de deformación (13) y con ayuda de un extensómetro de 20 mm..

El cálculo de Alargamiento se hará de acuerdo a la Norma E4, (Apéndice AI) al igual que las propiedades anteriores.

### 7.3.- Coeficiente de Endurecimiento por Deformación.

Esta medición se realizó como se indica en la Norma ASTM E 646-91 "Estándar de método de prueba de tensión para exponente de endurecimiento por deformación (valor  $n$ ) de hojas de materiales metálicos" (13).

Para determinar el exponente de endurecimiento por deformación  $n$  se utilizan datos obtenidos en un ensayo normal de tracción. Los datos tensiles son reunidos de manera continua, controlando el desplazamiento y la velocidad.

En la norma se especifica el uso de un extensómetro de 50 mm. como la mejor manera para tener un control de la deformación y en el caso de no contar con este dispositivo, como es el nuestro, existe otra alternativa. La cual consiste en realizar el ensayo en cuando menos 5 etapas con una deformación mayor de 2% para cada una y monitoreando las dimensiones de la carga tensil normal y la deformación.

Se tomó la base de un porcentaje de deformación aproximado de 3% para cada etapa y un total de 7 por probeta. Fig. 40.

El cálculo de este parámetro esta basado en la ecuación de Holloman (11) y en el método de mínimos cuadrados (29).

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo verdadero.

$\varepsilon$  = Deformación verdadera.

$K$  = Coeficiente de resistencia.

$n$  = Exponente de endurecimiento por deformación.

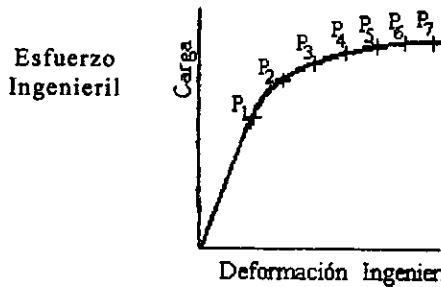


Fig. 40.- Una curva S vs e, mostrando la toma de datos en la región plástica continua.

**Tabla 9.- Método de mínimos cuadrados para el cálculo del coeficiente de endurecimiento**

Long. mm	Carga N.	Deform. Ingen.	Esfzo Real	Deform. Real	x= LN ε	y= LN σ	xy	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>
52.08	7295	0.041	7599	0.040	-3.20	8.93	-28.6	10.2	79.8
55.64	8894	0.107	9897	0.101	-2.24	9.20	-20.6	5.00	84.6
58.85	10196	0.163	12001	0.151	-1.81	9.39	-17.0	3.29	88.2
62.73	11107	0.227	13935	0.204	-1.48	9.54	-14.2	2.20	91.1
66.22	11679	0.281	15468	0.248	-1.27	9.64	-12.2	1.61	93.1
70.10	12207	0.338	17114	0.291	-1.08	9.75	-10.6	1.18	95.0
73.34	12678	0.383	18596	0.324	-0.96	9.83	-9.4	0.92	96.6
Datos	7	Área mm <sup>2</sup>	18.037	Total:	12.05	66.5	-112	24.4	628.5

### CÁLCULOS:

La determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación es a partir de la relación lineal entre el logaritmo de la curva esfuerzo verdadero contra deformación verdadera para la región plástica según el modelo de Holloman.

$$\log \sigma = \log K + n \log \epsilon$$

Se realiza la regresión lineal entre  $\log \sigma$  y  $\log \epsilon$  en base al método de mínimos cuadrados como se especifica en la Tabla 9.

Donde:



$$n = \frac{N \Sigma xy - \Sigma x \Sigma y}{N \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2};$$

El coeficiente de resistencia se obtiene por

$$b = \frac{\Sigma y - n \Sigma x}{N} \quad K = \frac{\exp(b)}{\text{Area}}$$

y la desviación estándar de  $n$  se da como:

$$\text{SDT} = \left[ \frac{\Sigma (y - b - nx)^2}{N \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \frac{N}{N-2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Sustituyendo valores

$$n = \frac{7(-112.61) - (-12.048)(66.295)}{7(24.442)^2 - (-12.048)^2} = 0.40056938$$

$$b = \frac{66.295 - 0.4(-12.048)}{7} = 13.3554$$

$$K = \frac{\exp(13.3554)}{18.037} = 13000 \text{ N}$$

## 7.4.- ANISOTROPÍA.

La anisotropía plástica se define de la siguiente manera (A.I).

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad \text{Donde :}$$

$$\epsilon_w = \ln \left( \frac{w_f}{w_o} \right) = \text{deformación en el ancho.}$$

$$\epsilon_t = \ln \left( \frac{t_f}{t_o} \right) = \text{deformación en el espesor.}$$

El cálculo de este parámetro fue de acuerdo a la norma ASTM E 517-81 "Estándar de método de prueba para la relación de deformación plástica  $r$  para hojas de metal" (13) por medio de ensayos de tracción estandarizados, con probetas planas de dimensiones y características especificadas en la Norma ASTM E-8, las pruebas deben realizarse en tres sentidos con referencia a la dirección de laminación,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  (13).

El porcentaje de deformación al cual se realiza las mediciones de  $r$  no está especificado en la norma, por depender del rango de deformación máximo posible de cada material, con la condición de no existir ninguna estricción localizada.

El reporte del porcentaje de deformación para las mediciones se reporta como un superfiijo, por ejemplo, si una elongación de 20 % es usada, el reporte muestra  $r^{20}$ . En este caso, la medición se realizó al 46% de alargamiento. Este valor se determinó seleccionando el porcentaje de alargamiento máximo en el cual todas las muestras tuvieron deformación homogénea, (13).

Debido a la dificultad en la medición del espesor con suficiente precisión, en la practica es comúnmente usada una relación equivalente, basado en deformación en longitud y ancho:

$$\epsilon_t = (\epsilon_l + \epsilon_w). \quad \text{y por lo tanto: } r = (\epsilon_w / (\epsilon_l + \epsilon_w)).$$

Las longitudes y anchos iniciales y finales se tomaran como el promedio de tres mediciones diferentes a lo largo de la probeta.

## 8.- RESULTADOS Y SU ANÁLISIS.

En este estudio se varía solamente el porcentaje de deformación manteniendo constante variables importantes como son la temperatura, el tiempo de recrystalización, el tamaño de grano y la velocidad de calentamiento. Todas las muestras fueron obtenidas de una sola bobina de acero inoxidable 304 para eliminar las posibles diferencias en composición química, distribución de las inclusiones, historial térmico en su proceso de laminación en caliente, tamaño de grano original, etc.

Para la obtención de las probetas se utilizó un sistema de escalones propio de los molinos Sendzimir (Cap. 7) partiendo de una lamina con un espesor de 3mm. La longitud aproximada de cada escalón fue de 1.5 m por el ancho de la bobina, figura 39.

Los porcentajes de reducción de los escalones son 52.67, 62.33, 68.00, 76.77 y 81.33. De cada uno de los tramos escalonados se cortaron muestras en cada una de las tres diferentes orientaciones con respecto al sentido de laminación: Longitudinal (0°), Transversal (90°) y Diagonal (45°).

La composición química de la bobina es la siguiente:

0.062% de C, 18.35% de Cr, 0.220% de Cu, 1.710% de Mn, 0.220% de Mo, 0.056% de N, 8.130% de Ni, 0.031% de P, 0.003% de S, 0.062% de Si.

El tratamiento de recocido se realizó a una temperatura de 1100°C, tratando de obtener un tamaño de grano ASTM 8 y una dureza de 77 HRB.

**Tabla 11.- Características microestructurales de las probetas analizadas.**

Porcentaje de Reducción.	Dureza HRB.	Tamaño de Grano ASTM.
52.67	77.5	8
62.33	77	8
68.00	77	8
76.77	77	8
81.33	77	8.25

De las probetas tratadas se escogieron como testigos la primera, una intermedia y la final para analizarlas metalográficamente a todo lo largo y comprobar su homogeneidad y el logro de la microestructura deseada.

El tamaño de grano se midió de acuerdo a la Norma ASTM E12 (13), utilizando el método de Intersección para cada una de las probetas testigo. En la Tabla 11 y en las figuras 43 y 44 se observan los resultados del análisis metalográfico.

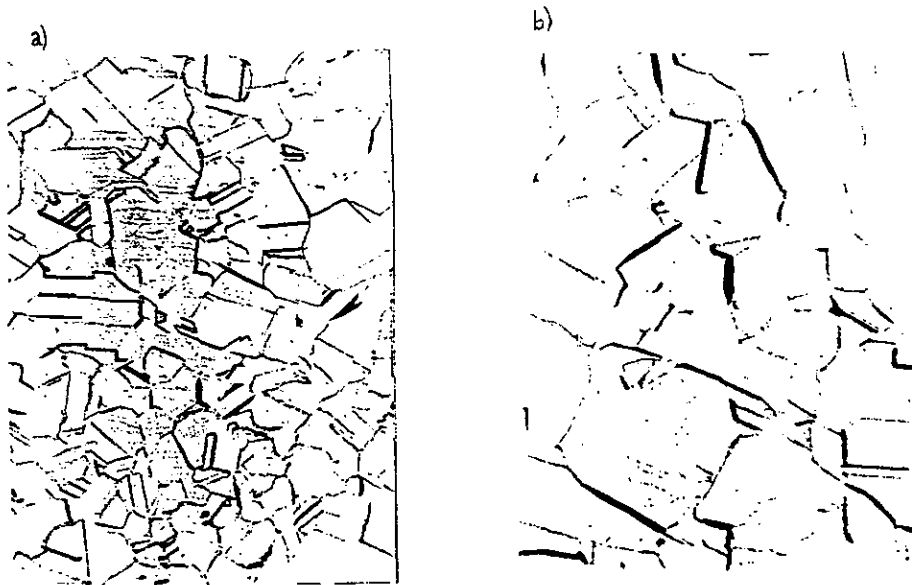


Fig 43.- Acero AISI 304 con reducción en frío del 52.67%. a)500x y b) 1000x.

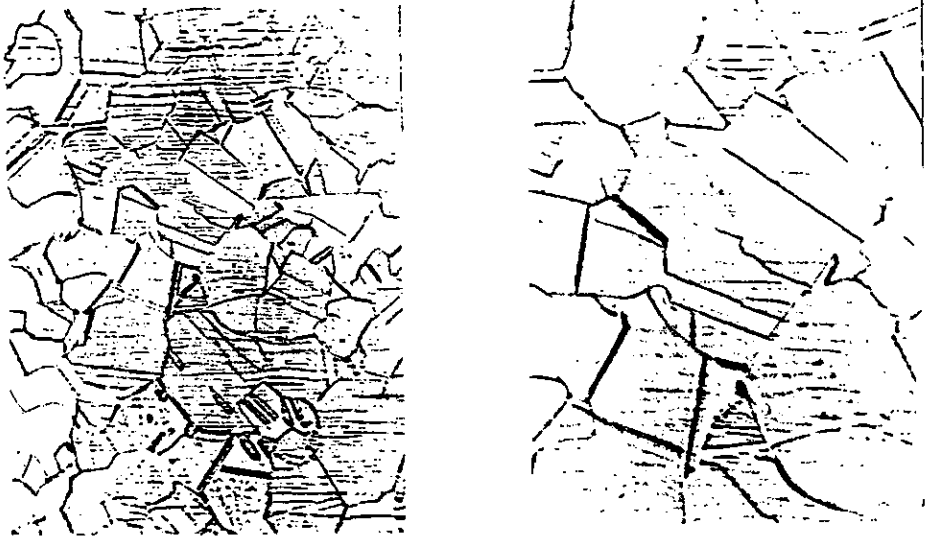


Fig 44.- Acero AISI 304 con reducción en frío del 81.33%. a) 500x y b) 1000x.

Una vez maquinadas las probetas se dividieron en tres grupos, el primero para medir propiedades mecánicas, el segundo estirabilidad y el tercero embutibilidad.

En la tabla 12.A se presentan los resultados experimentales de los ensayos de resistencia a la fluencia para cada espesor en particular. La letra L indica que las muestras se cortaron en dirección paralela a la dirección de laminado, la letra T señala dirección perpendicular a este y la D a 45° de las dos anteriores. Todas las muestras se tomaron por cuadruplicado. En la parte inferior de cada tabla se reportan los valores estadísticos: media, varianza (var) y desviación estándar (std).

Los datos mostrados en la tabla 12.A fueron representados en la figura 45. Los valores reportados son para cada dirección.

Iniciando con el análisis particular de cada medición, encontramos que en la figura 45 se puede ver que en el rango de deformación en frío de 60 a

63% se encuentra el valor mínimo de resistencia a la fluencia para las tres direcciones.

La diferencia en el comportamiento reside en los valores de reducción más altos porque mientras a 0° se observa un incremento de la resistencia a la fluencia, en los sentidos restantes el valor disminuye. Se concluyo que las causas principales son:

◇ Como la eficiencia del proceso de recocido está controlado por la fuerza motriz de recristalización "nivel de reducción" en el primer escalón solo existe la recuperación y en cambio la recristalización es incompleta.

◇ A grandes deformaciones, el factor controlante es la alineación de los granos, textura, y es por eso la diferencia entre el comportamiento en los diferentes sentidos.

