

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 2	AÑO 1970

04.70.18-3

PMM/A - 12

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

SEXTO CURSO PANAMERICANO DE METALURGIA

Dentro del Programa Multinacional de Metalurgia
(Programa Regional de Ciencia y Tecnología - OEA)

INTRODUCCION AL TRABAJADO MECANICO

Ingenieros L. Iurman, C.A. Martínez Vidal y A. Sáenz López

FASCICULO III

Capítulos 15 a 21

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

SEXTO CURSO PANAMERICANO DE METALURGIA

Dentro del Programa Multinacional de Metalurgia
(Programa Regional de Ciencia y Tecnología - OEA)

INTRODUCCION AL TRABAJADO MECANICO

Ingenieros L. Iurman, C.A. Martínez Vidal y A. Sáenz López

FASCICULO III

Capítulos 15 a 21

PUNTO 15.-

CLASIFICACION DE PROCESOS

1. INTRODUCCION.

El trabajado, o conformado de los metales tiene dos objetivos principales. Uno de ellos consiste en desarrollar una forma de un cuerpo metálico de tal manera que el mismo sirva para un propósito específico de la mejor manera posible. El otro objetivo es el de mejorar las propiedades del metal llevándolas a una combinación que sea favorable para un propósito dado. Estos dos objetivos son, en la mayor parte de los casos, interdependientes. Existen varias combinaciones de forma y propiedades que pueden a veces servir a un propósito determinado, debiéndose buscar en cada caso la solución óptima.

Frecuentemente, pueden alcanzarse los mismos objetivos que en el trabajado mediante otros procesos o mediante la combinación de uno o varios procesos con el trabajado. También, el trabajado es complementado usualmente por procedimientos adicionales para obtener la forma final. Sólo en casos excepcionales está una pieza procesada exclusivamente por trabajado lista para ser puesta en servicio. Más generalmente, varias piezas conformadas son ensambladas por unión (joining) entre sí o por la unión de una o más partes con piezas metálicas producidas por otros métodos, o con cuerpos no metálicos. Además, el acabado de la mayor parte de los objetos metálicos requiere que alguna parte de metal sea eliminada de la pieza procesada, por operaciones de corte (shearing), maquinado (machining), y o rectificado (grinding).

2. METODOS DE PROCESADO DE METALES

Se pueden dividir los métodos de procesado de los metales en los siguientes más importantes :

- Fundición
- Trabajado plástico o conformado, y corte
- Tratamiento térmico.
- Maquinado (y rectificado)
- Unión
- Acabado

Cada uno de estos grupos de procesos se aplica básicamente a un fenómeno físico-químico particular, con la excepción de la unión y del acabado.

La fundición consiste en obtener una pieza mediante la transformación del estado líquido al sólido.

El conformado se aplica a la obtención de piezas en el estado sólido, hecha posible por la propiedad que posee la mayor parte de los metales, denominada ductilidad o plasticidad.

Corte es el término general usado para la separación completa o parcial de un metal por medio de cuchillas. Consiste en un conformado llevado a cabo hasta que se agote la ductilidad del metal.

El tratamiento térmico se refiere a cambios controlados de temperatura que producen grandes variaciones en las propiedades de un número limitado de aleaciones metálicas. Tales metales están sujetos a cambios físico-químicos de su estructura si se aumenta o disminuye la temperatura.

El maquinado comprende un grupo de procesos en los cuales se quita material de una pieza (lo que resulta en una pérdida de peso), para obtener una forma deseada. Es posible debido a la propiedad de los metales y otros materiales de romper si están sujetos a un ataque severo, tal como el de las herramientas de maquinado.

La unión puede considerarse como la contraparte del maquinado, dado que la mayor parte de los métodos de unión se basan en la adición de peso. La gran variedad de métodos de unión no está basada en propiedades metálicas específicas, sino que la mayoría pertenece a alguno de los tres grupos siguientes : 1) unión por fusión; 2) fijación de varias piezas juntas mediante el conformado y 3) pegado de una superficie a otra mediante un adhesivo no metálico.

El acabado es un término muy ambiguo. Se relaciona específicamente con todas las operaciones que sirven para hacer adecuado a su aplicación final al producto obtenido por otro proceso. Así, puede incluir operaciones de maquinado y de unión, pulido, pintura, etc.

3. CRITERIOS PARA LA CLASIFICACION DE LOS PROCESOS

No existe un acuerdo general para la clasificación de los procesos de conformado. La siguiente es una lista parcial de las muchas sugerencias hechas para lograrlo :

- a) Trabajado en frío o en caliente (por sobre o por debajo de la temperatura de recristalización)
- b) Conformado con virutamiento o sin virutamiento.
- c) Forma del material trabajado o de la pieza terminada (trabajado de chapas, de barras, etc.)
- d) Estado de tensiones en la pieza durante el conformado. (simple o combinado).
- e) Tipo de tensión que actúa durante el conformado.
- f) Tamaño de la zona de deformación (localizada o general)
- g) Conformado con flujo estacionario o no.

- a) Bajas o altas velocidades de deformación.
- 1) Operaciones de conformado primarias o secundarias.

De lo anterior se deduce que ninguna clasificación única caracteriza completamente a la operación de conformado. Así en la práctica un proceso se designa por su mayor característica y tantas subdivisiones posteriores cuantas sean necesarias. Por ejemplo, comúnmente se usa como clasificación principal trabajado en caliente o en frío. Esta terminología es desafortunada, dado que ahora se sabe que la mayor parte de las operaciones de conformado pueden llevarse a cabo en frío o en caliente, aunque ello no sea la práctica corriente. Sin embargo, la práctica cambia, como lo indica la tendencia de reemplazar los procesos de maquinado convencional por los procesos sin virutamiento; el maquinado convencional a temperatura ambiente para las aleaciones duras, por un maquinado en caliente, etc.

Se desprende de ello que debería haber algo más fundamental para una clasificación adecuada de los procesos. Una elección razonable parece ser el estado de tensiones a que está sometido el material, que se verá en el próximo punto.

4. CLASIFICACION DE LOS PROCESOS POR ESTADO DE TENSIONES

Sobre la base de los estados de tensiones inducidos en la pieza que se va conformando, los múltiples procesos existentes pueden clasificarse en un número más bien reducido de categorías que son las siguientes :

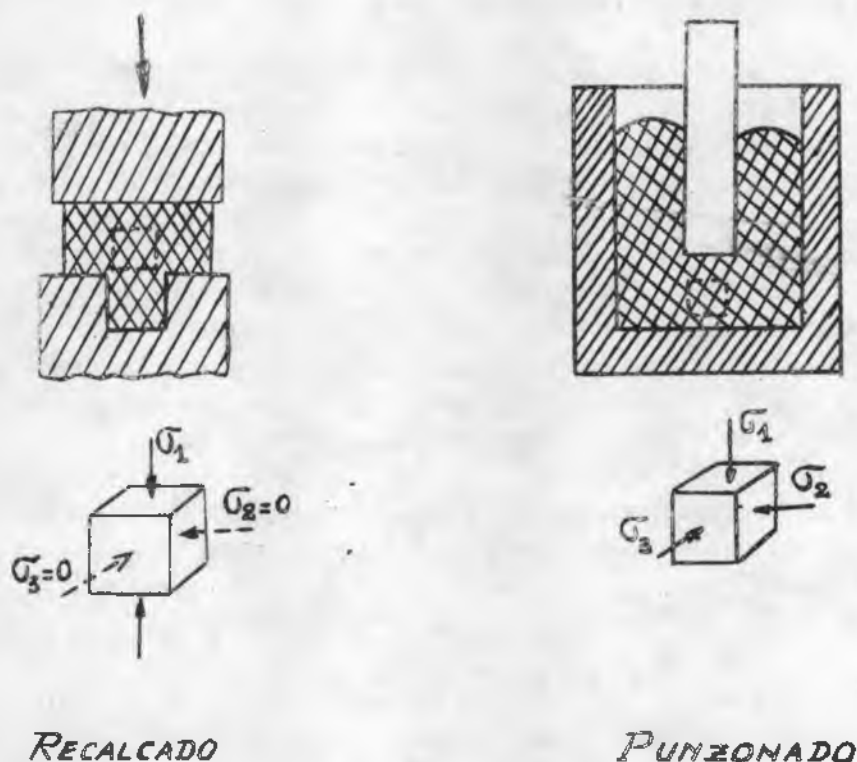
- a) Procesos de compresión directa.
- b) Procesos de compresión indirecta.
- c) Procesos de tracción.
- d) Procesos de flexión.
- e) Procesos de corte.

a) Procesos de compresión directa :

Constituyen el mayor grupo de los métodos de trabajado. Se dividen usualmente en tres grupos diferentes : 1) Forja; 2) Extrusión y punzonado, y 3) Laminado. Estos procesos tienen en común el hecho de que las fuerzas aplicadas son de compresión y que las tensiones resultantes son también de compresión.

Además, el metal fluye en direcciones normales a la tensión de compresión aplicada.