**TABLA 12A.- RESULTADOS EXPERIMENTALES DE RESISTENCIA A LA FLUENCIA DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304, MPa.**

RESISTENCIA A LA FLUENCIA			
52.67 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	316	303	296
2ª	308	304	306
3ª	303	304	298
4ª	309	303	309
MAX	314,4	304,1	308,5
MEDIA	309,0	303,5	302,3
MIN	303,6	302,9	296,0
VAR	28,7	0,3	38,9
STD	5,4	0,6	6,2

RESISTENCIA A LA FLUENCIA			
62.33 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	273	272	257
2ª	268	265	259
3ª	273	266	273
4ª	276	267	261
MAX	275,8	270,6	269,7
MEDIA	272,5	267,5	262,5
MIN	269,2	264,4	255,3
VAR	11,0	9,7	51,7
STD	3,3	3,1	7,2

RESISTENCIA A LA FLUENCIA			
68.00 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	282	273	271
2ª	284	274	267
3ª	274	268	284
4ª	279	273	275
MAX	284,1	274,7	281,5
MEDIA	279,8	272,0	274,3
MIN	275,4	269,3	267,0
VAR	18,9	7,3	52,9
STD	4,3	2,7	7,3

RESISTENCIA A LA FLUENCIA			
76.67 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	290	284	264
2ª	288	278	269
3ª	288	277	270
4ª	291	280	271
MAX	290,8	282,8	271,6
MEDIA	289,3	279,8	268,5
MIN	287,8	276,7	265,4
VAR	2,3	9,6	9,7
STD	1,5	3,1	3,1

RESISTENCIA A LA FLUENCIA			
81.33 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	301	266	252
2ª	283	267	263
3ª	288	270	276
4ª	313	270	250
MAX	309,8	270,3	272,2
MEDIA	296,3	268,3	260,3
MIN	282,8	266,2	248,3
VAR	182,3	4,3	142,9
STD	13,5	2,1	12,0

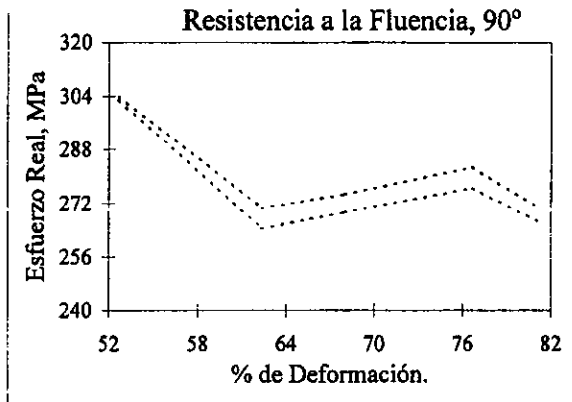
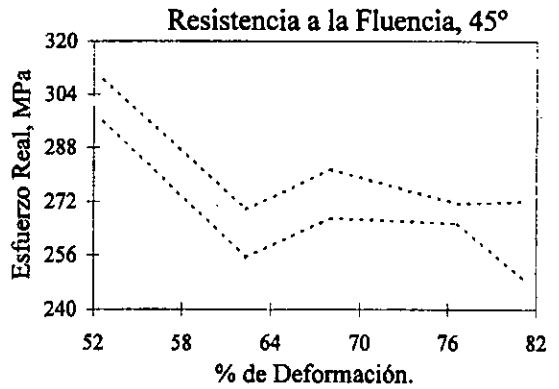
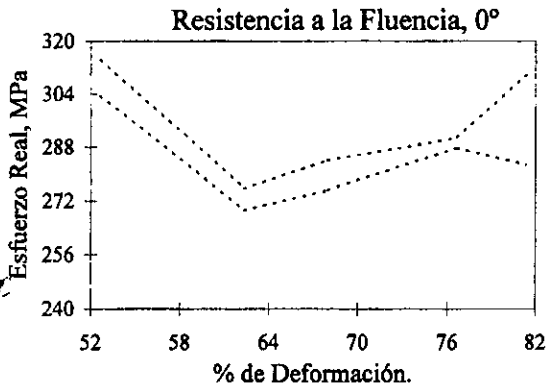


Fig. 45.- El comportamiento de la Resistencia a la Fluencia con relación al porcentaje de deformación en tres sentidos distintos de acuerdo a la dirección de laminado.



**TABLA 12.C.- RESULTADOS EXPERIMENTALES DE PORCENTAJE DE ALARGAMIENTO DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304.**

PORCENTAJE DE ELONGACION.			
52.67 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	54,7	59,6	58,4
2ª	56,3	60,3	58,5
3ª	57,1	59,4	58,2
4ª	56,2	59,4	58,4
MAX	57,1	60,1	58,5
MEDIA	56,1	59,7	58,4
MIN	55,1	59,2	58,2
VAR	1,0	0,2	0,0
STD	1,0	0,4	0,1

PORCENTAJE DE ELONGACION.			
62.33 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	59,4	62,4	61,3
2ª	59,2	62,7	61,8
3ª	56,3	62,2	61,8
4ª	56,6	62,2	60,9
MAX	59,5	62,6	61,9
MEDIA	57,9	62,4	61,5
MIN	56,2	62,1	61,0
VAR	2,7	0,1	0,2
STD	1,7	0,2	0,4

PORCENTAJE DE ELONGACION.			
68.00 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	55,2	62	61
2ª	55,8	63,1	62
3ª	55,7	63,1	62
4ª	56,7	61,7	60,9
MAX	56,5	63,2	62,1
MEDIA	55,9	62,5	61,5
MIN	55,2	61,7	60,9
VAR	0,4	0,5	0,4
STD	0,6	0,7	0,6

PORCENTAJE DE ELONGACION.			
76.67 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	51	62,6	60,2
2ª	49,6	63,3	60,3
3ª	51,1	62,4	59,6
4ª	49,4	62,5	60,3
MAX	51,2	63,1	60,4
MEDIA	50,3	62,7	60,1
MIN	49,4	62,3	59,8
VAR	0,8	0,2	0,1
STD	0,9	0,4	0,3

PORCENTAJE DE ELONGACION.			
81.33 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	51,7	65,9	62,2
2ª	53,2	64,5	68,2
3ª	50,7	66,1	64,8
4ª	50,4	69,2	67
MAX	52,8	68,4	68,2
MEDIA	51,5	66,4	65,6
MIN	50,2	64,4	62,9
VAR	1,6	3,9	7,0
STD	1,3	2,0	2,6

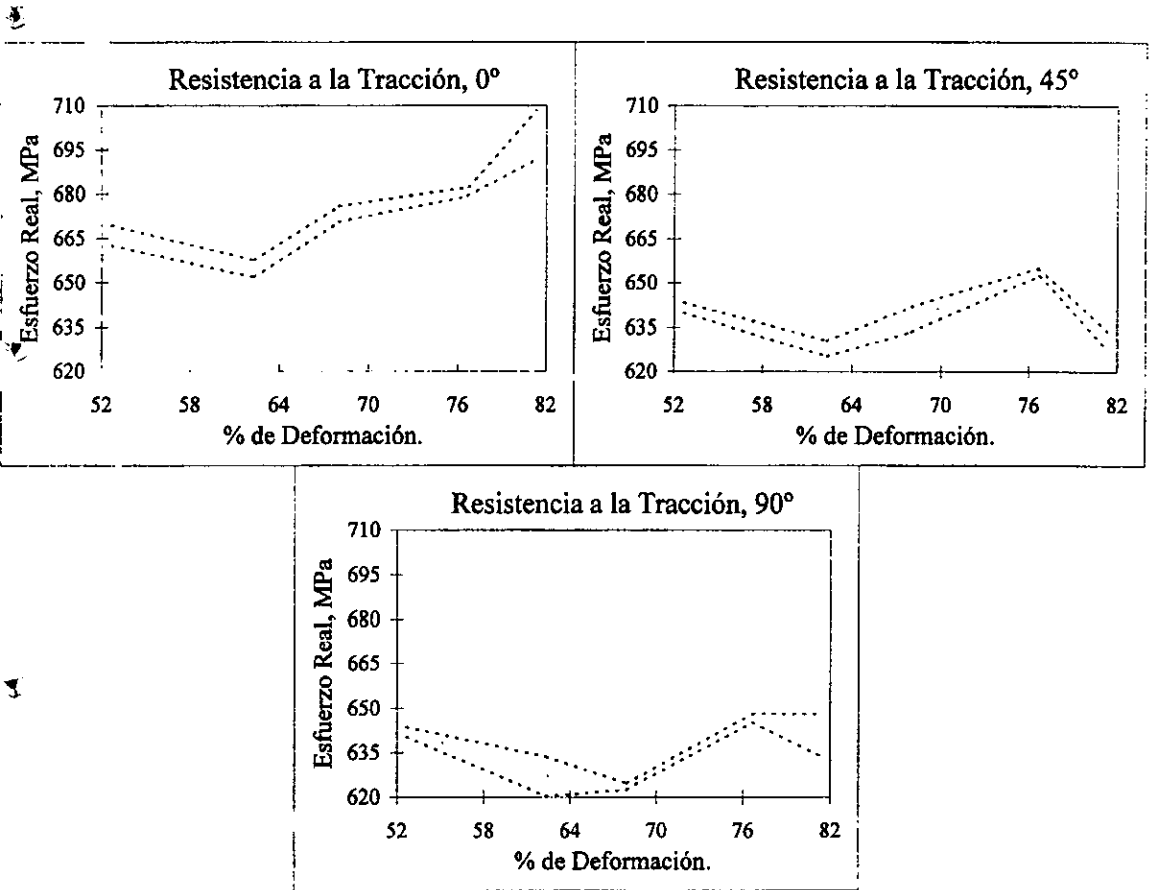


Fig. 46.- El comportamiento de la Resistencia a la Tracción con el porcentaje de deformación en tres sentidos diferentes con respecto a la dirección de laminado.

**TABLA 12.B.- RESULTADOS EXPERIMENTALES DE RESISTENCIA  
A LA TRACCION DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304, MPa.**

RESISTENCIA A LA TENSION			
52.67 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	668	642	640
2ª	668	640	641
3ª	661	642	644
4ª	667	644	642
MAX	669,4	643,6	643,5
MEDIA	666,0	642,0	641,8
MIN	662,6	640,4	640,0
VAR	11,3	2,7	2,9
STD	3,4	1,6	1,7

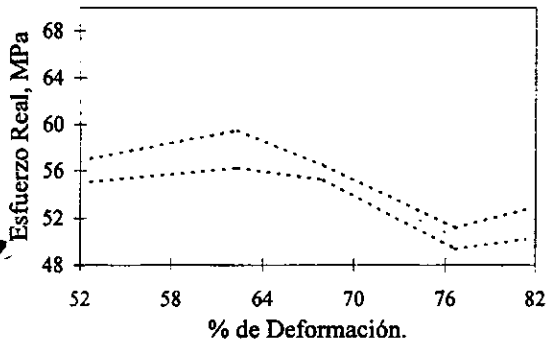
RESISTENCIA A LA TENSION			
62.33 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	651	628	629
2ª	655	636	626
3ª	658	622	625
4ª	655	622	631
MAX	657,6	633,6	630,5
MEDIA	654,8	627,0	627,8
MIN	651,9	620,4	625,0
VAR	8,3	44,0	7,6
STD	2,9	6,6	2,8

RESISTENCIA A LA TENSION			
68.00 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	671	624	638
2ª	675	624	632
3ª	671	622	642
4ª	676	624	639
MAX	675,9	624,5	641,9
MEDIA	673,3	623,5	637,8
MIN	670,6	622,5	633,6
VAR	6,9	1,0	17,6
STD	2,6	1,0	4,2

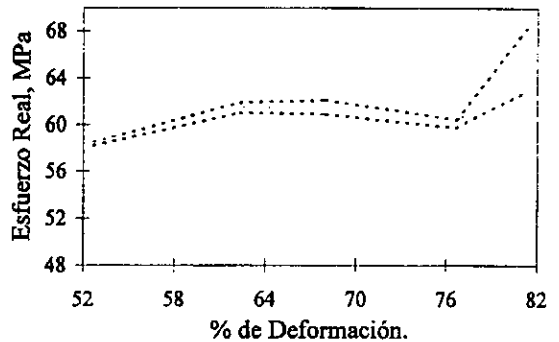
RESISTENCIA A LA TENSION			
76.67 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	679	648	655
2ª	682	648	652
3ª	680	645	654
4ª	682	646	655
MAX	682,3	648,3	655,4
MEDIA	680,8	646,8	654,0
MIN	679,3	645,3	652,6
VAR	2,3	2,3	2,0
STD	1,5	1,5	1,4

RESISTENCIA A LA TENSION			
81.33 % DEFORMACION.			
SENTIDO.	L	T	D
1ª	707	636	631
2ª	699	634	631
3ª	689	645	627
4ª	705	649	634
MAX	708,1	648,2	633,6
MEDIA	700,0	641,0	630,8
MIN	691,9	633,8	627,9
VAR	65,3	51,3	8,3
STD	8,1	7,2	2,9

Porcentaje de Alargamiento, 0°



Porcentaje de Alargamiento, 45°



Porcentaje de Alargamiento, 90°

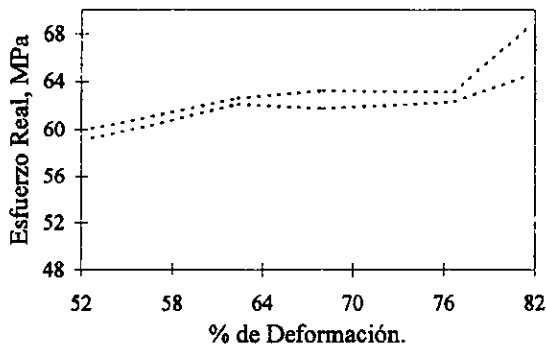


Fig. 47.- La variación del Porcentaje de Alargamiento de acuerdo con el porcentaje de Deformación en los tres sentidos más importantes referentes al sentido de laminación

La tabla 12.B muestra los resultados experimentales de resistencia a la tracción y se grafican en la figura 46.

La resistencia a la tracción tiene un comportamiento semejante al esfuerzo de fluencia

Es más obvia la caída en la resistencia del material cuando la reducción es mayor a 80% en los sentidos diagonal y transversal, y el nivel en general en estos sentidos es aproximadamente un 6% menor.

El porcentaje de alargamiento obviamente vislumbra un comportamiento opuesto a la Resistencia a la Tracción. Tabla 12.C

En la figura 47 es evidente que como en el sentido de laminación el material tiende a presentar una estirabilidad menor, cuya única explicación es la aparición de un componente de textura perjudicial después del recocido.

En el último escalón se observa como el porcentaje de alargamiento del material aumenta en cualquiera de sus direcciones mejorando sin duda la estirabilidad del material.

En las figuras 45, 46 y 47 se observa un cambio de comportamiento en el último punto, 81%, lo cual sugiere una alteración del mecanismo de deformación que puede originar una textura diferente a ese nivel de deformación.

### ***Cálculo de $n$ .***

Los valores de carga y desplazamiento para el cálculo de  $n$  se reportan en la Tabla 13, y el promedio de las pruebas y la desviación estándar en la Tabla 14.

Al analizar el coeficiente de endurecimiento denotamos una igualdad en el comportamiento de las curvas, figura 48, esto comprueba lo dicho por la literatura (1) de que  $n$  no depende de la textura al no variar en los diferentes sentidos de deformación. Los valores oscilan entre 0.375 y 0.42, y hay un aumento aproximado de 8% en el segundo escalón, y después casi se mantiene estable.

En general se puede decir que el coeficiente es independiente a la dirección de laminación que se hable, tabla 14.

### ***Coefficiente de resistencia, K.***

El coeficiente de resistencia, K, denota un comportamiento muy interesante, figura 49. En el sentido transversal, 90°, en los primeros cuatro escalones presenta un nivel mayor a los otros dos sentidos, la diferencia aumenta de 5% al principio hasta 12% a 77% de reducción.

En el último escalon el coeficiente en la dirección transversal sufre una caída de un 10% tal vez por la aparición de algún componenete de textura no deseado.