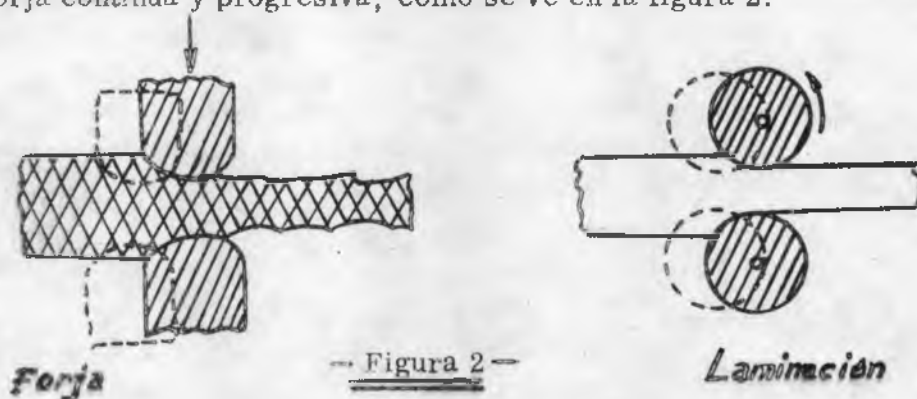
El estado de tensiones varía desde la compresión triaxial en casos tales como acunado y extrusión (punzonado), a la uniaxial, como en el recalca-do, (ver figura 1).



— Figura 1 —

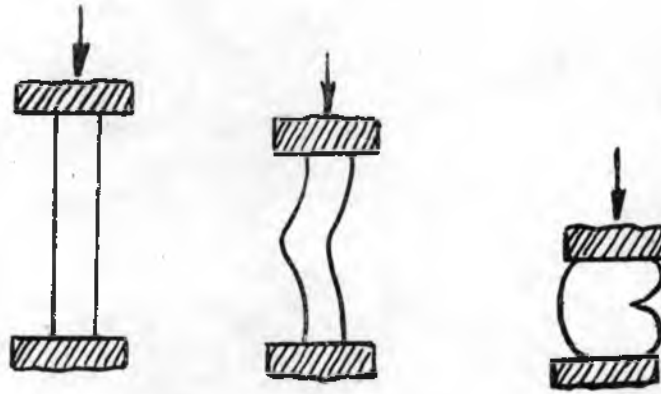
En otros procesos, tales como laminado y forja, la fricción entre las herramientas y el metal produce también fuerzas de compresión en las direcciones perpendiculares a la de compresión aplicada. La magnitud de estas tensiones de compresión laterales depende de varios factores. El más importante de estos factores es la condición de las superficies del metal y de la herramienta, en combinación con el tipo de lubricación por un lado, y la extensión relativa del área de contacto, por el otro.

Los procesos de laminado son fundamentalmente los mismos que lo de forja y de extrusión. El laminado puede considerarse como un proceso de forja continua y progresiva, como se ve en la figura 2.



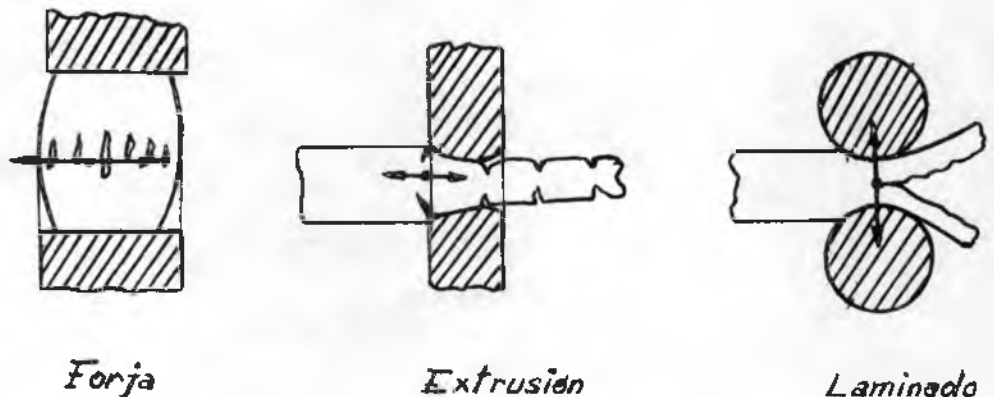
— Figura 2 —

Debido al estado de tensiones aplicado, es de suponer que los límites de conformabilidad serán más estrechos en el caso de compresión uniaxial, en que pueden originarse situaciones que conduzcan a inestabilidad plástica y provoquen pandeo. Es lo que se observa en el recalado cuando se sobrepasan ciertos valores de la relación longitud libre-diámetro de pieza (ver figura 3)



— Figura 3 —

Sin embargo éste no es el caso más general, y la mayor parte de las fallas que se producen durante este tipo de procesos se deben a tensiones de tracción. Estas pueden denominarse tensiones de tracción "secundarias" dado que su origen no se reconoce con facilidad en muchos casos. Algunos tipos comunes se ilustran en la figura 4.



— Figura 4 —

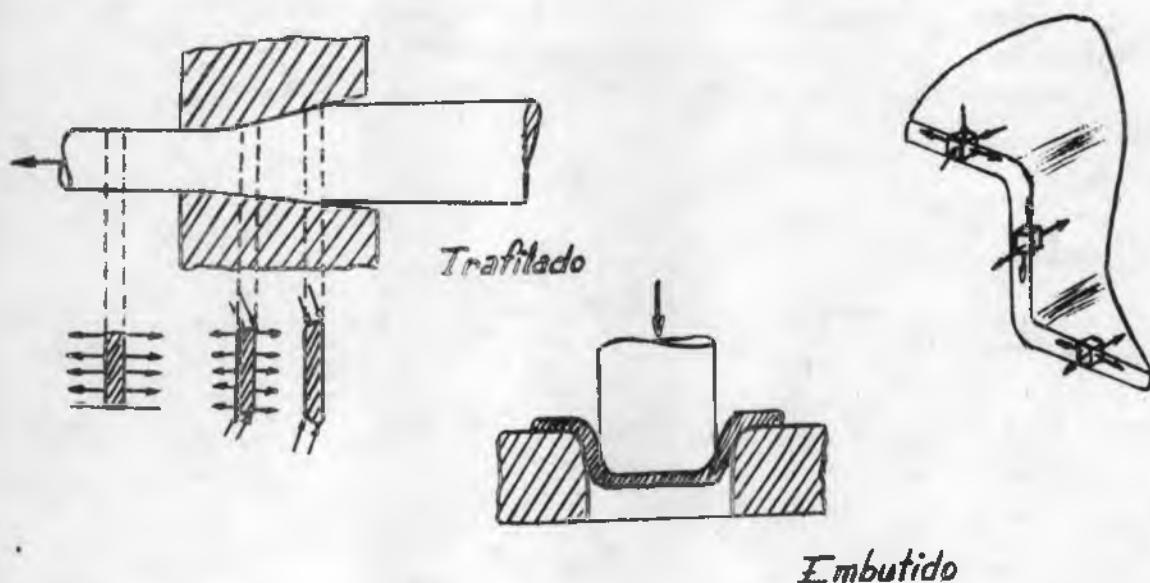
Por este motivo entre otros, por ejemplo, la forja en matriz cerrada es superior a la que se realiza en matriz abierta. Siempre que se puedan

agregar tensiones de compresión laterales se disminuirá el peligro de la aparición de las tensiones de tracción secundarias.

b) Procesos de compresión indirecta:

Incluyen procesos de trafilado, embutido y estirado de tubos. En la mayor parte de estos procesos, las tensiones provocadas directamente por las fuerzas aplicadas comprenden tracciones. Sin embargo, estas tensiones de tracción son usualmente menores que las reactivas de compresión desarrolladas en una o en ambas direcciones perpendiculares a la fuerza aplicada. El metal fluye entonces bajo la acción combinada de tensiones de tracción (en una dirección) y de compresión (en por lo menos una de las otras dos direcciones). Como consecuencia, la presión sobre las superficies de las herramientas es considerablemente menor que la de los procesos de compresión directa y no excede a la requerida para la compresión uniaxial tal como la desarrollada en el recalcado libre.

Otra característica de este tipo de procesos es la gran variación de las tensiones a lo largo de la pieza. Así, en prácticamente todos los procesos de trefilado las fuerzas aplicadas crean tracciones de considerable magnitud en la proximidad del lugar donde son aplicadas. Al aumentar la distancia a estos puntos, las tensiones de compresión se hacen cada vez más predominantes y las tensiones de tracción se anulan en los cantos de las regiones que están siendo deformadas.

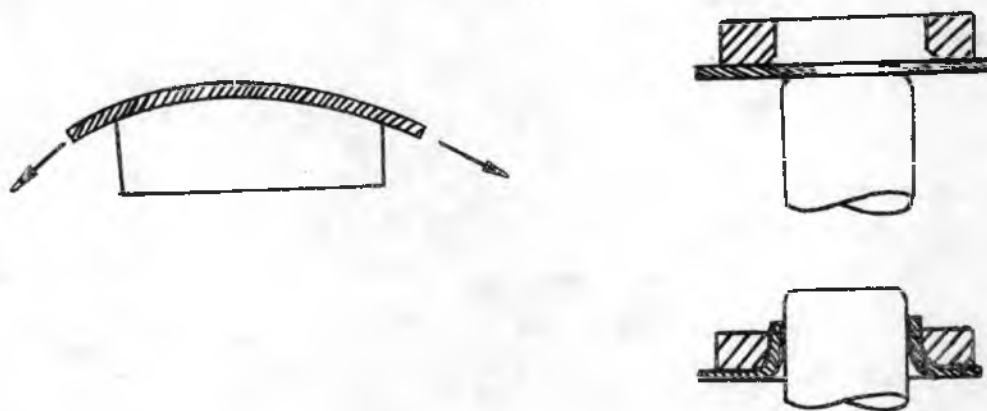


— Figura 5 —

Las limitaciones de los procesos de compresión indirecta pueden estar determinadas tanto por las tensiones de tracción como por las de compresión que se desarrollan en estas operaciones. Además, la flexión asociada con el embutido es una fuente de frecuentes dificultades en este proceso.

c) Procesos de tracción :

Son procesos de conformado en que las tensiones activas comprenden predominantemente tracciones. Se usan extensamente en la producción de piezas de chapas metálicas y también en el conformado de piezas con secciones varias.



— Figura 6 —

Los límites de conformabilidad en este tipo de procesos son una función, entre otros parámetros, del alargamiento observado en un ensayo de tracción uniaxial. En general, cuanto mayor es el alargamiento de un metal en un ensayo de tracción, tanto más profundas y severamente curvadas sean las piezas que con él se puedan fabricar.

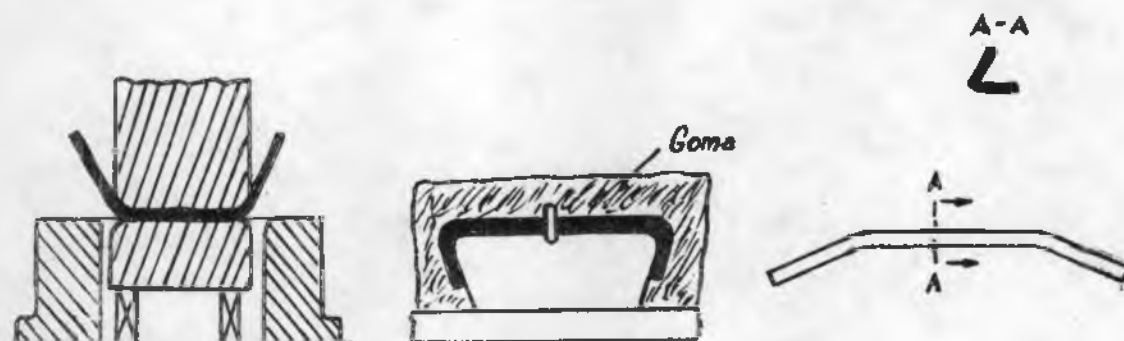
El máximo valor real de deformaciones localizadas a que puede ser estirado un metal, sin embargo, no es una cantidad definida sino que depende también del proceso de conformado y del perfil de la pieza. Para piezas muy finas y de contorno uniforme, el alargamiento permisible es algo menor que el observado en un ensayo de tracción. Piezas más gruesas y de contornos más intrincados pueden sin embargo ser estiradas localmente a menudo hasta deformaciones mayores sin fallas.

Además, el límite de conformabilidad depende también del estado de tensiones, o sea, de si las tensiones de tracción se producen únicamente en una dirección o en dos mutuamente perpendiculares. En general una pieza de chapa metálica puede estirarse en cualquiera de estas dos direcciones tanto o más que en una sola o en un ensayo de tracción. El objetivo primario de los métodos de estirado (por tracción) es el de

prevenir el desarrollo de tensiones de compresión para que no se produzca pandeo. Pero por otro lado las tensiones de tracción deben controlarse para evitar roturas. Es así que a veces se produce un pandeo u ondulado de la chapa, especialmente cuando se la tracciona en una sola dirección.

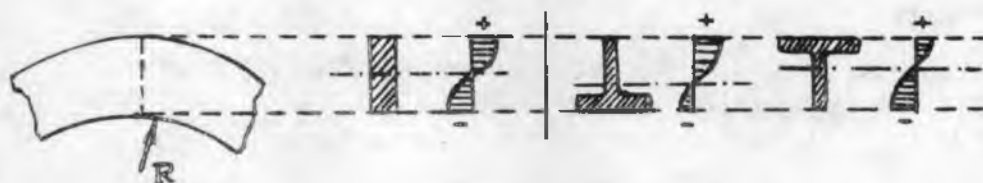
d) Proceso de flexión

Son procesos de conformado en los cuales se obtiene una flexión mediante la aplicación de un momento. Pueden usarse tanto para doblar secciones compactas tales como barras, placas, chapas y alambres, o bien secciones que no lo sean, obtenidas previamente por un estampado o un laminado, por ejemplo.



— Figura 7 —

En este tipo de procesos existe una gran variación de tensiones en una misma sección transversal. Se pasa de un estado de tracción en la fibra externa a uno de compresión en la interna. Cuando se doblan secciones compactas, el límite estará impuesto por las tensiones externas de tracción. En el caso de contornos más complicados, puede haber tensiones de compresión en la parte interior que conduzcan a pandeo, con lo cual serán éstas las tensiones que impongan el límite de conformabilidad.



— Figura 8 —

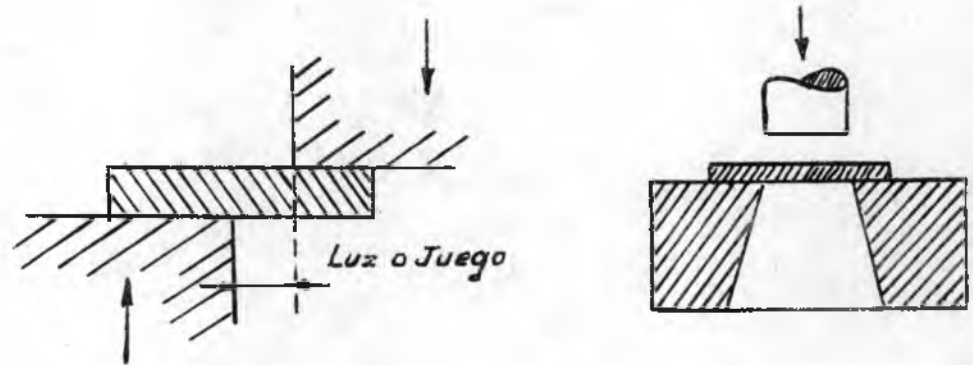
En este último caso se recurre al conformado por tracción.

e) Procesos de corte :

La fabricación de piezas metálicas incluye una variedad de operaciones preparatorias y de acabado. Las más importantes de éstas son el corte de piezas o chapas.

Los métodos de corte pueden clasificarse entre los de conformado. En ellos, un pequeño volumen de metal, confinado en una tira estrecha, es deformado plásticamente hasta el punto en que se produce la fractura o separación, creando así nuevas superficies en los cantos.

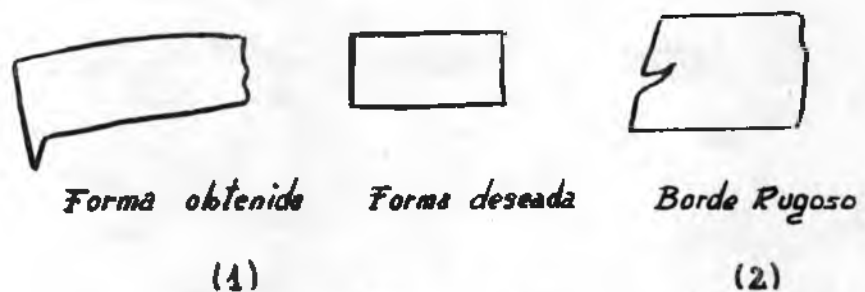
Estas operaciones de corte difieren del maquinado o rectificado en que no se transforma metal en piezas pequeñas, tales como virutas o polvo. En este sentido, el corte es un proceso de conformado plástico sin virutamiento. Básicamente, sin embargo, cualquier operación de maquinado puede considerarse como una progresión de pequeñas operaciones de corte.



— Figura 9 —

Los defectos encontrados en las operaciones de corte, que interfieren con el subsiguiente conformado o aplicación de la pieza, son de los siguientes dos tipos principales :

- 1) Distorsión de la pieza o desviación de la forma deseada.
- 2) Condición defectuosa de los cantos cortados



— Figura 10 —

BIBLIOGRAFIA :

- "Mechanics of Plastic Deformation"
E.G. Thomsen, Yang, Kobayashi
Ed. Mc Millan

- "Fundamentals of the Working of Metals"
G. Sachs
Ed. Pergamon Press

- "Metalurgia mecánica"
G. Dieter
Ed. Aguilar

Punto 16.

FRICCION Y LUBRICACION

16.1. OBJETIVO

Se ha visto en el punto 7.5.2., el efecto de la fricción en el ensayo de compresión. Interesa conocer más íntimamente este fenómeno de fricción y de las posibilidades de disminuirlo mediante la lubricación.