En el sentido diagonal el coeficiente permanece estable en todo el rango, pero en el sentido longitudinal en el último escalón coincidentemente aparece un incremento en el valor de K de 17%, pór la aparición del mismo componente de textura que modifíco el sentido longitudinal.

**TABLA 13.A.- RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE " n "**

<b>SENTIDO LONGITUDINAL 52,67 % DE DEFORMACION EN FRIO</b>									
	<b>TESTIGO UNO</b>		<b>TESTIGO DOS</b>		<b>TESTIGO TRES</b>		<b>TESTIGO CUATRO</b>		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,75	7071,40	51,98	7025,70	51,68	6860,30	51,80	6993,20	
	55,22	8645,10	55,38	8624,70	55,15	8425,50	55,18	8508,60	
	58,45	9816,40	58,92	9873,50	59,14	9827,80	58,74	9771,90	
	62,02	10716,00	62,50	10764,00	62,53	10661,00	62,93	10855,00	
	65,86	11375,00	66,59	11388,00	66,41	11311,00	66,58	11426,00	
	69,60	11861,00	69,85	11852,00	70,28	11790,00	70,33	11859,00	
	73,31	12223,00	73,60	12154,00	74,00	12135,00	73,67	12151,00	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
<b>n</b>	0,374	0,028	0,393	0,025	0,378	0,028	0,383	0,027	
<b>K, MPa</b>	1334,5	4,2	1370,1	56,5	1337,9	56,9	1355,1	56,8	

<b>SENTIDO DIAGONAL 52,67 % DE DEFORMACION EN FRIO</b>									
	<b>TESTIGO UNO</b>		<b>TESTIGO DOS</b>		<b>TESTIGO TRES</b>		<b>TESTIGO CUATRO</b>		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,56	7062,40	51,64	6903,60	51,83	7004,60	51,79	6958,90	
	55,07	8708,30	55,08	8485,70	55,36	8678,80	55,30	8480,90	
	58,84	9974,60	58,80	9814,60	59,20	9970,20	58,68	9756,20	
	62,75	10882,00	62,50	10683,00	62,85	10802,00	62,63	10674,00	
	66,60	11521,00	65,49	11297,00	66,61	11390,00	66,42	11338,00	
	70,14	11962,00	69,57	11805,00	70,05	11796,00	70,16	11775,00	
	74,44	12281,00	73,30	12112,00	73,84	12101,00	73,96	12071,00	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
<b>n</b>	0,361	0,028	0,372	0,028	0,380	0,025	0,381	0,028	
<b>K, MPa</b>	1327,3	56,7	1324,3	56,6	1341,3	56,4	1344,0	56,9	

<b>SENTIDO TRANSVERSAL 52,67 % DE DEFORMACION EN FRIO</b>									
	<b>TESTIGO UNO</b>		<b>TESTIGO DOS</b>		<b>TESTIGO TRES</b>		<b>TESTIGO CUATRO</b>		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,69	7295,20	52,00	7263,90	51,72	7186,90	51,86	7224,80	
	54,87	8893,60	55,47	8873,10	55,16	8826,20	55,48	9081,30	
	58,23	10196,00	58,15	10011,00	58,35	10245,00	58,60	10263,00	
	61,33	11107,00	61,25	10987,00	61,69	11117,00	61,61	11127,00	
	64,25	11679,00	64,75	11713,00	65,01	11805,00	65,52	11885,00	
	67,88	12207,00	68,39	12221,00	68,55	12329,00	69,27	12426,00	
	71,29	12678,00	71,74	12574,00	72,24	12684,00	72,88	12738,00	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
<b>n</b>	0,370	0,027	0,398	0,027	0,382	0,028	0,392	0,025	
<b>K, MPa</b>	1391,1	56,9	1433,6	56,9	1407,7	56,6	1428,3	56,4	

TABLA 13.B.- RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE " n "

SENTIDO LONGITUDINAL 62,33 % DE DEFORMACION EN FRIO										
	TESTIGO UNO			TESTIGO DOS			TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO	
	Area mm2	14,629		Area mm2	14,602		Area mm2	14,963	Area mm2	14,665
	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00
	51,77	5228,80	51,71	5383,40	51,90	5221,00	51,26	4509,30		
	55,25	6467,40	55,27	6824,20	55,16	6383,80	53,18	5796,70		
	58,84	7540,60	58,94	7984,00	58,75	7469,60	56,85	6930,60		
	62,62	8266,70	62,58	8793,10	62,48	8195,10	60,83	7907,60		
	66,44	8766,00	66,72	9373,60	66,02	8684,80	64,79	8550,10		
	70,01	9156,50	70,79	9770,70	70,56	9146,20	69,01	9006,70		
	73,84	9415,70	74,61	10014,00	74,59	9404,30	73,09	9324,90		
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.
n	0,394	0,028	0,404	0,027	0,406	0,028	0,396	0,020		
K, MPa	1306,0	70,1	1408,1	5,3	1291,5	68,6	1293,0	69,4		

SENTIDO DIAGONAL 62,33 % DE DEFORMACION EN FRIO										
	TESTIGO UNO			TESTIGO DOS			TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO	
	Area mm2	14,366		Area mm2	14,541		Area mm2	14,618	Area mm2	14,373
	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00
	51,90	5271,20	51,83	5221,00	51,81	5248,00	52,06	5198,70		
	55,49	6499,90	55,92	6585,30	55,30	6563,10	56,93	6875,90		
	59,02	7523,80	59,71	7591,20	58,87	7565,30	60,10	7680,20		
	62,69	8246,90	63,64	8278,20	62,28	8281,80	63,42	8260,70		
	66,77	8757,60	67,60	8794,30	66,05	8824,40	66,85	8704,10		
	70,75	9158,90	71,67	9170,30	70,14	9248,50	70,76	9085,50		
	74,96	9453,00	75,97	9444,60	73,88	9543,90	74,20	9371,80		
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.
n	0,403	0,028	0,399	0,030	0,400	0,028	0,412	0,026		
K, MPa	1342,5	71,5	1315,2	70,6	1329,7	70,2	1347,1	71,3		

SENTIDO TRANSVERSAL 62,33 % DE DEFORMACION EN FRIO										
	TESTIGO UNO			TESTIGO DOS			TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO	
	Area mm2	14,523		Area mm2	14,691		Area mm2	14,696	Area mm2	14,664
	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00
	50,86	4994,20	51,69	5512,70	51,64	5432,10	51,99	5533,20		
	53,17	6033,70	55,07	6968,50	55,14	6879,50	55,31	6958,90		
	59,71	8307,60	58,62	8135,60	58,69	8089,90	59,23	8145,80		
	63,29	9030,70	62,17	8951,90	62,14	8890,60	62,80	8931,50		
	66,39	9452,40	65,81	9513,80	65,98	9478,90	66,55	9488,00		
	70,22	9826,60	69,46	9925,30	69,99	9881,30	70,32	9863,90		
	74,21	10082,00	73,45	10217,00	73,38	10155,00	73,92	10192,00		
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.
n	0,351	0,030	0,399	0,026	0,400	0,028	0,420	0,023		
K, MPa	1333,4	70,5	1423,5	69,7	1412,9	69,8	1455,1	69,7		



TABLA 13.C.- RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE " n "

SENTIDO LONGITUDINAL 68 % DE DEFORMACION EN FRIO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	12,361	Area mm2	12,390	Area mm2	12,448	Area mm2	12,425	
	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,13	4275,30	51,69	4450,40	51,74	4520,80	51,93	4491,90	
	55,00	5595,20	55,40	5566,90	55,30	5609,60	55,35	5566,30	
	60,48	6752,20	59,08	6466,80	58,86	6476,50	58,86	6442,80	
	64,14	7306,60	62,68	7079,80	62,42	7084,60	62,43	7064,80	
	67,22	7646,50	66,33	7542,30	66,15	7516,00	66,26	7515,40	
	71,10	7929,20	70,52	7849,20	69,93	7843,20	69,95	7813,70	
	74,20	8121,10	74,42	8073,20	74,13	8083,20	73,64	8051,40	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,353	0,029	0,391	0,029	0,388	0,028	0,405	0,026	
K, MPa	1265,1	82,8	1313,7	82,9	1306,8	82,4	1336,0	84,2	

SENTIDO DIAGONAL 68 % DE DEFORMACION EN FRIO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	12,369	Area mm2	12,385	Area mm2	12,321	Area mm2	12,280	
	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	54,86	5373,80	51,70	4532,20	51,79	4526,70	51,73	4493,70	
	58,04	6309,20	55,36	5639,70	55,35	5571,10	55,11	5542,80	
	61,22	6915,80	59,05	6507,10	58,72	6429,50	59,05	6451,80	
	65,09	7434,20	62,50	7114,10	62,83	7056,40	62,50	7075,00	
	69,14	7829,40	66,16	7571,30	65,92	7506,90	66,35	7535,20	
	72,98	8110,90	69,90	7912,40	69,77	7849,80	70,24	7858,30	
	76,86	8294,40	73,91	8154,20	73,31	8079,00	73,90	8104,90	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,502	0,011	0,387	0,030	0,393	0,029	0,391	0,029	
K, MPa	1549,7	81,9	1318,4	83,0	1323,6	83,4	1328,9	83,6	

SENTIDO TRANSVERSAL 68 % DE DEFORMACION EN FRIO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	12,553	Area mm2	12,665	Area mm2	12,588	Area mm2	12,439	
	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	Long. mm.	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,65	4792,70	51,78	5071,20	51,66	4822,70	52,02	5133,80	
	55,30	6237,60	55,37	6313,40	55,28	6239,20	55,39	6248,50	
	58,88	7194,70	59,09	7260,90	59,45	7201,90	58,96	7187,50	
	62,54	7913,00	62,92	7898,60	63,74	8087,50	63,12	7907,00	
	66,39	8393,70	66,78	8373,80	66,93	8347,90	66,08	8266,10	
	70,61	8746,20	70,42	8711,50	69,59	8591,00	69,43	8544,10	
	75,27	8970,60	74,79	8895,40	73,64	8866,50	73,28	8774,50	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,399	0,024	0,384	0,026	0,391	0,024	0,392	0,024	
K, MPa	1463,5	81,4	1417,4	80,8	1432,5	81,2	1444,2	82,3	

**TABLA 13.D.- RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE " n "**

SENTIDO LONGITUDINAL 76,67 % DE DEFORMACION EN FRIO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,64	3333,30	51,84	3315,80	51,70	3274,90	51,69	3205,70	
	55,15	4120,70	55,42	4106,90	55,07	4051,50	54,49	3856,00	
	58,86	4766,80	58,65	4729,50	58,92	4684,40	57,39	4436,50	
	62,31	5195,70	62,57	5188,20	62,23	5123,50	60,53	4899,77	
	66,09	5520,60	66,44	5518,20	65,98	5450,80	65,12	5356,90	
	69,83	5852,60	70,33	5763,60	69,86	5693,80	69,40	5658,90	
	73,88	5934,40	74,24	5941,10	73,33	5861,00	73,92	5868,30	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,380	0,297	0,398	0,028	0,385	0,028	0,396	0,029	
K, MPa	1337,4	115,9	1352,9	114,9	1334,1	116,6	1340,7	116,3	

SENTIDO DIAGONAL 76,67 % DE DEFORMACION EN FRIO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,11	3045,70	51,71	3213,50	51,85	3286,30	51,40	3090,20	
	54,29	3842,80	55,30	4056,90	54,58	3885,50	54,95	3966,70	
	57,88	4563,50	58,94	4743,90	56,89	4432,90	57,84	4598,40	
	61,84	5094,60	62,71	5202,90	60,42	4991,20	61,02	5044,10	
	65,43	5442,40	66,28	5524,80	63,58	5327,50	63,84	5329,90	
	69,37	5681,20	70,29	5762,40	67,17	5623,40	67,33	5619,20	
	73,07	5852,00	75,80	5985,00	71,05	5834,60	70,63	5799,70	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,358	0,031	0,402	0,028	0,400	0,028	0,377	0,028	
K, MPa	1281,9	116,6	1378,8	116,4	1353,1	116,0	1291,0	114,8	

SENTIDO TRANSVERSAL 76,67 % DE DEFORMACION EN FRIO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,84	3553,40	51,92	3459,00	51,70	3472,20	51,86	3457,20	
	56,58	4707,80	55,20	4389,60	54,27	4159,20	55,73	4629,60	
	59,85	5355,10	58,85	5143,40	57,88	5015,20	59,13	5221,00	
	63,65	5801,50	62,83	5658,30	61,83	5515,10	62,94	5731,10	
	67,45	6111,30	66,11	5992,80	65,62	5942,30	66,76	6062,60	
	70,16	6284,00	69,70	6217,80	69,08	6180,50	70,26	6286,30	
	71,13	6413,90	72,25	6329,70	73,73	6348,30	73,28	6398,30	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,399	0,025	0,416	0,021	0,398	0,025	0,411	0,019	
K, MPa	1490,9	115,5	1509,7	115,1	1462,9	114,8	1507,2	114,2	

TABLA 13.E.- RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE " n "

SENTIDO LONGITUDINAL 81,33 % DE DEFORMACION EN FRIJO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	51,68	2880,90	51,93	2987,30	51,94	2919,40	51,81	2904,90	
	55,12	3670,70	55,50	3786,80	55,30	3690,60	55,60	3773,60	
	58,16	4203,50	59,23	4407,10	59,08	4330,10	58,97	4347,50	
	61,86	4687,40	62,68	4809,50	62,77	4740,90	62,84	4790,30	
	65,45	5004,40	66,29	5080,20	66,42	5014,00	66,47	5065,80	
	69,60	5236,60	69,98	5266,70	69,95	5204,10	69,80	5245,60	
	73,20	5369,60	73,65	5396,60	73,85	5342,50	74,33	5391,80	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,402	0,026	0,409	0,023	0,415	0,025	0,410	0,023	
K, MPa	1514,6	140,5	1531,4	139,0	1533,6	139,9	1501,0	136,8	

SENTIDO DIAGONAL 81,33 % DE DEFORMACION EN FRIJO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	52,76	2932,50	52,09	2735,30	51,83	2756,80	51,85	2803,90	
	54,73	3146,20	55,63	3357,30	55,36	3416,20	55,30	3466,80	
	57,85	3574,50	59,75	3960,70	59,20	3998,50	58,86	4040,10	
	61,47	3955,90	63,33	4327,60	62,85	4403,50	62,82	4440,10	
	65,16	4228,40	66,88	4560,50	66,61	4657,10	66,43	4701,80	
	68,69	4416,70	70,51	4721,10	70,05	4856,00	70,32	4896,70	
	72,52	4570,70	74,36	4867,90	73,60	5049,30	76,64	5059,20	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,404	0,027	0,416	0,026	0,404	0,028	0,402	0,028	
K, MPa	1299,9	141,5	1324,7	133,9	1371,4	137,0	1372,2	136,0	

SENTIDO TRANSVERSAL 81,33 % DE DEFORMACION EN FRIJO									
	TESTIGO UNO		TESTIGO DOS		TESTIGO TRES		TESTIGO CUATRO		
	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	Area mm2	Carga N.	
	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	
	52,38	2949,40	51,85	2838,80	51,89	2807,50	51,77	2817,10	
	55,83	3492,10	55,04	3469,20	55,48	3487,90	55,66	3543,20	
	59,25	3971,50	58,12	3948,70	59,16	4058,70	59,57	4097,20	
	62,70	4333,10	60,72	4265,10	62,92	4447,40	63,56	4464,20	
	66,43	4606,20	64,45	4601,40	66,80	4722,90	67,31	4742,70	
	70,17	4802,30	68,31	4866,70	70,49	4940,60	71,96	4955,10	
	73,97	4961,10	70,94	4984,60	74,92	5097,10	75,88	5105,50	
	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	Valor	Desv. Std.	
n	0,411	0,027	0,391	0,028	0,407	0,028	0,395	0,029	
K, MPa	1382,5	138,3	1333,9	135,2	1375,1	135,1	1376,6	137,3	

14  
TABLA 14.- RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA EL  
CALCULO DEL COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO " n "

	SENTIDO LONGITUDINAL														
	52.67 %			62.33 %			68.00%			76.67 %			81.33 %		
	n	k	n	n	k	n	n	k	n	n	k	n	n	k	n
1*	0,37431	1334,5	0,39448	1306,0	0,35309	1265,1	0,38000	1337,4	0,40234	1514,6					
2*	0,39330	1370,1	0,40370	1408,1	0,39076	1313,7	0,39762	1352,9	0,40911	1531,4					
3*	0,37847	1337,9	0,40587	1291,5	0,38814	1306,8	0,38475	1334,1	0,41520	1533,6					
4*	0,38310	1355,1	0,39551	1293,0	0,40548	1336,0	0,39623	1340,7	0,40980	1501,0					
MAX	0,39046	1365,9	0,40492	1304,8	0,40657	1335,0	0,39829	1349,5	0,41438	1535,5					
MEDIA	0,38230	1349,4	0,39862	1296,8	0,38437	1305,4	0,38965	1341,3	0,40911	1520,1					
MIN	0,37413	1332,9	0,39231	1288,9	0,36216	1275,8	0,38101	1333,0	0,40384	1504,8					
VAR	0,00007	271,1	0,00004	63,1	0,00049	877,9	0,00007	67,6	0,00003	234,9					
STD.	0,00817	16,5	0,00630	7,9	0,02220	29,6	0,00864	8,2	0,00527	15,3					

	SENTIDO DIAGONAL														
	52.67 %			62.33 %			68.00%			76.67 %			81.33 %		
	n	k	n	n	k	n	n	k	n	n	k	n	n	k	n
1*	0,36130	1327,3	0,40280	1342,5	0,50249	1549,7	0,35839	1281,9	0,40350	1299,9					
2*	0,37203	1324,3	0,39943	1315,2	0,38692	1318,4	0,40163	1378,8	0,41551	1324,7					
3*	0,38005	1341,3	0,40032	1329,7	0,39259	1323,6	0,40003	1353,1	0,40436	1371,4					
4*	0,38133	1344,0	0,41227	1347,1	0,39086	1328,9	0,37728	1291,0	0,40236	1372,2					
MAX	0,38290	1344,1	0,40959	1348,0	0,39303	1328,8	0,40660	1386,1	0,41254	1377,9					
MEDIA	0,37368	1334,2	0,40370	1333,6	0,39012	1323,6	0,39298	1341,0	0,40644	1342,1					
MIN	0,36446	1324,4	0,39782	1319,3	0,38722	1318,4	0,37936	1295,8	0,40033	1306,2					
VAR	0,00009	97,0	0,00003	205,7	0,00001	27,3	0,00019	2038,4	0,00004	1284,0					
STD.	0,00922	9,8	0,00589	14,3	0,00290	5,2	0,01362	45,1	0,00611	35,8					

	SENTIDO TRANSVERSAL														
	52.67 %			62.33 %			68.00%			76.67 %			81.33 %		
	n	k	n	n	k	n	n	k	n	n	k	n	n	k	n
1*	0,37018	1391,1	0,35095	1333,4	0,39904	1463,5	0,39902	1490,9	0,41090	1382,5					
2*	0,39811	1433,6	0,39948	1423,5	0,38417	1417,4	0,41560	1509,7	0,39140	1333,9					
3*	0,38242	1407,7	0,39959	1412,9	0,39113	1432,5	0,39823	1462,9	0,40694	1375,1					
4*	0,39702	1428,3	0,42044	1455,1	0,39211	1444,2	0,41142	1507,2	0,39495	1376,6					
MAX	0,39787	1434,7	0,41857	1452,5	0,39769	1458,9	0,41484	1514,2	0,41040	1389,3					
MEDIA	0,38568	1415,2	0,40650	1430,5	0,39161	1439,4	0,40607	1492,7	0,40105	1367,0					
MIN	0,37349	1395,6	0,39444	1408,5	0,38553	1420,0	0,39730	1471,1	0,39170	1344,7					
VAR	0,00015	382,3	0,00015	482,7	0,00004	377,9	0,00008	464,1	0,00009	497,6					
STD.	0,01219	19,6	0,01207	22,0	0,00608	19,4	0,00077	21,5	0,00935	22,3					

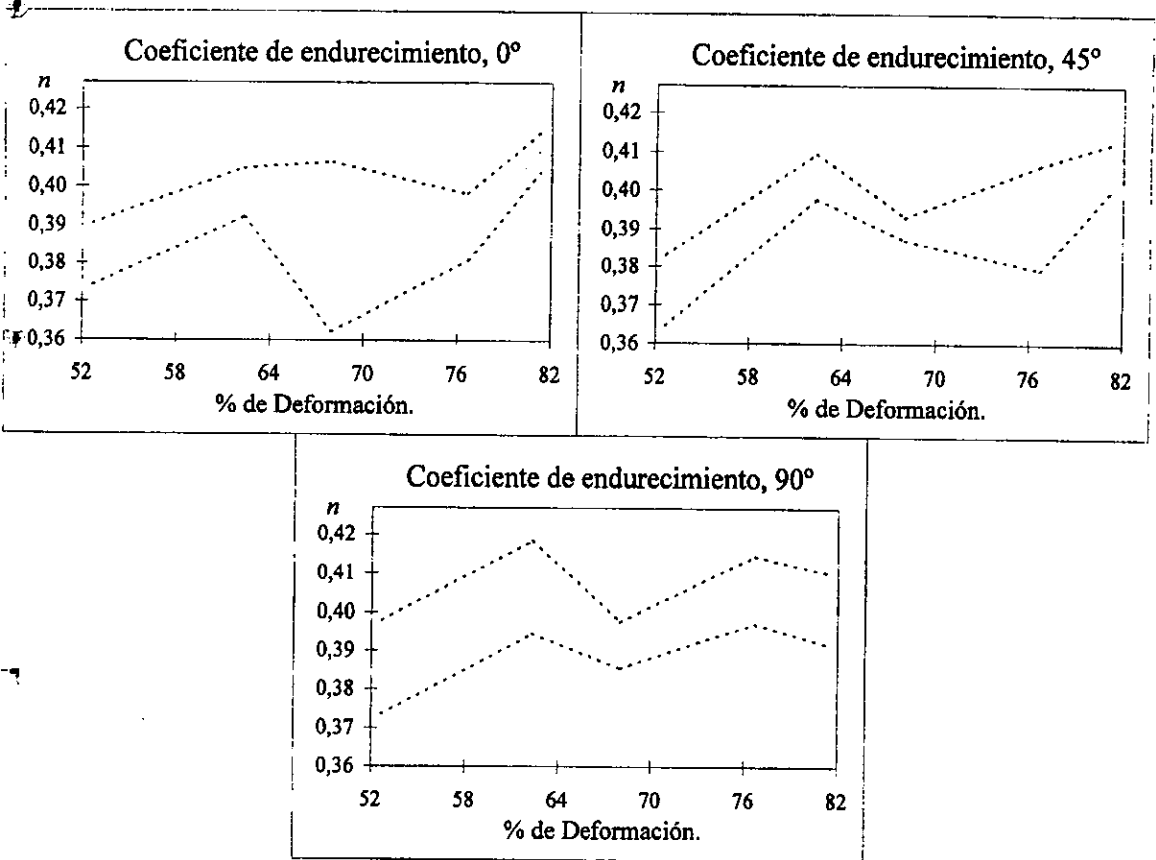
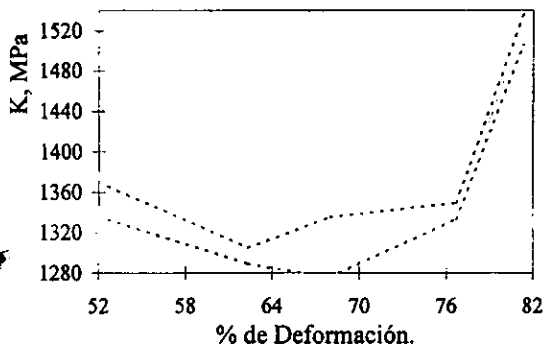
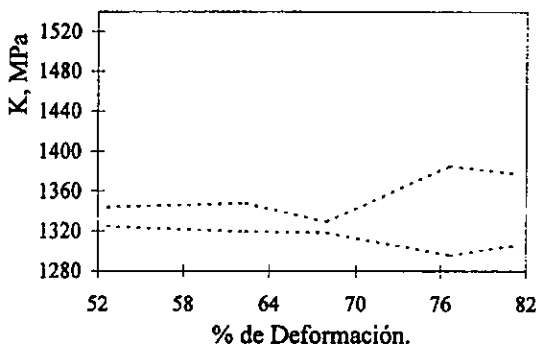


Fig. 48.- El comportamiento del Coeficiente de Endurecimiento con el porcentaje de deformación en tres sentidos diferentes con respecto a la dirección de laminado.

Coefficiente de Resistencia, 0°



Coefficiente de Resistencia, 45°



Coefficiente de Resistencia, 90°

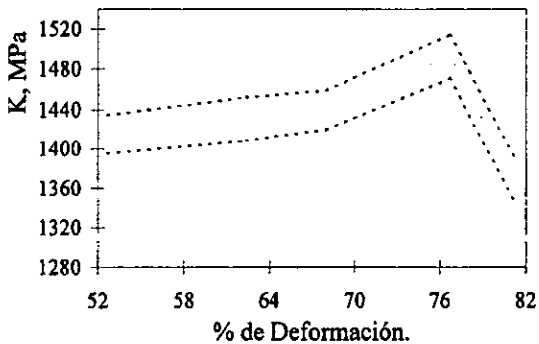


Fig. 49.- El comportamiento del Coeficiente de Resistencia K con relación al porcentaje de deformación en tres sentidos distintos de acuerdo a la dirección de laminado.

Para calcular la anisotropía se necesitaron mediciones iniciales y finales de ancho y longitud de las probetas para medir la deformación en estos dos sentidos, tabla 15.

En la tabla 16 se calcula la anisotropía promedio y  $\Delta r$  para cada escalón.

La anisotropía es el parámetro indicador de la embutibilidad del material, y su dependencia con la textura es importante, como en este estudio no se tuvo acceso a mediciones de textura y modelos para la plasticidad anisotrópica de materiales policristalinos, será de utilidad su análisis para comprender en verdad como se afectó la textura en la deformación en frío.

Para el sentido longitudinal, figura 51.A, se muestra el alcance del valor de  $r_{prom}$  máximo a 66 % de reducción y una disminución de sus valores a mayor y menor deformación pero a 77% vuelve a mostrar un aumento en su valor.

El sentido transversal muestra un nivel uniforme a lo largo de todo el rango de estudio, pero en el sentido diagonal la uniformidad solo se mantiene hasta 66% donde el valor se eleva súbitamente hasta 1.4.

En el sentido longitudinal excepto en el rango entre 60 y 70% hay una estabilidad pero el valor de anisotropía es muy bajo.

Como consecuencia, el valor de anisotropía promedio muestra una tendencia a incrementar su valor que es más significativa a medida que aumenta la reducción, figura 51.A, al incrementarse el ordenamiento de los planos y provocar una gran variación en el valor  $r_{45}$ .

El valor de  $\Delta r$  es un indicador de la diferencia existente entre la anisotropía en los diferentes sentidos y también nos previene de la aparición de orejas durante el proceso. Se recomienda que el valor sea aproximadamente de cero, lo cual sucede en los intervalos de 50-60% y 68-72% de reducción, figura 51.B, valores diferentes causarían un desperdicio

de material, pero, se puede especificar entre estos dos rangos de deformación el valor de  $\bar{r}$  es muy similar, de 0.89 a 52% y 0.92 a 66%.

La posible explicación de los valores obtenidos, es la siguiente:

A reducciones mínimas la textura de recristalización no se ha alterado en gran medida, lo cual se comprueba en los valores de anisotropía, figura 50, y por eso es posible observar un aumento paulatino de validez sólo en la dirección de laminación, pero a partir aproximadamente del 70% existe un gran cambio debido a que la textura preferencial del material empieza a sufrir una alteración significativa y se diría que existe una variación de textura importante que se lleva a cabo en el sentido diagonal a 82% de deformación, y es por eso que a 0° se obtienen al final el mismo valor inicial de  $\bar{r}$ , aproximadamente 0.9, porque ha cambiado la orientación preferencial del acero.



TABLA 15.A.-RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE ANISOTROPIA.

52,67 % DEFORMACION.

62,33 % DEFORMACION.