A tal fin se verá algo sobre superficies metálicas, pasando del estado ideal al real. Luego se las supondrá en contacto y, finalmente, se estudiará qué sucede al producirse un movimiento relativo entre ambas.

Se llegará así a la "fricción" y su clasificación. Se enunciarán las nuevas teorías de Hardy y de "fluencia subsuperficial".

Finalmente se dará una idea general sobre lubricación, indicando los requisitos que debe cumplir un "lubricante óptimo", e indicando la influencia de algunos parámetros sobre ella.

16.2. INTRODUCCION

Se puede definir muy crudamente como "fricción" a la "resistencia" que se ofrece al movimiento tangencial entre dos superficies, cuando hay aplicadas cargas normales".

Gran parte de la potencia consumida en los procesos de trabajado, se gasta en vencer la fricción, ya sea en los mecanismos de unión de las máquinas, o entre la herramienta y el material. El primero pertenece a la ingeniería mecánica, y sólo se tratará el segundo.

No obstante este aspecto negativo, se aprovecha la fricción, para asegurar el funcionamiento de todos los vehículos, por la relación neumático - pavimento o rueda - vía, para que frenen los mismos vehículos, para la relación zapata - freno, etc.

En nuestro caso, por ejemplo, la fricción posibilita el "agarre" (bite) del material por parte de los rodillos, en el proceso de laminación (sin tensión de antera).

La fricción también es fundamental en el control de la calidad superficial del material obtenido (por ejemplo en trefilación)

En los cálculos de trabajo y potencia de los procesos, la fricción representa un factor de incertidumbre. Interesa también, el estudio del caso límite de fricción, que es cuando hay imposibilidad del movimiento entre las dos superficies, o sea, cuando se produce "unión" o "soldadura" de ambas superficies.

Todas las técnicas de "unión en frío de metales", se basan en este concepto.

16.3. SUPERFICIES

Es conveniente comenzar con la pregunta : Qué es una superficie ? para luego, al pasar de una superficie ideal a una real, apreciar cómo se modifican sus propiedades.

Es compleja una definición metalúrgica de "superficie", pero se puede aceptar la que da el diccionario : "límite de separación entre dos medios". Si uno de esos medios es el aire, se tendrá la "superficie exterior" de un cuerpo o un objeto.

Sólo se analizarán las superficies metálicas.

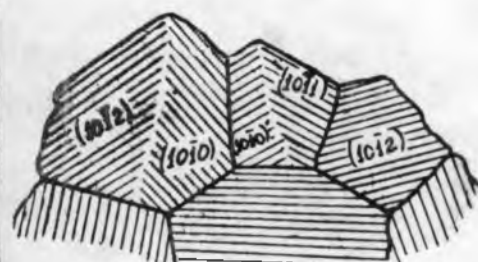
16.3.1. Superficie Ideal :

Una "superficie ideal", sería perfectamente plana y totalmente libre de "contaminantes" considerando como contaminantes a gases absorbidos o adsorbidos y compuestos inorgánicos y orgánicos depositados o formados (aleaciones, capas de óxidos, sulfuros, nitruros, capas de material lubricante, etc.).

Una superficie tal, se puede obtener en el instante de cortar un monocristal a temperatura del aire líquido, y en un vacío mejor que 10^{-10} mm. de Hg. La superficie es perfectamente plana, dado que el corte se produce en un plano cristalográfico, llamado "plano de clivaje" y la contaminación dependerá del tenor de impurezas del monocristal. La figura 1b, muestra una "superficie perfectamente plana", obtenida al cortar un monocristal de zinc, a baja temperatura. El plano que se ve es el (0001). En policristales se obtienen planos parciales, como muestra la figura 1a., y esquematiza la figura 1c, para magnesio.



(a)



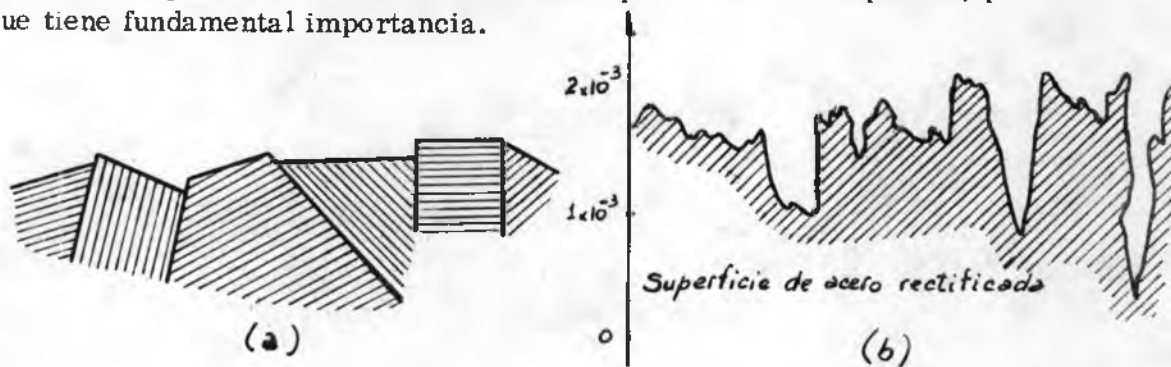
(c)

16.3.2. Rugosidad :

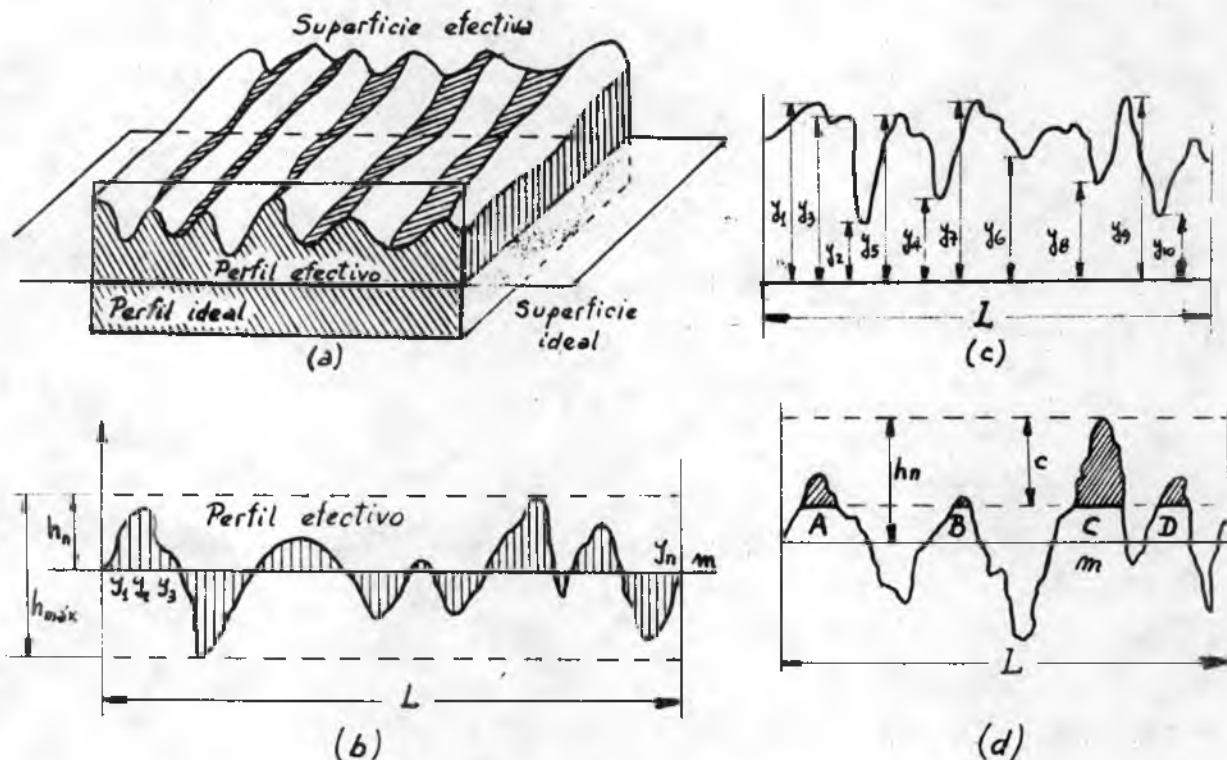
Aun considerando superficies ideales, en un policristal perfectamente pulido, se tendría el efecto de las diferentes orientaciones de los granos, y la rugosidad producida por el borde de grano figura 2 a. Esto hace que las condiciones enunciadas sean difíciles de obtener.

Insistamos en la primera de ellas, "superficie plana".

Las superficies obtenidas por otros procesos, distintos al descripto en el punto anterior, presentan, al ser observadas en el microscopio, irregularidades en forma de "picos" o "asperezas", con extensos "valles". La figura 2 b., muestra un perfil para una superficie rectificada de acero. Como es lógico, este perfil determina el "acabado superficial" de las piezas, por lo que tiene fundamental importancia.