SENTIDO LONGITUDINAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,627	10,663	72,43	0,839
2ª	12,593	10,620	72,66	0,838
3ª	12,540	10,547	73,55	0,813
4ª	12,537	10,577	73,52	0,789
5ª	12,533	10,510	73,81	0,825
MAX	12,608	10,643	73,803	0,841
MEDIA	12,566	10,583	73,194	0,821
MIN	12,524	10,523	72,585	0,800
VAR.	0,002	0,004	0,370	0,000
STD.	0,042	0,060	0,609	0,021

SENTIDO LONGITUDINAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,727	10,523	72,71	1,032
2ª	12,737	10,670	70,64	1,051
3ª	12,753	10,570	71,82	1,077
4ª	12,607	10,453	71,54	1,097
5ª	12,720	10,520	71,94	1,092
MAX	12,767	10,628	72,478	1,090
MEDIA	12,7088	10,547	71,730	1,070
MIN	12,651	10,467	70,982	1,049
VAR.	0,003	0,006	0,559	0,000
STD.	0,058	0,080	0,748	0,021

SENTIDO DIAGONAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,570	10,577	71,91	0,905
2ª	12,577	10,570	72,11	0,904
3ª	12,560	10,467	72,88	0,937
4ª	12,543	10,467	73,50	0,886
5ª	12,583	10,477	73,52	0,905
MAX	12,582	10,568	73,539	0,928
MEDIA	12,5666	10,512	72,784	0,907
MIN	12,551	10,455	72,029	0,887
VAR.	0,000	0,003	0,570	0,000
STD.	0,016	0,057	0,755	0,021

SENTIDO DIAGONAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,560	10,670	71,58	0,833
2ª	12,560	10,670	71,06	0,866
3ª	12,567	10,670	72,15	0,806
4ª	12,597	10,680	71,52	0,856
5ª	12,583	10,643	71,79	0,862
MAX	12,590	10,680	72,018	0,865
MEDIA	12,5734	10,667	71,620	0,844
MIN	12,557	10,653	71,222	0,824
VAR.	0,000	0,000	0,159	0,000
STD.	0,016	0,014	0,398	0,021

SENTIDO TRANSVERSAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,627	10,663	70,88	0,940
2ª	12,627	10,550	73,05	0,901
3ª	12,640	10,470	73,30	0,970
4ª	12,600	10,530	73,14	0,893
5ª	12,607	10,553	73,14	0,878
MAX	12,637	10,623	73,725	0,937
MEDIA	12,6202	10,553	72,702	0,916
MIN	12,604	10,483	71,679	0,896
VAR.	0,000	0,005	1,046	0,000
STD.	0,016	0,070	1,023	0,021

SENTIDO TRANSVERSAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,720	10,687	72,51	0,882
2ª	12,720	10,700	72,16	0,892
3ª	12,667	10,550	71,83	1,019
4ª	12,693	10,680	72,60	0,862
5ª	12,710	10,643	71,60	0,977
MAX	12,724	10,713	72,569	0,947
MEDIA	12,702	10,652	72,140	0,926
MIN	12,680	10,591	71,711	0,906
VAR.	0,001	0,004	0,184	0,000
STD.	0,022	0,061	0,429	0,021

TABLA 15.B.-RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE ANISOTROPIA.

68,00 % DEFORMACION.

SENTIDO LONGITUDINAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,743	10,663	71,98	0,957
2ª	12,760	10,463	72,60	1,138
3ª	12,550	10,443	72,85	0,954
4ª	12,770	10,517	71,69	1,168
5ª	12,777	10,473	72,63	1,139
MAX	12,816	10,601	72,841	1,092
MEDIA	12,72	10,512	72,350	1,071
MIN	12,624	10,423	71,859	1,051
VAR.	0,009	0,008	0,241	0,000
STD.	0,096	0,089	0,491	0,021

SENTIDO DIAGONAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,660	10,723	71,68	0,855
2ª	12,677	10,720	71,00	0,916
3ª	12,673	10,727	71,84	0,852
4ª	12,670	10,577	71,38	1,029
5ª	12,583	10,477	73,52	0,905
MAX	12,692	10,758	72,853	0,932
MEDIA	12,6526	10,645	71,884	0,912
MIN	12,613	10,532	70,915	0,891
VAR.	0,002	0,013	0,939	0,000
STD.	0,039	0,113	0,969	0,021

SENTIDO TRANSVERSAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,793	10,660	72,77	0,946
2ª	12,810	10,720	72,20	0,941
3ª	12,783	10,657	72,68	0,947
4ª	12,787	10,683	72,44	0,941
5ª	12,770	10,703	71,88	0,947
MAX	12,803	10,712	72,757	0,965
MEDIA	12,7886	10,685	72,394	0,944
MIN	12,774	10,657	72,031	0,924
VAR.	0,000	0,001	0,132	0,000
STD.	0,015	0,027	0,363	0,021

76,67 % DEFORMACION.

SENTIDO LONGITUDINAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,633	10,703	72,23	0,821
2ª	12,633	10,820	72,46	0,717
3ª	12,643	10,807	70,52	0,839
4ª	12,687	10,847	71,67	0,771
5ª	12,690	10,750	72,27	0,819
MAX	12,686	10,843	72,619	0,814
MEDIA	12,6572	10,785	71,830	0,793
MIN	12,628	10,727	71,041	0,773
VAR.	0,001	0,003	0,623	0,000
STD.	0,029	0,058	0,789	0,021

SENTIDO DIAGONAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,577	10,320	72,45	1,143
2ª	12,593	10,343	71,84	1,189
3ª	12,600	10,240	73,39	1,176
4ª	12,620	10,323	73,13	1,120
5ª	12,637	10,330	72,61	1,175
MAX	12,629	10,352	73,290	1,181
MEDIA	12,6054	10,311	72,684	1,161
MIN	12,582	10,270	72,078	1,140
VAR.	0,001	0,002	0,367	0,000
STD.	0,023	0,041	0,606	0,021

SENTIDO TRANSVERSAL				
	ANCHO INICIAL, mm.	ANCHO FINAL, mm.	LONGITUD FINAL, mm.	ANISOTROPIA
1ª PRUEBA.	12,620	10,557	73,25	0,878
2ª	12,657	10,567	70,46	1,110
3ª	12,600	10,560	72,96	0,878
4ª	12,637	10,503	73,01	0,955
5ª	12,633	10,583	72,73	0,896
MAX	12,651	10,584	73,627	0,964
MEDIA	12,6294	10,554	72,482	0,943
MIN	12,608	10,524	71,337	0,923
VAR.	0,000	0,001	1,312	0,000
STD.	0,021	0,030	1,145	0,021

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

**TABLA 15.C.-RESULTADOS EXPERIMENTALES  
PARA EL CALCULO DE ANISOTROPIA.**

81,33 % DEFORMACION.

SENTIDO LONGITUDINAL				
	ANCHO		LONGITUD	ANISOTROPIA
	INICIAL, mm.	FINAL, mm.	FINAL, mm.	
1ª PRUEBA.	12,633	10,767	71,85	0,788
2ª	12,603	10,873	69,27	0,828
3ª	12,600	10,760	70,96	0,821
4ª	12,600	10,727	71,64	0,810
5ª	12,583	10,717	71,70	0,803
MAX	12,622	10,831	72,154	0,831
MEDIA	12,6038	10,769	71,084	0,810
MIN	12,586	10,707	70,014	0,789
VAR.	0,000	0,004	1,145	0,000
STD.	0,018	0,062	1,070	0,021

SENTIDO DIAGONAL				
	ANCHO		LONGITUD	ANISOTROPIA
	INICIAL, mm.	FINAL, mm.	FINAL, mm.	
1ª PRUEBA.	12,650	10,237	71,74	1,417
2ª	12,597	10,143	72,00	1,464
3ª	12,657	10,230	72,42	1,351
4ª	12,660	10,273	71,59	1,393
5ª	12,667	10,207	72,18	1,428
MAX	12,674	10,266	72,319	1,431
MEDIA	12,6462	10,218	71,986	1,411
MIN	12,618	10,170	71,653	1,390
VAR.	0,001	0,002	0,111	0,000
STD.	0,028	0,048	0,333	0,021

SENTIDO TRANSVERSAL				
	ANCHO		LONGITUD	ANISOTROPIA
	INICIAL, mm.	FINAL, mm.	FINAL, mm.	
1ª PRUEBA.	12,630	10,517	73,18	0,926
2ª	12,623	10,493	72,10	1,020
3ª	12,607	10,533	72,15	0,961
4ª	12,617	10,527	72,83	0,929
5ª	12,623	10,677	69,70	1,016
MAX	12,629	10,622	73,352	0,991
MEDIA	12,62	10,549	71,992	0,970
MIN	12,611	10,476	70,632	0,950
VAR.	0,000	0,005	1,851	0,000
STD.	0,009	0,073	1,360	0,021

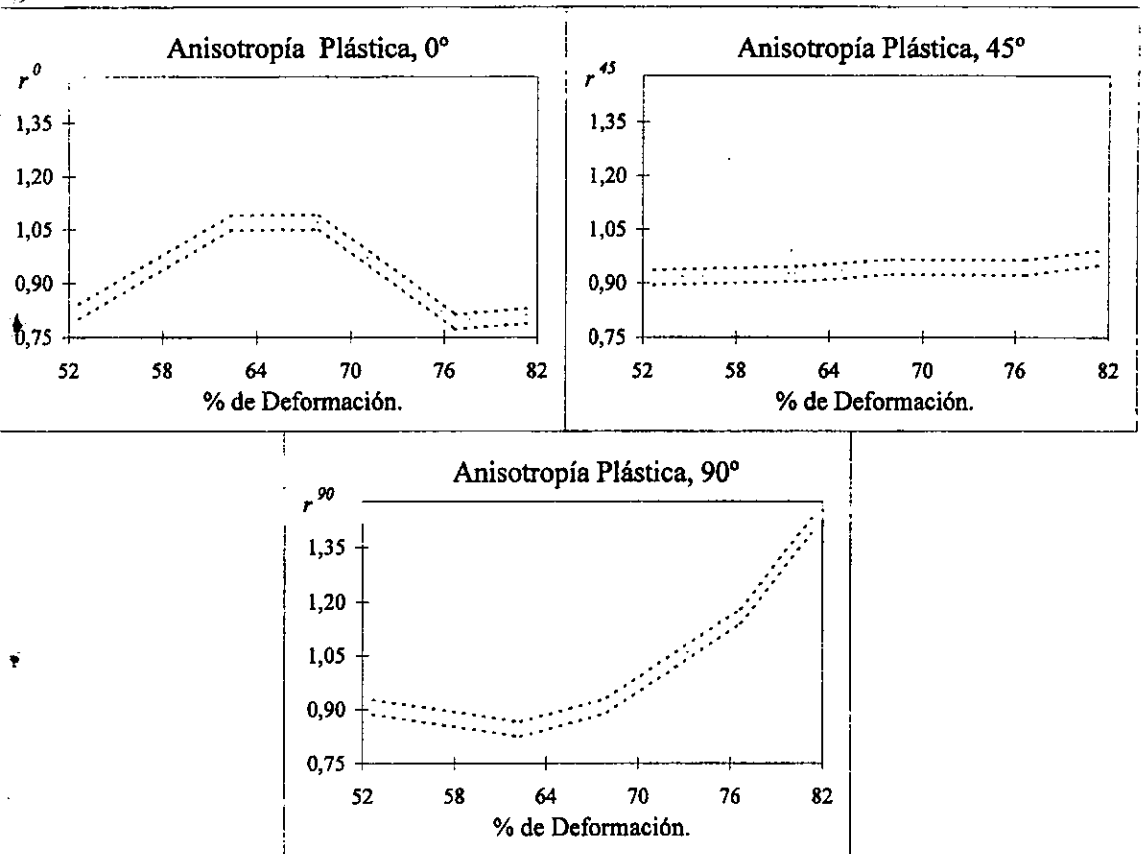


Fig. 50.- El comportamiento de la Anisotropía con el porcentaje de Deformación en los tres sentidos diferentes con respecto a la dirección de laminado.

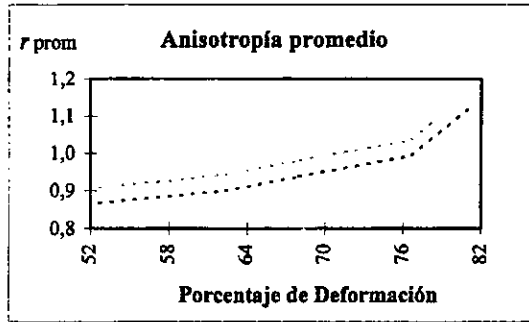


Fig. 51.A.-La Influencia del porcentaje de deformación sobre el valor de la anisotropía promedio del material

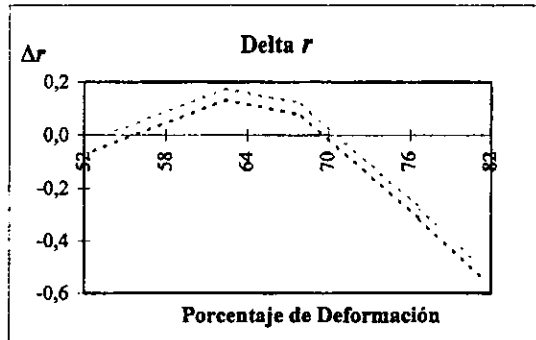


Fig. 51.B.- El comportamiento de  $\Delta r$  a medida que varía la deformación sobre el acero 304.

**TABLA 16.- Parámetro  $r_{prom}$  y  $\Delta r$  del Acero Inoxidable 304.**

DEFORMACION	$r$ (0°)	$r$ (45°)	$r$ (90°)	$r$ prom.	$\Delta r$	STD.
52,67%	0,821	0,907	0,916	0,888	-0,039	0,021
62,33%	1,070	0,844	0,926	0,921	0,154	0,021
68,00%	1,071	0,912	0,944	0,960	0,096	0,021
76,67%	0,793	1,161	0,943	1,014	-0,292	0,021
81,33%	0,810	1,411	0,970	1,150	-0,520	0,021

La evaluación total de los parámetros estudiados tienen el inconveniente de ser menores a lo establecido en la literatura. Ver Tabla 17.

**Tabla 17.- Valores promedio de los parámetros de formabilidad obtenidos y reportados en la literatura.**

	Literatura	Experimental
Res. Tracción.	1100	700
Res. Fluencia.	800	300
$n$	0.45 - 0.5	0.38-0.39
$r_{prom}$	1	0.87-0.95

Debido a que los valores de la literatura no tienen un recocido equivalente al nuestro, hay que recordar que a un tamaño de grano menor, mayor dureza, cierta cantidad de deformación incrementan las propiedades mecánicas de los materiales.

## 9.- CONCLUSIONES.

◊ Las mejores propiedades mecánicas que tiene un material para someterse a un posterior proceso de estiramiento son a 60-65% o a valores mayores de 75% de deformación previa para un sentido transversal.

◊ La anisotropía muestra que a 57 % o a 70 % están las mejores propiedades de embutibilidad que el material puede presentar.

◊ Para un estiramiento uniaxial, se concluye que las mejores propiedades del acero son a valores mayores de 75% donde el coeficiente de endurecimiento es ligeramente mayor y en sentido transversal, donde la elongación del material es mayor y la resistencia a la tracción y a la fluencia son menores.

◊ Para un proceso puro de embutido profundo las condiciones más adecuadas de la materia prima son:

1.- Un porcentaje de 67-70% de reducción desde  $\Delta r \approx 0$  y un  $r$  promedio mayor, debido al alto valor que en sentido longitudinal se tiene.

2.- Un valor de 52-60% donde  $\Delta r \approx 0$ .

3.- Un rango de 60-67%, donde el nivel de orejeado ocasionaría menos conflictos, lo cual es importante sobre todo con un material de tan elevado costo como el acero inoxidable.

◊ Comparando la estirabilidad del material de los dos rangos donde  $\Delta r$  es igual a cero se observa una muy pequeña ventaja del rango de 67-70% de reducción en frío.

◊ En el rango anterior las propiedades mecánicas del material también presentan esa ligera ventaja. Por lo que se puede concluir que el rango ideal se encuentra a ese valor de 67-70% de reducción.

## **10.- RECOMENDACIONES**

Para comprender y controlar las propiedades de un material es importante entender la forma que la textura es afectada por las características microestructurales iniciales, la deformación y por el tratamiento térmico.

El primer paso sería realizar la medición de textura de las probetas utilizadas en el estudio o de material de producción para llegar a comprender mejor el comportamiento de la red con el tratamiento térmico, por lo que es importante medir la textura antes y después de la recristalización.

Se debe incluir un estudio donde se varíe la temperatura de recocido, la velocidad de calentamiento, la velocidad de enfriamiento, tiempo de recocido y porcentaje de deformación al mismo tiempo debido a que el comportamiento de cada una de las variables es completamente dependiente a las demás.

Para realizar este estudio es necesario hacerlo en forma industrial debido a la imposibilidad de controlar en el laboratorio la velocidad de calentamiento, mientras que en el horno por medio de rodillos móviles se puede controlar el tiempo de permanencia del acero en cada una de las zonas. Esto desafortunadamente involucra un costo muy elevado y es aventurarse a realizar el estudio.



## 11.- APÉNDICE.

### A.I.- Comportamiento Esfuerzo -Deformación.

En la figura 1a se presenta una curva carga-alargamiento típica para la mayoría de los metales y aleaciones recocidos y sin ninguna deformación previa. De acuerdo a la norma ASTM E4 es necesario generalizar estas curvas en función de los esfuerzos y de las deformaciones verdaderas (fig. 1b).

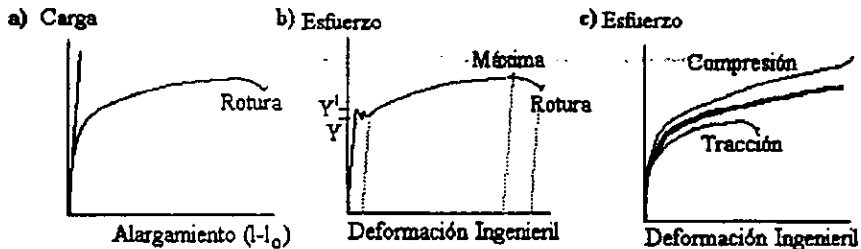


Fig. 1.- Curvas de flujo:

- Carga vs. Alargamiento de un material dúctil (acero aleado).
- Curva esfuerzo-deformación ingenieril de un acero suave.
- Comparación de un ensayo de Tracción y un ensayo de Compresión.

De estas curvas se definen los siguientes parámetros:

Esfuerzo ingenieril o nominal ( $S$ ).- El esfuerzo normal, expresado como unidad de fuerza aplicada,  $F$ , por unidad de área original de la sección transversal,  $A_0$ . El cual está dado por  $S = F / A_0$ .

Deformación ingenieril ( $e$ ).- Es el cambio en longitud ( $\Delta L$ ) por unidad de longitud original ( $L_0$ ), determinada a lo largo de la carga axial del espécimen, la cual está dada por  $e = (\Delta L) / L_0$ .

Cuando la deformación es pequeña, la tensión es directamente proporcional a la deformación, Ley de Hooke, hasta el límite de proporcionalidad  $L_p$ , figura II, a esta zona es la región elástica. La pendiente de la recta es el módulo de Young ( $E$ ).  $E = \sigma/\epsilon$ .

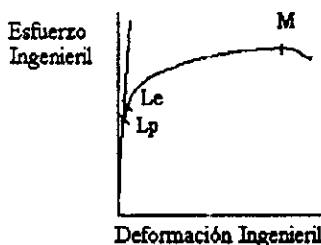


Figura II.- Curva Esfuerzo-Deformación ingenieril de un material dúctil.

La zona de deformación elástica es la zona donde la probeta recupera sus dimensiones originales cuando se retira la carga. Por encima del límite elástico,  $L_e$ , figura II, se presenta una deformación permanente o plástica.

Las posiciones reales atribuidas a  $L_p$  y  $L_e$  regularmente son muy semejantes excepto para algunos aceros muy suaves donde el límite elástico es menor al de proporcionalidad, fenómeno conocido como límite elástico agudo y a la zona entre estos dos límites se conoce como elongación del punto de fluencia.

El esfuerzo al cual se lleva a cabo la transición de deformación elástica a plástica se conoce como esfuerzo de fluencia,  $Y$ , figura II.

Si la carga se va incrementando progresivamente más allá del punto  $L_e$ , figura II, la curva de carga-alargamiento aumentará lentamente, hasta que en  $M$  se empieza a descender. Este descenso coincide con la formación de una estricción en la probeta.

Cuando la probeta se rompe se miden 2 nuevos parámetros, el alargamiento y la estricción. El porcentaje de alargamiento se determina con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Alargamiento} = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$

y su utilidad es importante pues es un indicador de ductilidad.

La relación entre áreas nos da el porcentaje de estricción:

$$\% \text{ Estricción} = \left( \frac{A_F - A_0}{A_0} \right) * 100$$

Otros conceptos importantes incluidos en la Norma ASTM E4 son (13):

◊ Deformación verdadera ( $\epsilon$ ).- El logaritmo natural de la relación de longitud calibrada instantánea, L; a la longitud calibrada original,  $L_0$ :

$$\epsilon = \ln (L / L_0) \quad \text{o} \quad \epsilon = \ln (1 + e)$$

Esfuerzo verdadero ( $\sigma$ ).- El esfuerzo normal instantáneo, calculado en el área instantánea de la sección transversal, A, el cual es

$$\sigma = F/A \quad \text{o} \quad \sigma = S (1 + e).$$

◊ Coeficiente de endurecimiento por deformación (n).- Es el exponente de la relación empírica entre el esfuerzo verdadero y deformación verdadera,  $\sigma = K\epsilon^n$ . Se calcula como la pendiente de la relación de los logaritmos de esfuerzo verdadero y deformación verdadera.

◊ Coeficiente de resistencia (K).- Una constante experimental, calculada de la relación anterior, es numéricamente igual a la extrapolación del valor del esfuerzo verdadero cuando la deformación verdadera es 1.00.

◊ Coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación (m).- El exponente de la relación empírica entre el esfuerzo verdadero y la velocidad de deformación de este  $\sigma = C\epsilon^m$ .

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} \quad \text{donde} \quad \dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

◊ Resistencia a la Tracción.- Es el esfuerzo verdadero calculado a partir de la carga máxima.

Cuando hablamos de muestras planas, otros parámetros de interés son:

◇ Anisotropía plástica  $r$ : es la razón de deformaciones verdaderas entre el ancho  $w$ ,  $\epsilon_w$ , y el espesor  $t$  de la lámina,  $\epsilon_t$ . Así,  $r$  es numéricamente igual a:

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t.$$

◇ Anisotropía promedio  $r_m$ : es la relación de los valores de  $r$  o en los tres sentidos principales con respecto a la dirección de laminación:  $0^\circ$  (paralelamente),  $45^\circ$  (diagonalmente) y  $90^\circ$  (transversalmente):

$$r_m = (r_0 + r_{90} + 2r_{45}) / 4.$$

◇ Anisotropía planar ( $\Delta r$ ): Parámetro indicador de la heterogeneidad de la anisotropía en el plano de la lámina:

$$\Delta r = r_0 + r_{90} - 2r_{45} / 2$$

## A. II. - ENSAYOS DE LABORATORIO.

Los ensayos existentes para caracterizar a un material se dividen en ensayos intrínsecos y en simulativos (3). Los primeros son aquellos donde se miden las propiedades del material sin depender del proceso de conformado ni del espesor. Y los simulativos proporcionan información específica de las condiciones superficiales de trabajo, como son la sensibilidad al adelgazamiento, lubricación, etc.

### I.- Ensayos intrínsecos.

#### *Ensayo de Tensión uniaxial.*

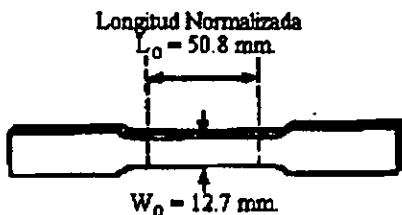


Fig. III.- Probeta para un ensayo típico de tracción, (13)

#### ◊ Ensayo de Tracción.

Es el ensayo más popular para caracterizar un material, obteniendo se todos los parámetros especificados en el apéndice AI. Para la realización de esta prueba se utiliza una probeta cuyas especificaciones se dan en la Norma ASTM E8 (13).

#### ◊ Ensayos específicos para medir $n$ y $\bar{r}$ .

Cuando se requiere un control rápido de estos parámetros, sobre todo a nivel industrial, estos ensayos ofrecen muchas ventajas por la facilidad y rapidez de realizarse y no necesitan un control constante de cargas, ni de la fractura, la desventaja es el error aproximado del 5% en sus resultados.

En el ensayo de arco circular se utiliza una probeta rectangular con dos pequeñas muescas circulares a ambos lados, se marca una zona fuera de las inserciones y se realiza un simple ensayo de tensión, se anota la carga máxima y se mide la deformación en la zona marcada (3).

El ensayo de "rapido-n" se realiza con una probeta como el de la figura IV y solo se necesita conocer la Resistencia a la Tracción del material y una relación empírica de esta con el valor de  $n$  dada como (3):

$$CM = RT (A/n)^n.$$

Donde CM: Es la carga máxima en el ensayo; RT.- Resistencia a la Tracción; A.- Una constante del material, fácil de evaluar y cuyo valor para un acero al bajo carbono es  $\approx 0.02$ ; y  $n$ .- es el coeficiente de endurecimiento por trabajado mecánico.

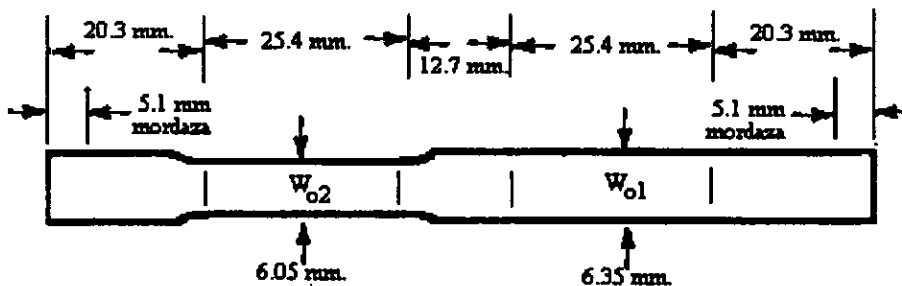


Fig. IV.- Probeta para el ensayo rapido- $n$ , (3).

Cuando el material tiene una elongación de su zona de fluencia se necesita utilizar la siguiente definición de  $n$ :

$$n = \frac{\ln\left(\frac{w_{o_2} l_o}{w_{f_1} l_f}\right) - n}{\ln\left(\frac{\ln\left(\frac{w_{o_1} l_o}{w_{f_1} l_f}\right)}{n}\right)}$$

**Donde:**

$w_{o_1}$ ,  $w_{o_2}$  y  $l_o$  son

las dimensiones originales

$w_{f_1}$ ,  $w_{f_2}$  y  $l_f$  son

las dimensiones finales,

fig. IV.

◊ Ensayo de Módulo-r.

Para este ensayo se aplica un campo magnético oscilante y se mide la frecuencia de la resonancia; se relaciona con el valor del Módulo de Young y se obtiene el valor de la anisotropía.

Las relaciones utilizadas son (3):

$$E = 4\rho L^2 f^2. \quad \bar{E} = \frac{E_0 + 2E_{45} + E_{90}}{4}. \quad \Delta E = E_0 + E_{90} - 2E_{45}.$$

$$\bar{r} = \frac{4822.6}{(\bar{E} - 267.7)^2}. \quad \Delta r = 0.031 - 0.0468\Delta E.$$

el subíndice indica el ángulo con respecto a la dirección de laminado.

donde:  $\rho$  = densidad

$E$  = Modulo de Young, en KPa.

$L$  = Longitud.

$f$  = Frecuencia de la resonancia.

**Ensayo de Tensión Biaxial.**

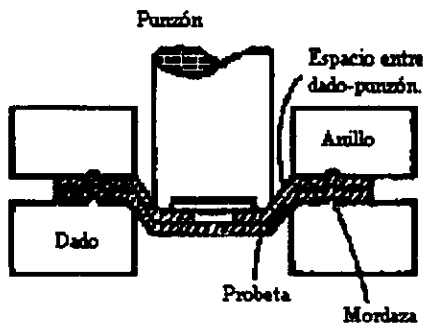


Fig. V.- Ensayo de tensión biaxial de Marcianick, (3)

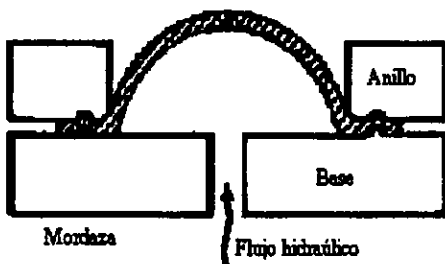


Fig. VI.- Ensayo de pandeo hidráulico, (3)



◊ Ensayo de Marcianick.

En esta prueba se realizan mediciones de la deformación en las direcciones principales de la lámina por el método de impresión de círculos, principalmente, para determinar sus propiedades (3). En la figura V se muestra esquemáticamente esta prueba.

◊ Método del Pandeo hidráulico.

Este método tiene la ventaja de eliminar los factores de influencia de la herramienta ya que el blanco "flange" es expandido por medio de presión hidráulica, Fig. VI. Conociendo que el esfuerzo circunferencial es equivalente al esfuerzo radial, se encuentra que (3):

$$\sigma_r = PR/(2t)$$

donde:

P= Presión hidrostática. R= radio de curvatura. t= Espesor.

◊ Otros ensayos existentes son los de Torsión, Corte, dureza, etc. los cuales no serán explicados en este trabajo, ver referencia (3) y figuras VII y VIII.