— Figura 2 —

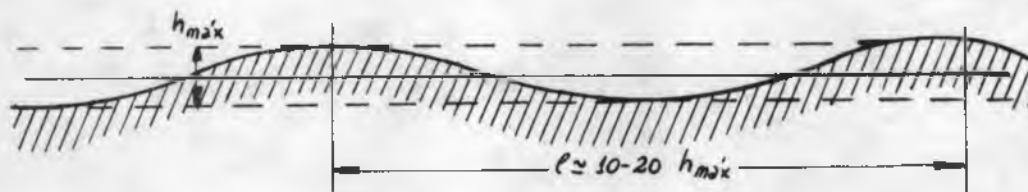


— Figura 3 —

La figura 3 y la tabla 1, dan definiciones de esta "rugosidad superficial" tomados de las normas IRAM 5.065 (Argentinas) y P-NB-93 o (ABNT, brasileñas).

La tabla 2, da idea de algunos valores promedios de rugosidad, obtenidos para distintos procesos. Se aprecia que los mejores: lapidado y pulido especular dan el orden 0,02 micrones, o sea 200 espaciados atómicos.

Se puede con una aproximación aceptable, tomar un modelo sinusoidal de la rugosidad. En el mismo, figura 4, la distancia entre "picos" es de 10 a 20 veces la altura del pico.



— Figura 4 —

El otro problema, es la "contaminación" superficial", o sea, dejar la "superficie metálica pura" al descubierto eliminando los gases absorbidos o adsorbidos, el óxido formado, etc. Si bien no es imposible de obtener, es muy difícil de mantener. Un metal maquinado o pulido, en segundos forma una capa de óxido, de espesor molecular. Asimismo, un metal desgasado en ultra-alto vacío (10^{-10} mm. de Hg), vuelve a recuperar los gases contaminantes en presiones de 10^{-3} a 10^{-2} mm. de Hg.

16.4. CONTACTO ENTRE DOS SUPERFICIES

Se comenzará viendo qué sucede cuando se ponen en contacto superficies ideales; luego se analizará lo mismo para superficies rugosas y contaminadas.

16.4.1. SUPERFICIES IDEALES :

Si se ponen en contacto dos superficies ideales, como las descritas en el punto 16.3.1., se puede suponer que se cumpliría la "teoría" de Tomlinson y, que se unirían esas superficies debido a las "fuerzas de atracción molecular". Es éste un problema actual en la astronáutica. Superficies que se unen en vacíos del orden de 10^{-12} a 10^{-15} mm. de Hg., como los existentes en el espacio.

Continuando con las suposiciones, se podría incluso decir, que no importarían los ángulos que formarían esas estructuras cristalinas, pues se tendrían las posibilidades de "bordes de grano por inclinación".

16.4.2. Superficies Rugosas :

Si las superficies presentan ahora rugosidad, se puede suponer que el "área real de contacto" (A_R) será mucho menor que el "área aparente de contacto" (A). Bowden y Tabor desarrollaron esta teoría, como base de la explicación del mecanismo de fricción.

También resulta lógica la suposición de que, al aumentar la fuerza con que se aprieta o comprime esas dos superficies, aumentará la A_R .

Se han efectuado cuidadosas medidas de estas "áreas reales de contacto" mediante mediciones de resistencia eléctrica entre las superficies. La Tabla 3, indica los valores obtenidos por Ragnar Holm (1946) con dos superficies de acero, muy bien acabadas. El área aparente era de 21 cm^2 .

- TABLA 3 -

Relación A_R/A entre superficies planas de acero

(Bowden y Tabor - p. 18)

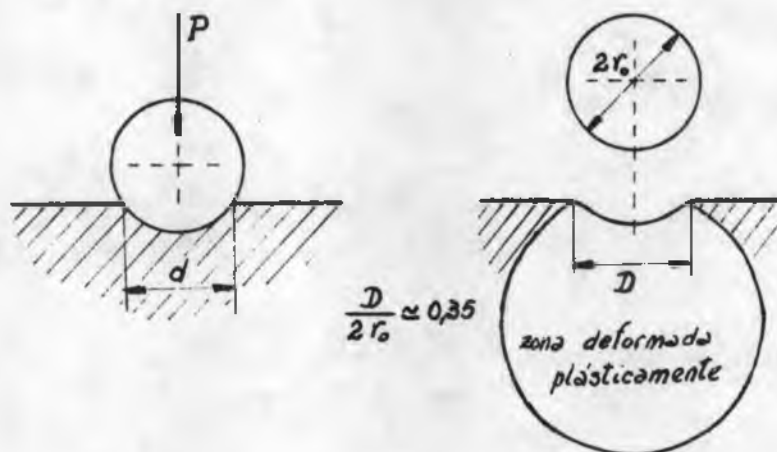
Carga (Kg.)	$A_R (\text{cm}^2)$	A_R/A
2	0.0002	10^{-5}
5	0.0005	2.5×10^{-5}
100	0.01	5×10^{-4}
500	0.05	2.5×10^{-3}

Mediciones efectuadas sobre una superficie aparente de 1 cm^2 en idénticas condiciones, confirmaron estos valores.

16.4.3. Indentación Elástica :

Conviene analizar con un poco más de detalle, qué sucede cuando se incrementa la fuerza de compresión entre las dos superficies. Para ello es muy cómodo estudiar la indentación de una bolilla de un material duro (para suponer que una superficie no deforma), sobre una superficie más blanda (llamado "Ensayo de dureza Brinell").

Empleando este tipo de ensayo, Hertz (1881) determinó el área real de contacto entre esfera de radio r_0 de acero, y distintos materiales. (Figura 5 a.).



— Figura 5 —

En general, obtenía : que el diámetro de la impronta, para indentación elástica (ambos materiales en la zona elástica) es :

$$d \approx c_1 \cdot \sqrt[3]{P \cdot r_0 \cdot (1/E_1 + 1/E_2)} \quad (1)$$

donde c_1 es una constante numérica y E_1 , y E_2 los módulos elásticos de la esfera y la placa respectivamente.

La presión media (p_m) en el casquete esférico de contacto, será :

$$p_m \approx c_2 \cdot \sqrt[3]{P} \cdot \left[r_0 (1/E_1 + 1/E_2) \right]^{-2/3} \quad (2)$$

16.4.4. Indentación Plástica :

Si se aumenta la fuerza de compresión, llegará un momento, en que se iniciará la fluencia en el metal más blando. Es difícil determinar valores para la zona elástico-plástica, por lo cual se prefiere trabajar en la zona totalmente plástica. Una vez retirada la esfera, quedará en la placa una impronta de diámetro D . (deformación permanente). En la figura 5b., se aprecia la deformación plástica, que en volumen se supone esférica bajo la zona de la impronta, mientras las zonas adyacentes se mantienen elásticas.

Existen dos criterios con que se mide dureza en base a este ensayo :

1º) El propuesto por Brinell : La carga aplicada se divide por

el área de contacto de la impronta, una vez retirada la carga.

2º) El propuesto por E. Meyer : La carga aplicada se divide por el área proyectada de la impronta, una vez retirada la carga.

Utilizando el segundo criterio, la medición del valor de dureza será :

$$H_M = P/A = \frac{P}{\pi D^2 / 4} \quad (3)$$

En la zona plástica, el valor de la tensión tangencial será de acuerdo a lo visto en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = Y/2 \quad (4)$$

mientras que el valor de las durezas medidas, es mucho mayor :

$$H_M \approx 2 \text{ á } 3 Y \quad (5)$$

esto se debe a la restricción dada por el material elástico adyacente, que se encuentra en compresión pura.

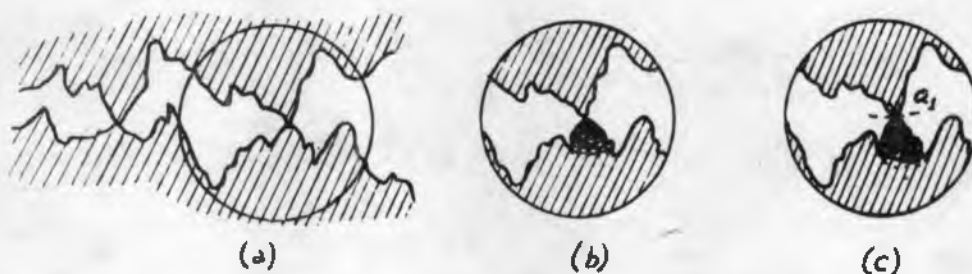
Luego, según la ecuación 16.3, el área de contacto A variará con la carga P, pero la dureza medida en su superficie, será constante e independiente del tamaño de la impronta.

16.4.5. Formación de "juntas"

Si se recuerda el perfil que tenía una superficie (figura 2 b), y ahora se suponen dos en contacto, se obtiene el perfil de la figura 6a). Siguiendo lo que sucede al aumentar la fuerza de compresión entre ellas se tendrá : Figura 6b) , se produce una "microindentación elástica" (suponiendo que los "picos" actúan como pequeños indentadores) que al aumentar la compresión, superará la fluencia y se convertirá en "microindentación plástica"; cuando la deformación plástica alcance un cierto valor, se producirá en algunos de estos puntos, una soldadura (figura 6 c), llamada "junta".