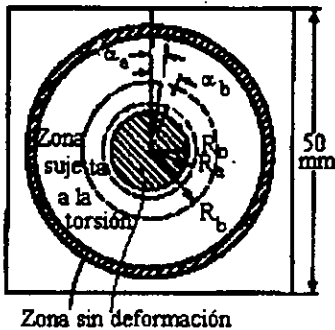


Fig. VII.- Ensayo de torsión de Marcianick (3).

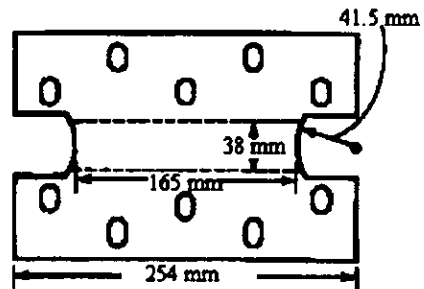


Fig. VIII.- Probeta para un ensayo de deformación plana (3).

## II.- Ensayos Simulativos.

### ◊ Ensayo de Doblez.

Hay dos tipos de ensayos regulados por la Norma ASTM E290 (13):

En el primero solo se observa el radio al cual se produce la fractura como se observa en la figura IX. Si se alcanza un ángulo de  $180^\circ$  sin romperse, se varia el radio del dado y se vuelve a ensayar.

En el segundo ensayo si hay un control de la carga y existe además del doblez un poco de estiramiento. El ensayo se observa en la figura X.

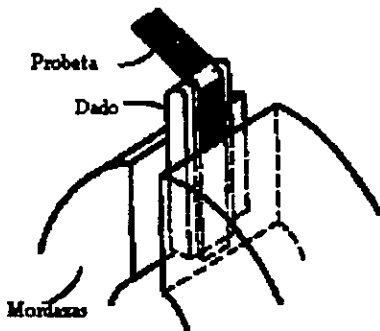


Fig. IX.- Ensayo de doblez simple, (3)

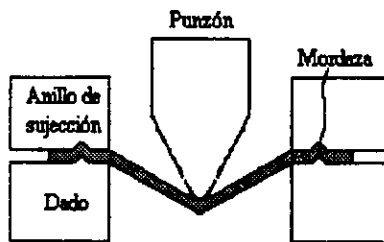


Fig. X.- Ensayo de doblez, con estiramiento (3)

### ◊ Ensayo de copa Olsen y Erichen.

Estos ensayos deforman el material por medio de una pared y de un punzón de nariz esférica. Se mide la altura de la copa alcanzada en el punto de máxima carga, si no es posible, la medición es realizada con la aparición de una estricción visible y/o una fractura, el error entre ambas determinaciones varia entre 0.3 a 0.5 mm, ver figura XI

La única diferencia entre ellos es la dimensión de la herramienta (3). El ensayo de Olsen esta normalizado en la Norma ASTM E643 (13), usando un diámetro de balín de 22.2 mm. (0.875 in), un diámetro interior del dado de 25.4 mm. (1 in) y un radio en el ángulo del dado de 0.891 mm. (0.032 in.). Mientras

que el ensayo de Erichen ampliamente usado en Europa utiliza las siguientes dimensiones de la herramienta:

Diámetro del balín 20 mm. (0.79 in), diámetro interior del dado de 27 mm. (1.06 in) y un radio del ángulo 0.75 mm (0.03 in).

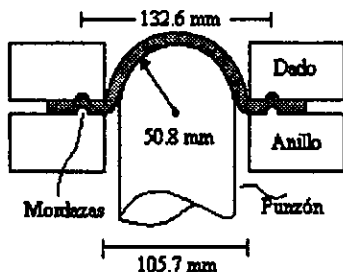


Fig. XI.- Ensayo de copa Olsen, (3)

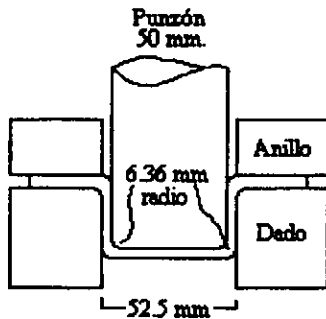


Fig. XII.- Ensayo LDH, (3)

#### ◊ Ensayo LDH.

Es el ensayo más utilizado para medir la estirabilidad del material, proporciona límites de la altura del domo hemisférico "LDH". En la figura XII se muestra la herramienta y la forma en que se realiza. La diferencia con los ensayos de copa es que el punzón no es esférico, sino más bien es hemisférico y de un diámetro mayor dando oportunidad de una deformación más significativa.

#### ◊ Ensayo de Copa Cónica de Fukui.

Este ensayo se hace como se indica en la figura XIII utilizando unos balines de 12.5 a 27 mm.

#### ◊ Ensayo de Swift.

El ensayo de copa normalmente utilizado para indicar el Límite de embutibilidad (Limiting Draw Ratio) "LDR", figura XIV.

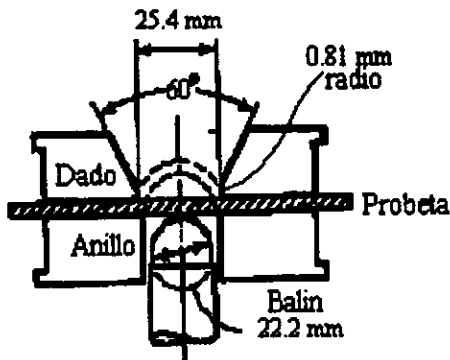


Fig. XIII.- Ensayo de copa cónica de Fukui, (3)

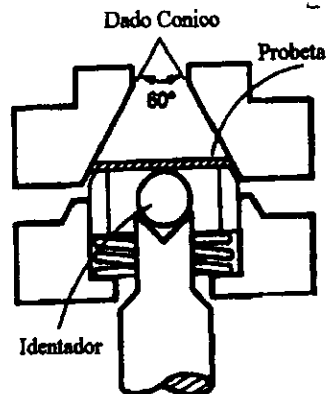


Fig. XIV.- Ensayo de copa de Swift, (3)

En un estudio cuantitativo de comparación sobre los ensayos de Olsen, Swift y Fukui, realizada con 48 materiales distintos (Al-killed, Rimmed, aceros austeníticos, aleaciones de aluminio, etc.), se midió con las propiedades tensiles y la elongación total  $\epsilon_t$  como un parámetro de estirabilidad y  $\bar{r}$  para embutibilidad, los resultados se reportan en la tabla I:

**Tabla I.- Relación entre los diferentes ensayos de copa, (33).**

Prueba	Relación	Coefficiente Correlación lineal
Olsen (Altura de copa /Diámetro de punzón.)	$0.217 + 0.00474\epsilon_t + 0.00392\bar{r}$	0.925
Swift (LRD).	$1.93 + 0.00216\epsilon_t + 0.226\bar{r}$	0.835
Fukui (Índice de formabilidad).	$0.525 + 0.00134\epsilon_t + 0.207\bar{r}$	0.757

Se observa que el ensayo que el ensayo Olsen es el de mayor dependencia  $\epsilon_t$  y Fukui el menor y para embutibilidad  $\bar{r}$  el ensayo de Olsen es casi independiente mientras que para los otros dos es muy similar, y es la razón principal para realizar un ensayo de copa Fukui para medir embutibilidad al depender mínimamente de la estirabilidad (33).

## BI.- ESTRUCTURA CRISTALINA.

Los metales tienen principalmente tres tipos de estructuras cristalinas denominadas con las siglas inglesas FCC, BCC y HCP, cuyos significados son, Cubica centrada en las caras, Cubica centrada en el cuerpo y Hexagonal compacta respectivamente. Fig. XV.

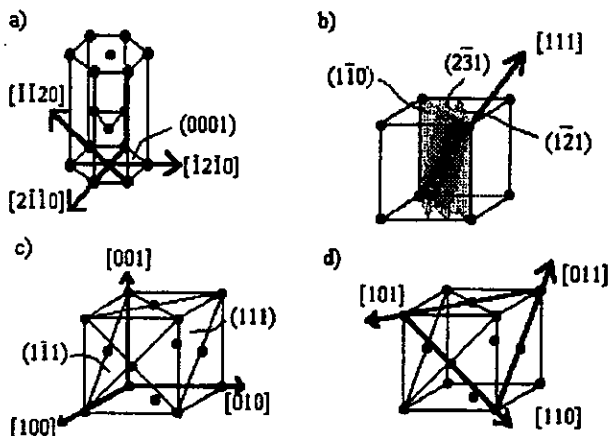


Fig. XV.- Planos y direcciones de deslizamiento en un cristal simple, (8).  
a) Cristal HCP.  
b) Cristal BCC y 3 planos posibles de deslizamiento.  
c) y d) Cristal FCC y sus combinaciones de deslizamiento.

Para indicar la orientación de un cristal y su espacio interplanar se utiliza una nomenclatura llamada Índices de Miller (29).

Si se desea estudiar un plano de átomos, como el plano del cubo comprendido en la fig. XVIa, se representa en función con los ejes de coordenadas (fig. XVIb). En un cristal cúbico, el espacio entre los puntos de la retícula (la constante reticular) es el mismo en las tres direcciones, de manera que  $a_1 = a_2 = a_3 = a_0$ . Y las interacciones de un plano con los ejes coordenados se miden en función de  $a_0$ .

Fig. XVI.- Arreglo cristalino cubico centrado en las caras FCC, (19).

A) Plano de cubo típico delineado entre átomos.

B) Representación convencional de un plano en función de sus intersecciones con los ejes del cristal.

La forma de nombrar un plano se realiza por 4 pasos descritos en la Tabla II.

**Tabla II.- Pasos para nombrar un plano por medio de los Índices de Miller, (6).**

	Ejes del cristal.		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1. Determinar las intersecciones del plano con los ejes del cristal.	2	3	1
2. Tomar recíprocos.	1/2	1/3	1
3. Convertirlos a los números enteros más pequeños en la misma proporción.	3	2	6
4. Escribirlos entre paréntesis.	(326)		

## B.II.- PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA.

Para un mejor localización de átomos, planos o direcciones, se utiliza una representación gráfica en dos dimensiones. Existen tres tipos de proyecciones posibles gnomónica, ortográfica y estereográfica, cuya diferencia reside en la ubicación del punto de referencia. Fig. XVII.

Cuando el foco de proyección se encuentra en el centro de la esfera, la proyección recibe el nombre de Gnomónica; si se encuentra en la base de la esfera, se conoce como estereográfica y la proyección ortográfica es aquella en que su foco de proyección esta en el infinito (30).

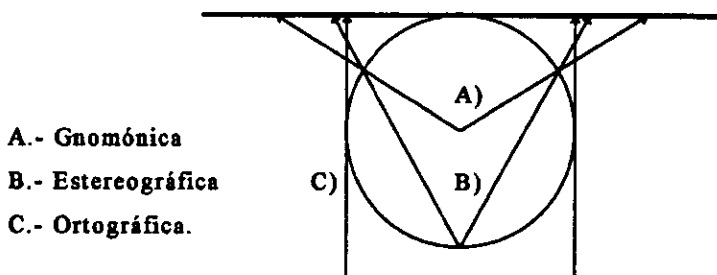


Fig. XVII.- Proyecciones de una esfera sobre un plano, con sus diferentes focos, (26).

La proyección más utilizada para el estudio de un arreglo atómico metálico es la proyección estereográfica, por tener varias ventajas:

- 1.- El poder medir los ángulos verdaderos sobre los polos de la proyección;
- 2.- El representar una dirección cristalográfica por medio de un solo punto y un plano por medio de una curva.

Para hacer una proyección estereográfica se usa una celda unitaria como referencia (6), y el procedimiento es el siguiente:

- 1.- Colocar el origen de un sistema de coordenadas en el centro de una celda unitaria.
- 2.- Representar los planos de un cristal determinado por medio de líneas que inicien del origen y sean perpendiculares, normales, a estos planos principales del cristal.
- 3.- La construcción de polos por medio de normales proyectadas hacia el exterior para intersectar con la esfera.
- 4.- Mapear estos polos.

La proyección estereográfica resultante es una herramienta muy útil que, entre las muchas ventajas que proporciona están:

- 1.- Visualizar y discutir las relaciones entre los planos y las direcciones en un cristal.
- 2.- Ayudar en el análisis de rayos X y patrones de difracción producidos por haces de electrones.
- 3.- La representación de la simetría de red.
- 4.- La determinación de ángulos entre los planos y las direcciones de un cristal.



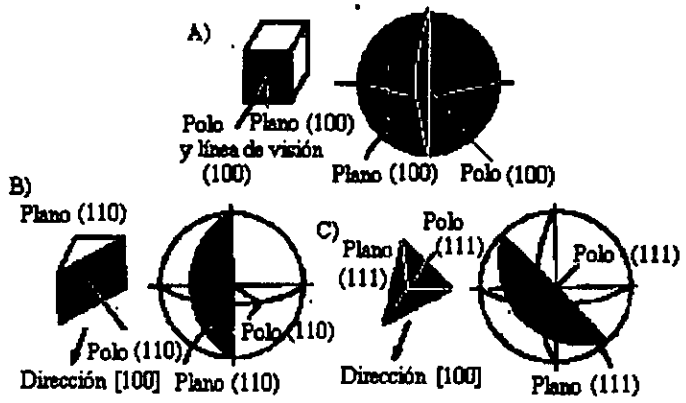


Fig. XVIII.- Representación de planos, polos y direcciones en una proyección estereográfica, (6).

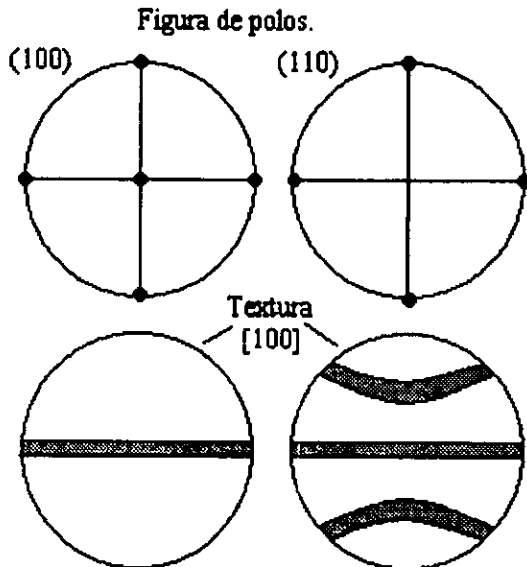


Fig. XIX.- Representación de la textura en una figura de polos 100 y 110.

## **B.III.- DEFORMACIÓN.**

La deformación de un cristal se debe principalmente a los defectos de red y en particular a la movilidad de estos. Existen diferentes tipos de defectos de red los cuales se clasifican en puntuales, de línea, superficiales y de volumen.

### ***Defectos de Red***

La estructura cristalina de los metales se ve distorsionada por la presencia de varios tipos de defectos, los cuales se dividen de acuerdo a las tres dimensiones espaciales, (19):

#### **◊ Defectos en cero dimensiones.(puntuales)-**

Los defectos puntuales son aquellas que solo ocupan un punto de la red cristalográfica, como son las vacancias, inclusiones, átomos intersticiales y sustitucionales.

#### **◊ Defectos en una sola dimensión (de línea).-**

Los defectos de línea pueden considerarse como un conjunto de defectos puntuales comúnmente conocidos como dislocaciones, y dependiendo de su desplazamiento se llaman de tornillo o de borde.

#### **◊ En dos dimensiones (superficiales) .-**

Los defectos de superficie son acumulaciones de defectos de línea. Entre ellos se consideran a los defectos de apilamiento entre dos regiones de empaquetamiento compacto de un cristal que son una alteración en la secuencia de los planos cristalinos. Otro de los defectos de superficie son los Límites de grano y los Límites de ángulo pequeño. Como todos los productos comerciales están invariablemente formados por un número enorme de pequeños cristales o granos individuales estos defectos cobran gran importancia.

#### **◊ En tres dimensiones (volumen):**

Los defectos de volumen entre otros son las grietas, los precipitados, las fallas por cizallamiento, las maclas, etc.

**Dislocaciones:**

El defecto más importante son las dislocaciones, pues, debido a su presencia puede ocurrir el desplazamiento de planos a lo largo de toda la red, si no existiese la cantidad de energía necesaria para deformar un material ésta incrementaría en un 10000%, (6).

Los tipos básicos de dislocaciones pueden ser explicados con ayuda de una red cristalina donde los átomos son representados por esferas. La trayectoria de una dislocación conocida como "de borde" se caracteriza por la presencia de un semiplano, el límite de éste se le conoce como línea de dislocación, y corresponde a la zona de mayor distorsión de la red. Existe otro tipo llamada dislocación de "tornillo", en la cual los planos donde avanza tiene una forma parecida a una espiral y la línea de dislocación es el eje donde gira esta espiral.

El vector de Burgers y la orientación de la línea de dislocación en la red describen cuantitativamente a la dislocación.

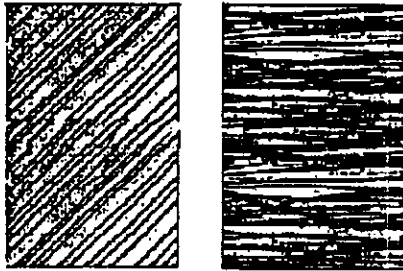


Fig. XX.- Material deformado al 5%,  
(31)  
a) Aluminio  
b) Hierro alfa 3% de Si

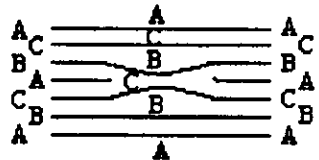


Fig. XXI.- Dislocaciones parciales debido a la desaparición de un semiplano, (31).

Durante el estudio de los factores de deformación se ha encontrado que las dislocaciones tienen direcciones de deslizamiento preferenciales, las cuales son las que tienen el gasto energético menor y el mayor factor de empaquetamiento.

Para un cristal FCC, como es el caso de nuestro acero austenítico inoxidable 304, el deslizamiento ocurre preferentemente en 12 sistemas deslizantes posibles, combinación de 4 planos  $\{111\}$  y 3 direcciones  $\langle 110 \rangle$  deslizantes por cada plano, los cuales corresponden a paralelas a las diagonales del sistema cúbico (6), de los cuales Von Mises encontró que solo 5 sistemas son independientes siendo los restantes resultado de la combinación de los primeros (6).

Para medir el deslizamiento en una dislocación se utiliza un vector conocido como vector de Burgers, cuya posición se asigna en tres dimensiones  $[xyz]$  (33).

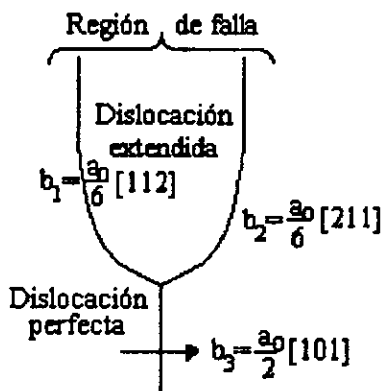


Fig. XXII.- Se observa una dislocación perfecta y su conversión a dislocaciones parciales, (19).

Para determinar el vector de Burgers en el análisis de una dislocación, se siguen estos pasos:

- 1.- Se traza un circuito alrededor de la dislocación, conocido como circuito de Burges y se puede notar que no cierra.
- 2.- El sentido del circuito se realiza en contra de las manecillas del reloj.
- 3.- El circuito se cierra por medio de un vector, siendo este el vector de Burgers "b".

## **B. IV.- Energía de Falla de Apilamiento.**

Cuando existen una remoción o inserción de segmentos de planos se habla de la existencia de fallas de apilamiento siendo el principal origen la acumulación de vacancias o la disociación glisil de dislocaciones, ejemplo las dislocaciones parciales de Frank (11).

Otro mecanismo de formación de estas fallas es la disociación de dislocaciones de alta energía en dislocaciones parciales (31). A pesar de la fuerza repulsiva entre las dislocaciones parciales, la tensión superficial de la falla tiende a acercarlas.

En los metales de red FCC, el deslizamiento ocurre en planos (111), los cuales reciben la nomenclatura ABCABC, ver figura IV. Los átomos en posiciones tipo C se deslizan a la capa subyacente B, cuando existe una dislocación perfecta, como puede notarse en la fig. XXII. Esta se disocia provocando el movimiento de la capa inicial C a la posición adjunta tipo A, figura XXIII.

El área entre las dos dislocaciones parciales tiene una secuencia de apilamiento ABABC en vez de ABCABC, la energía asociada a este apilamiento anormal actúa y limita la extensión de la falla.

Cuando un material tiene una energía de falla de apilamiento alta, por ejemplo el aluminio, la distancia entre las dislocaciones parciales es muy

pequeña produciéndose fácilmente la constricción de la falla y disminuyendo el endurecimiento por deformación.

**Tabla III. Relación de la Energía de Falla de Apilamiento y el coeficiente de endurecimiento en metales FCC.**

Material	Energía de Falla de Apilamiento, $\text{mJ/m}^2$	Coefficiente de Endurecimiento	Carácter de Deslizamiento.
Ac. Inoxidable	menor a 10	0.45	Planar
Cobre	90	0.3	P/O
Aluminio	250	0.15	Ondulado

Un acero austenítico con una baja energía de falla de apilamiento presenta una distancia de equilibrio entre las dislocaciones parciales muy grande y por lo tanto es imposible la unión de las mismas dando como resultado un alto endurecimiento por deformación, que se manifiesta con un  $n$  grande (0.45), (11).

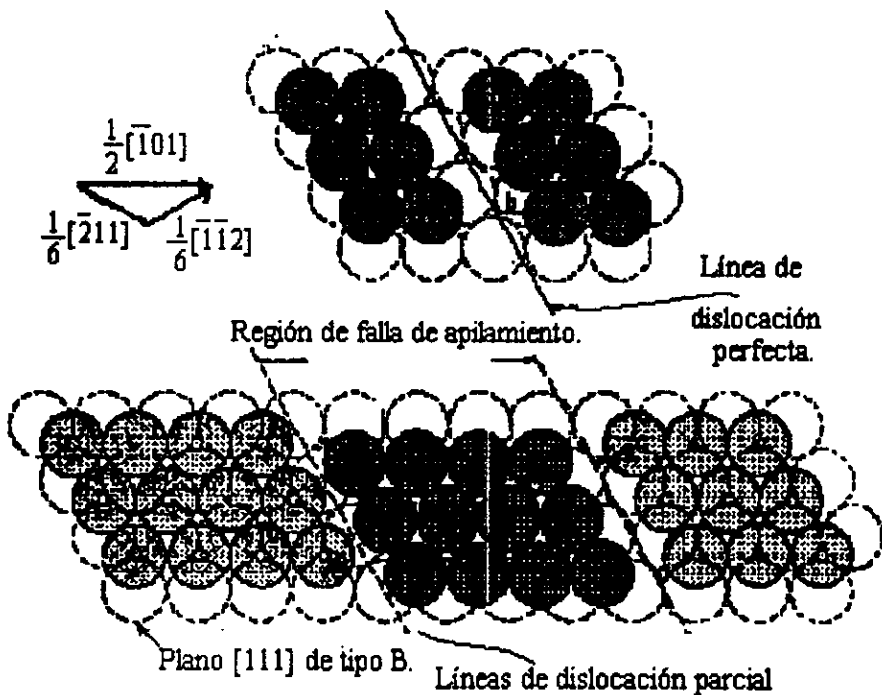


Fig. XXIII.- Los planos A, B y C que forman una estructura FCC. La disociación de un dislocación y la subsecuente falla de apilamiento.

## 12.- BIBLIOGRAFIA.

1.-Lange Kurt, "*Handbook de Metal Forming*", 1ª Edición. McGrawHill book Company, N.Y. 1985.

2.- Peckner Donald y I.M. Bernstein, "*Forming Sheet, strip y Plate*", "*Handbook of Stainless Steels*. Cap. 27. McGrawHill book Company, N.Y. 1977.

3.- Evaluation of Formability for Secondary Sheet Forming "*Metals Hanbook*". Vol.14, Forming and Forging. pp. 875-900. 9 Edición . ASM Internacional T.M. 1988.

4.- Pohland Klaus, "*Materials Testing for the metal forming industry*" Trad. Robert Kuehl, Berlin Springer, 1989.

5.- Armstrong, R.W., "*Metals Transactions*", Vol. 1, May 1970, pp.1169-1176.

6.- Verhoveen , John D. "*Fundamentals of Pysical Metallurgy*", 1a De., John Wiley Inc., New York, 1975.

7.- Cahn, R. W., P. Hanseen, "*Physical Metallurgy*", 3a. Ed. Prtel North Holland Physics Publishing, 1983.

8.- Mishra Sanak y Därmann C. "*Rolled and Control of texture in deep-drawing steels*". International Metals Reviews, pp. 307-319. No. 6, Vol.27, 1982

9.- Brammar J. S., J.R. Thompson, R.M. Hobbs, "*Australian Instrumentals Metallurgy*", 1972, 17, p.p.147.

10.- Schedin Erick. "*Forming Properties of Stainless Steel Sheet*", Swedish Institute for Metals Researchs Drottning Kristinas", Vol. 48, S114-128.

11.- Kleemola, H.J. y Nieminen, M.A. "*Metalurgy Transactions A*" Vol 5. Agosto 1974, pp 1863-1866.



- 12.- Honeycombe, R.W.K. *"The Plastic Deformation of Metals"*, 2a. De., Edward arnold Ltd, 1984.
- 13.- Normas ASTM, 1992
- 14.-Hosford, William F. and Candell, Robert M. " *Metal Forming Mechanics and metallurgy*", 2° Edición Inglewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall, 1993.
- 15.- Swift H.W. *"Plastic Instability Under Plane Stress"*, Journal Mechanical and Physics of Solutions. 1. pp. 1-18. 1952.
- 16.- Schey, Jonh A. *"Introduction to Manufacturing Process"* 2° Edición Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall, 1993.
- 17.- Blickwede, D.J., Transactions ASM, 1968, 61, p. 653
- 18.- Chang, J.S., S.S. Chou, *"Microstructural Effects on Formability of Type 304 Stainless Steel Sheet in Cylindrical Deep Drawing"*, Journal of Materials Engineering and Performance, 551-559, Volumen 3, No. 4, Agosto 1994.
- 19.- Reed Hill, Abauschian, *"Physical Metallurgy Principles"*, 3a. Ed. Pwskent Publishing company, Boston, 1992.
- 20.-Dinda S., K.F. James, S.P. Keele, P:A. Stine, *"How the Use Circle Grid Analysis for Die Try Out"*, ASM, 1981.
- 21.- Marcianick Z., K. Kuczgnski, *"Limits Strains in the Process of Sheet Forming Sheet Metals"*, International Journal Mechanical Science, pp. 609-620, Vol.9, 1967.
- 22.- Hetzberg, Richard W. *"Deformation and Fracture Mechanics of Enginnering Materials"*, Jonh Wiley Inc., New York, 1989.
- 23.- Barrets C.S. y T.B. Nassalski, *"Structure of Metals"*, 3a. Edición, McGrawHill, New York, 1966, p163.
- 24.- Daniels D., J.J. Jonas, *"Measurements and Predictions of Plastic Anisotropy in Deep Drawing"*, Metallurgical transaction A., Vol. 21A, February 1990, p.p. 331-343.

25.- Mould P.R., T.E. Johnson, "*Rapid Assessment of Drawability of Cold Rolled Low Carbon Steel Sheets*", Sheet Metallurgy Industry, Vol. 50, Junio 1973. p.p. 328 -348.

26.- Perlovich, A., Sheet Metallurgy Industry, p.p. 910-914, Vol. 93, Dic. 1996.

27.- Dillamore, I.L., G.J.E. Smith and T.W. Watson, "*Metallurgia Scientia Journal*", 1:49, 1967.

28.- "*Forming of Stainless Steels and Heat Resistant Alloy Sheet Materials*" Vol.14, Forming and Forging. pp. 1010-1027. 9 Edición . ASM Internacional T.M. 1988.

29.- Chapra, "*Métodos Numéricos para Ingenieros*", Ed. McGrawHill, México, 1988.

30.- Heyer, R.H. y Newby J.R. "*Measurement of Strain Hardening and Plastic Strain Ratio Using the Circle-Arc-Specimen*", Sheet Metallurgy Industry, p.p. 910-914, Vol. 43, Dic. 1966.

31.- Guy Albert G., "*Essentials of Materials Science*", New York, McGrawHill, 1979.

32.- Dieter George E. "*Engineering Design a materials and processing aproach*". New York, McGrawHill, 1987.

33.- Duncan, J.L., J. Koldziejcki, y G. Glover, "*Bulge Testing aid to Formability Assessment*", ASM, 1976, Proceeding of the 9th Bional Congress of the International Deep Drawing Research Group. p.p.131-150.

34.- Rowe, Geoffrey W. "*Principles of Industrial Metalworking Processes*", 1ª Ed. 4ª Reimpr. Edward Arnold, Ltd, London.

35.- Mielnik, Edward M. "*Metalworking Science and Engineering*", McGrawHill Inc, N.Y., 1991

36.- Smallman, R.E. y D. Green, "The dependence of rolling texture on stacking fault energy", Acta Metallurgica, Vol 12. Febrero 1964.