Este proceso tiene lugar para cargas en los picos relativamente pequeñas. Por ejemplo, para un acero cuya dureza sea $H \approx 600 \text{ Kg} / \text{mm}^2$, los "picos de rugosidad" se pueden semejar a indentadores esféricos de radio $r_2 \approx 10^{-4} \text{ mm.}$, con lo que la deformación plástica se iniciará, según la ecuación 16.5, para un valor de $Y \approx 0.4 H$. Se obtiene así un valor de carga de aproximadamente 10^{-2} gramos.

En la figura 6c), se ve que se ha producido una "junta" sobre una superficie de valor " a_1 ".



— Figura 6 —

La carga para obtenerla será :

$$P_1 = H \cdot a_1 \quad (6)$$

Si se considera una cantidad de "juntas", la "carga total" que se necesitará será :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots = H (a_1 + a_2 + a_3 + \dots) \quad (7)$$

o sea :

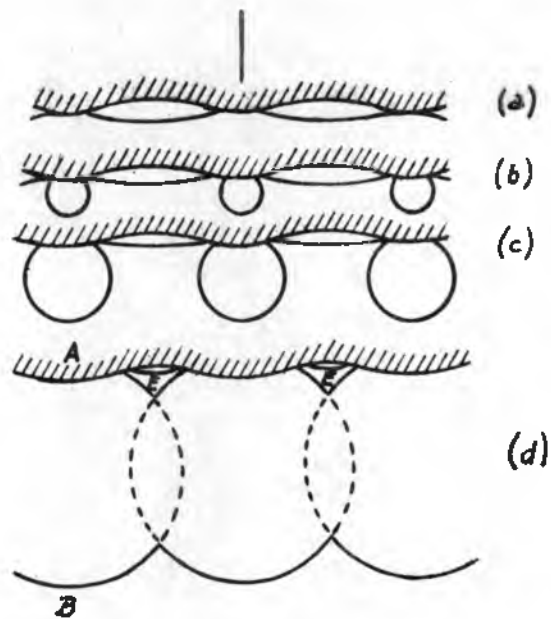
$$P = H \cdot A_R \quad (8)$$

que es prácticamente igual a la ecuación 16.3. El "área real de contacto" es independiente de la forma y tamaño de los picos y solamente función de la carga P .

Si se vuelve ahora al modelo sinusoidal de la figura 4, y se supone que una de las superficies, la de la herramienta, no deforma, se encuentra la secuencia dada en la figura 7.

En a) el contacto es elástico. Al incrementar la carga comienza la deformación plástica de las zonas en contacto, indicada como regiones circulares en el esquema b), y su "unión" o "soldadura".

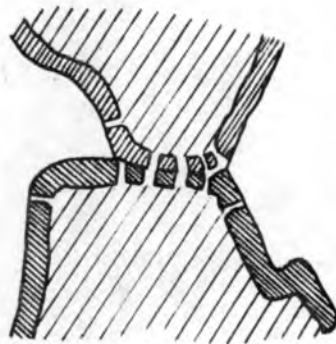
Posterioros aumentos de carga, incrementan la fluencia y la "unión" (esquema c), hasta llegar a alcanzar un equilibrio, en el cual, la superficie real de contacto ya es suficiente para evitar posterior deformación plástica en la superficie del metal. Hasta esta etapa, las zonas plásticas son todavía independientes.



- Figura 7 -

16.4.6. Efecto de la Contaminación Superficial :

Ya se dijo en el punto 16.3, que la contaminación presenta problemas. En el caso del contacto entre dos superficies metálicas, se podría suponer que una capa de óxido o del sulfuro, o de nitruro, separaría totalmente los metales puros, pero en general no es así. La figura 8 visualiza la razón de ello.



- Figura 8 -

En la zona de contacto, donde se producen deformaciones plásticas, las capas se romperán, dejando canales, de metal puro en los que se producirá la unión.

Naturalmente esto será función del comportamiento de esa capa. La mayor o menor fragilidad, el espesor que llegue a tener, etc. permitirán o no la rotura y la unión posterior metal-metal.

La presencia de gases en la superficie modifica también las posibilidades de unión. Los adsorbidos, generalmente, se encuentran en forma molecular, mientras que los absorbidos, en zonas muy cercanas a la superficie, quedan como impurezas, intersticiales en el caso del hidrógeno y el nitrógeno, que elevan la resistencia a la deformación plástica de la superficie metálica, y, por lo tanto, la deformación necesaria para la unión o formación de "juntas", se incrementará notablemente.

16.5. DESLIZAMIENTO ENTRE SUPERFICIES

Las superficies ya están en contacto. Al querer deslizar una sobre otra, aparece una "resistencia", a este movimiento tangencial, que se denomina, en el punto 16.2., como "fricción". Se tratará el tema en forma análoga a los puntos anteriores, o sea, primero cuando las superficies son ideales y luego, cuando no lo son.

16.5.1. Superficies Ideales :

Ya se indicó en el punto 16.4.1., que en este caso se produciría la unión inmediata de toda la superficie. Es el estado óptimo para los procesos de "unión o soldadura en frío de metales". En este caso, se considera que $A_R = A$.

Se verá posteriormente este caso límite.

16.5.2. Superficies Rugosas :

Hasta ahora se trató el contacto entre superficies metálicas, considerando a lo sumo, la existencia de capas de óxidos etc. Se diferenciará ahora cuando hay un medio lubricante entre ellas y cuando no lo hay.

16.5.2.1. Con medio lubricante :

Si existe una gruesa capa de lubricante y las cargas no son grandes se producirá el deslizamiento, y la resistencia a la fricción estará dada sólo por la viscosidad y otras propiedades del lubricante, que cumplirá con las leyes hidrodinámicas de Reynolds.

Al disminuir el espesor del lubricante, o al aumentar la carga, vá aumentando esa resistencia al deslizamiento, hasta que se producen contactos metal-metal, que se verán en el punto siguiente.

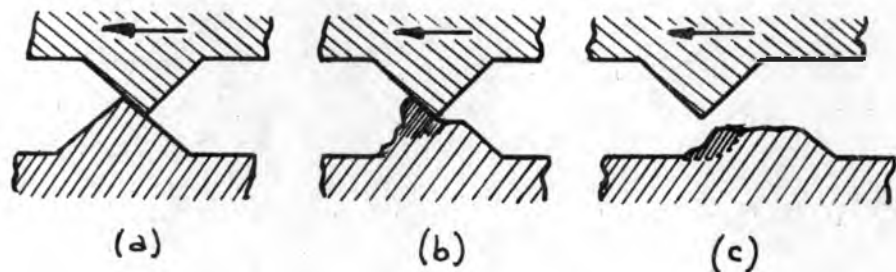
16.5.2.2. Sin medio lubricante :

Se puede considerar, en principio, que desaparece el medio lubricante. Se tendrán entonces etapas sucesivas en la resistencia al deslizamiento.

i) Se producen deformaciones elásticas en las zonas de contacto entre ambas superficies. El hecho de que deslicen en lugar de estar fijas, no varía lo dicho anteriormente.

ii) Aumenta la deformación, que llega a ser plástica, pero sin producir "juntas". Se produce "rayado" en la superficie más blanda, por efecto de la superficie dura. Este rayado es una indentación continua.

También puede producirse "desgarramiento" de la superficie, por el mecanismo que muestra la figura 9.



— Figura 9 —

Dos "picos" se enfrentan y, el más duro deforma plásticamente al más blando, eliminándolo y dejando una "meseta"

iii) Al aumentar la deformación, pueden formarse "juntas" o uniones entre las dos superficies, "juntas" que son rotas por el desplazamiento. Estas "uniones" y "roturas" de las mismas, se producen muy rápido. Por ejemplo, en una área soldada de 0.05 mm. de diámetro, si la superficie se mueve a una velocidad de 100 mm/seg., el tiempo de duración del ciclo unión-rotura será :

$$t = d/v = 0.05/100 = 0.0005 \text{ seg.}$$

Este mecanismo indicado en iii) y mostrando en la figura 10, produce "transferencia de materia", los fragmentos de metal blando se "sueldan" al duro, pero posteriores interacciones y colisiones, harán que esos fragmentos se despeguen y se conviertan en "partículas abrasivas".

En este caso, la fricción estará relacionada con la fuerzas tangenciales necesarias para "romper" las "uniones".

Esa fuerza será, recordando la ecuación 16.8.,

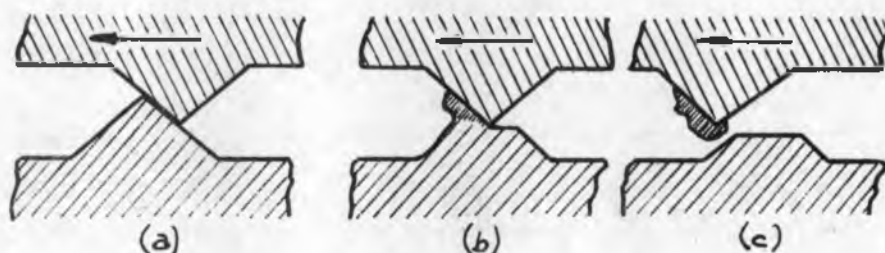
$$F_r = A_R \cdot \tau_r \quad (9)$$

donde τ_r = tensión tangencial de rotura de uniones.

En general, esta fuerza puede ser considerada como suma de los efectos de "desgarramiento" y "rotura", pero el primero resulta despreciable frente al de "rotura" o "corte".

$$F = F_r + F_d \text{ pero } F_d \ll F_r \quad (10)$$

En realidad habrá estados intermedios, o sea, zonas con lubricante y zonas sin lubricante, conjuntamente.



— Figura 10 —

16.6. FRICCION

El fenómeno de fricción, fué ya observado por Leonardo da Vinci en 1519. En 1699, Amontons, lo estudió sistemáticamente, enunciando las dos primeras leyes :

- 1) La resistencia a la fricción es proporcional a la carga normal.
- 2) La resistencia a la fricción es independiente del área de contacto.

La formulación matemática es :

$$\mu = F/P \quad (11)$$

μ = coeficiente de fricción, pero por las ecuaciones 16.8 y 16.9 resulta :

$$\mu = A_R \tau_r / A_R H = \tau_r / H \quad (12)$$

o bien :

$$\mu \approx \frac{\tau_r}{\sigma_n} \quad (13)$$

Esto es válido para metales libres de impurezas.

En 1781, Coulomb, completó estas leyes, distinguiendo entre fricción estática y dinámica y enunciando la tercera ley :

- 3) La resistencia a la fricción dinámica es independiente de la velocidad de deslizamiento.

16.6.1. Factores que afectan la fricción :

Por lo visto y de acuerdo con observaciones cualitativas, se pueden enumerar los siguientes factores como significativos :

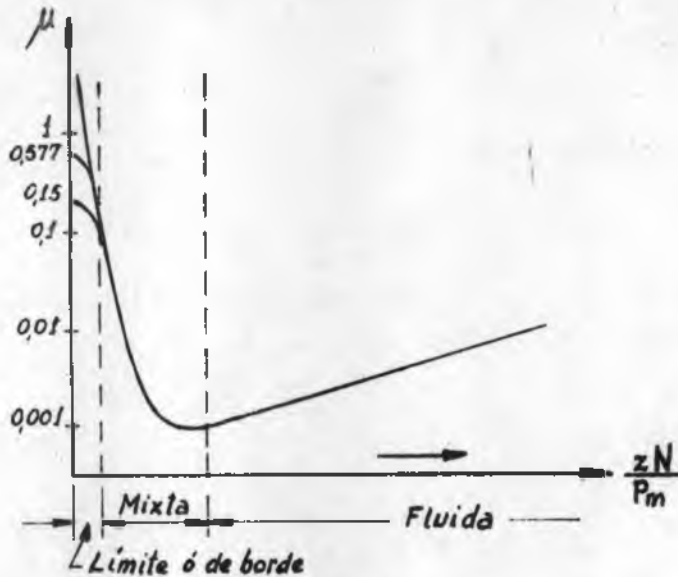
- a) Material que se trabaja
- b) Material de la matriz o herramienta
- c) Rugosidad superficial del material que se trabaja
- d) Rugosidad superficial de la matriz o herramienta
- e) Diseño o geometría de la matriz o herramienta
- f) Eficiencia del lubricante (viscosidad, posibilidad de formar compuestos, espesor de películas, etc.)
- g) Velocidad de deformación
- h) Temperatura de trabajo

16.6.2. Tipos de Fricción :

En 1929 Mc. Kee, estudió la fricción en ejes, considerando la viscosidad del lubricante (z) ; la velocidad en revoluciones por minuto del eje (N) y la presión media que soporta, p_m , fijando un parámetro zN/p_m .

La figura 11, muestra la curva :

$$\mu \text{ vs. } zN/p_m$$



— Figura 11 —

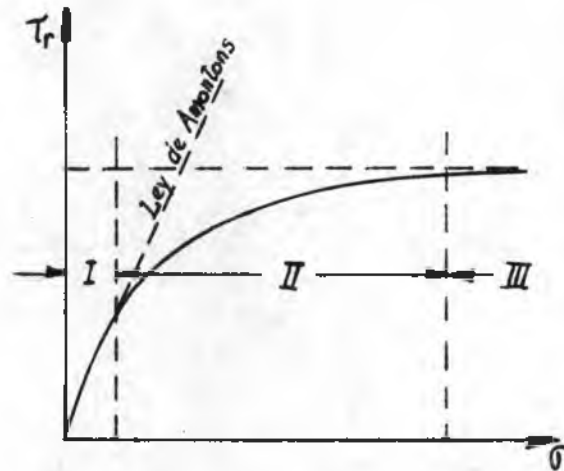
Se encuentran allí tres zonas. Si se adapta esa curva al problema de fricción en trabajado, se tiene :

- a) Fricción fluida. (fluid friction) - El metal deforma sobre una matriz o herramienta muy dura y con una gruesa capa de lubricante. Como ya se dijo en el punto 16.5.2.1., la resistencia a la fricción estará dada por las leyes hidrodinámicas de Reynolds. Los valores menores encontrados en trabajado, son del orden de $\mu \approx 0.01$.
- b) Fricción límite o de borde (boundary friction) - Al aumentar la carga o disminuir la velocidad disminuye el espesor del lubricante, hasta alcanzar valores moleculares, reaccionando en general con el metal. En esta zona pueden producirse "uniones" y "roturas", alternando con un deslizamiento sobre lubricante.
- c) Fricción mixta (semi-fluid o mixed friction) - Son los casos intermedios entre a) y b).
- d) Fricción en seco (dry friction) - Es un caso límite del b), en el que el deslizamiento se produce entre superficies metálicas totalmente libres de contaminantes.

16.6.3. Fricción Límite o de Borde :

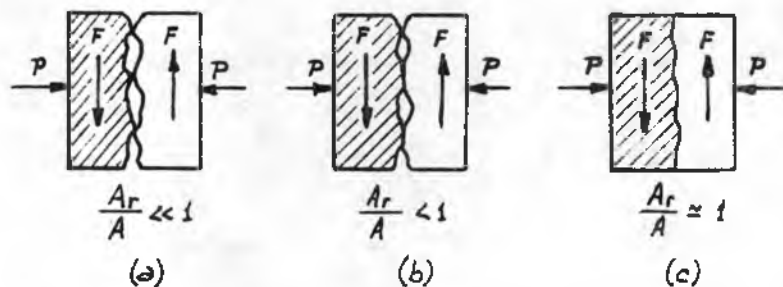
Evidentemente, es este tipo de fricción el que más interesa para el trabajado de metales, por lo que será estudiado en detalle. Se analizará la

tensión tangencial en función de la tensión normal, dada por la ecuación 16.13.



— Figura 12 —

En esta curva (figura 12) se encuentran tres regiones bien diferenciadas, cuyos modelos se ilustran en la figura 13.



— Figura 13 —

Región I · En primer momento, se cumple :

$$A_R/A \ll 1 \quad (14)$$

Para esta condición las "uniones" o "juntas" son pocas y se cumplen las leyes de Amontons, o sea :

$$\tau_r = \mu \cdot \sigma_n \quad (15)$$

En coordenadas $\tau_r - \sigma_n$ dará una recta de pendiente μ

Región II · Aumenta el área de contacto, con lo que aumenta el número de "juntas", vale decir

$$A_R/A < 1 \quad (16)$$

Posteriormente se verá qué sucede.

Región III : Se llega a la condición límite :

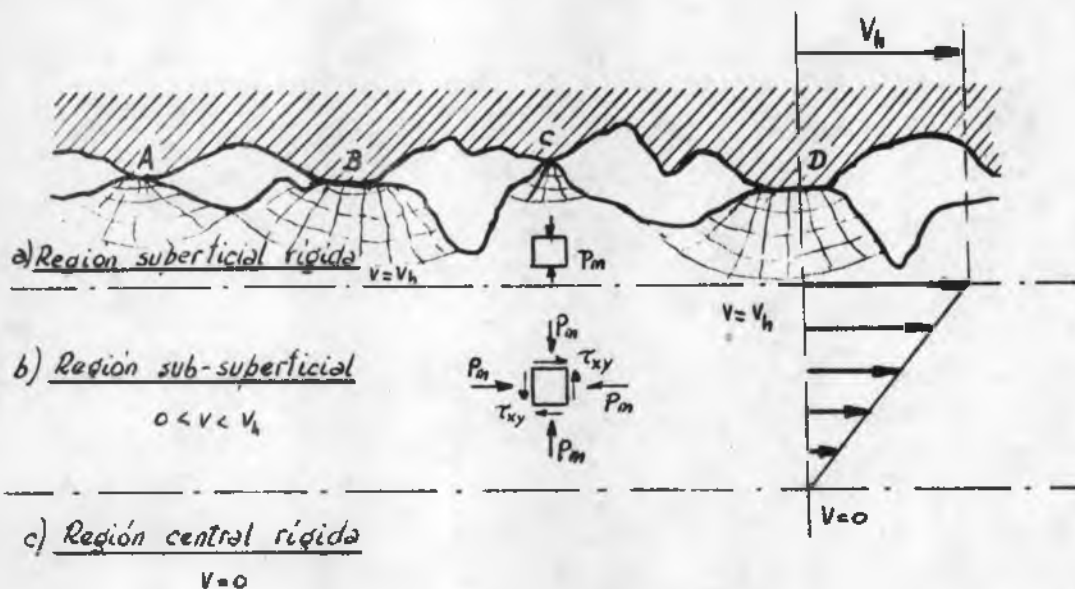
$$A_R/A \simeq 1 \quad (17)$$

Considérese que existe "fricción en seco" y el material se suelda en toda la superficie. Se puede semejarlo a un trozo sólido de metal sujeto a tensiones tangenciales que lo deforman plásticamente. La tensión tangencial es independiente de la normal y la curva se convierte en una recta paralela al eje horizontal. No se puede presentar nunca como caso real de fricción, pues nunca $A_R = A$.

El pasaje de la región I a la región II, se produce al comenzar la interpenetración de las zonas plásticas, caso d) en la figura 7). Se produce la llamada "fluencia subsuperficial". Hasta este momento se cumple la ley de Amontons.

16.6.4. Fluencia Subsuperficial

Hay un número grande de "juntas", y la ruptura por corte de las mismas no se produce inmediatamente. La figura 14, presenta un modelo de este mecanismo de fricción.



— Figura 14 —

La tensión tangencial, que ahora se denominará τ en vez de τ_r , disminuirá al aumentar la carga P o la superficie real de contacto A_R .

Para un material endurecible, τ dependerá del movimiento total tangencial, o sea de la deformación tangencial (δ_m) por la cual se acomoda la superficie, y de la profundidad de la zona plástica (valor AB en la figura 7 d).

Se tendrá entonces en la figura 14 :

- Una región con fuertes restricciones para fluir ($\tau = 0$) que se comportará casi como rígida. Su velocidad será igual que la de la herramienta $v = v_h$.
- La región subsuperficial que fluirá y se encontrará sometida a un estado de compresión hidrostática ($-p_m = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$) y a uno de corte (τ_{xy}). Al deformar, su velocidad variará, de acuerdo a la profundidad, entre $0 < v < v_h$.
- Finalmente, la región central rígida, cuya velocidad será cero. Para el punto C el estado de tensiones será :

$$\text{para la región a) } \bar{\sigma} = \sigma_n = \sigma_z = -p_m \quad (18)$$

$$\text{para la región b) } \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3\tau_{xy}^2} \quad (19)$$

pero como

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p_m \quad (20)$$

resulta

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3} \tau_{xy} \quad (21)$$

Al iniciarse la fluencia subsuperficial, el valor del coeficiente de fricción será, por las ecuaciones 16.15; 16.18 y 16.21 :

$$\mu = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_r} = \frac{\bar{\sigma}/\sqrt{3}}{\bar{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577 \quad (22)$$

Trabajos de Shaw, Ber y Mamir, han demostrado experimentalmente la existencia de la región II de fricción y de la fluencia subsuperficial.

Pearsall y Backofen, trazaron curvas τ vs $\bar{\sigma}$ para aluminio con y sin lubricante.

16.6.5. Aumento Superficial de Temperatura :

Al deslizar las superficies en contacto, el trabajo efectuado genera

calor y el aumento de temperatura, dependerá de :

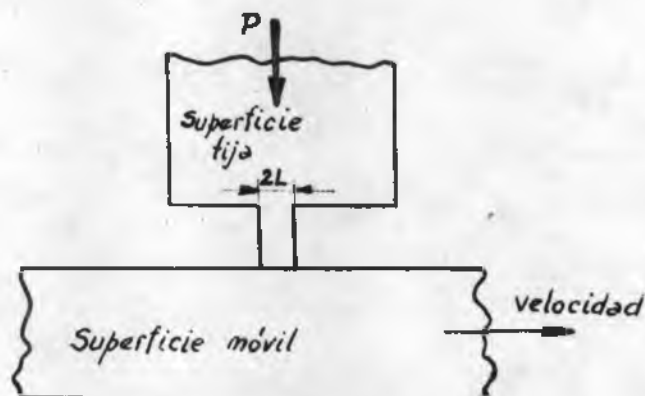
- 1) Conductividad térmica y emisividad de las superficies en contacto.
- 2) Area de las superficies en contacto y dimensión de los cuerpos.
- 3) Coeficiente de fricción.
- 4) Carga aplicada.
- 5) Velocidad de deslizamiento.
- 6) Temperatura del medio ambiente.

Se alcanzan localmente altas temperaturas (llegando a la temperatura de fusión del metal), pero sólo duran unos pocos microsegundos. Estos picos de temperatura explicarían que disminuya τ en las juntas soldadas, haciendo que el coeficiente de fricción dinámico sea menos que el estático.

Puede suceder que la reacción de oxidación sea exotérmica y la temperatura local alcanzada sea mucho mayor que la de fusión.

Tales el caso del aluminio o magnesio que ha producido explosiones.

Block en 1937, calculó los incrementos de temperatura, con un sistema como el de la figura 15.



— Figura 15 —

Obtuvo que :

$$\Delta T = \frac{\mu P g v}{4.2 L J} \cdot \frac{1}{k_1 + k_2} \quad (23)$$

donde : μ = coeficiente de fricción dinámico.

P = carga aplicada.

$2L \times 2L$ = área de contacto.

J = equivalente mecánico del calor

K_1 y K_2 = conductividad térmica.

v = velocidad de deslizamiento

Los resultados medidos o calculados con la ecuación 16.23 son concordantes para bajas velocidades. A altas velocidades el aumento de temperatura es menor, lo que podría explicarse por una refrigeración continua de la superficie superior. Una fórmula más elaborada indicaría que en este caso de alta velocidad, el ΔT sería función de $v^{1/2}$

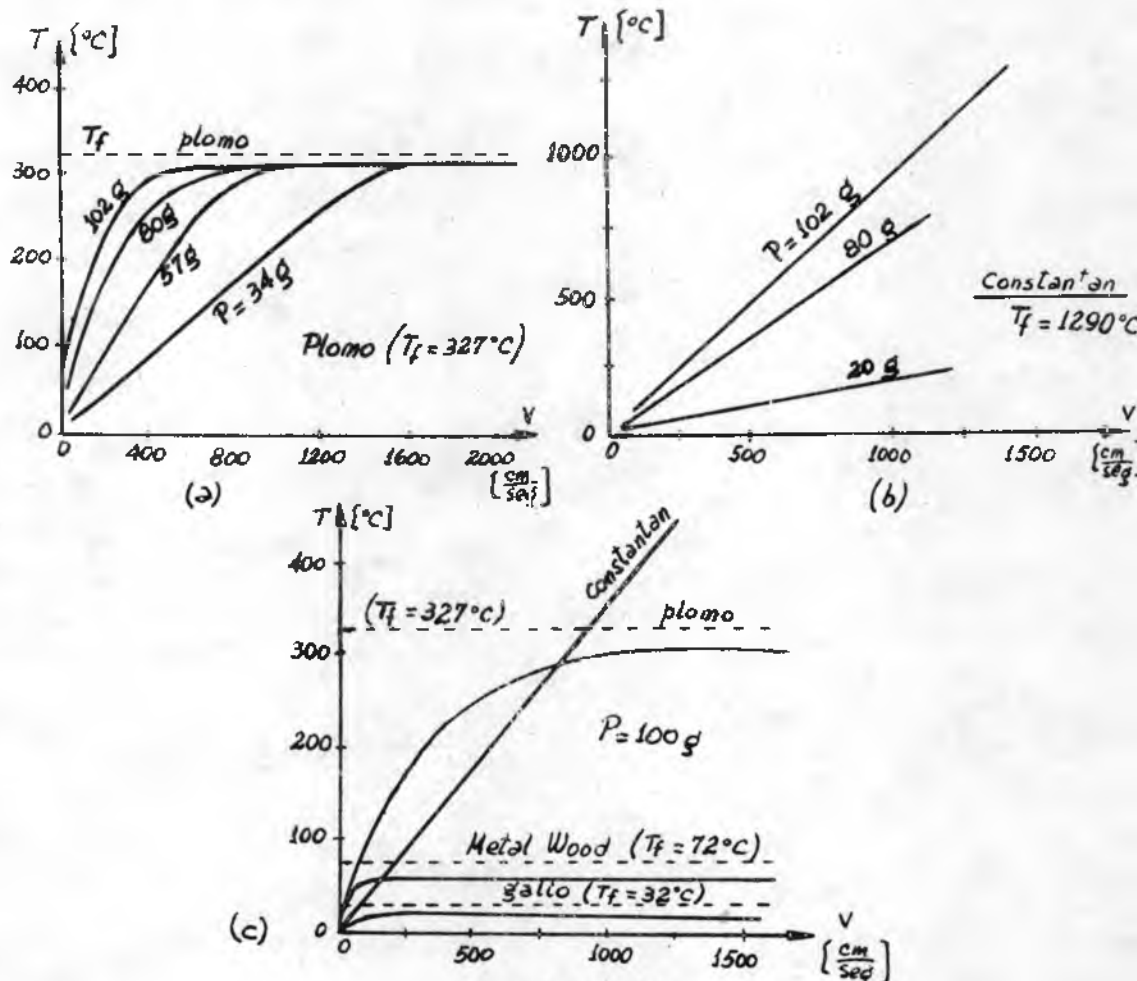
$$\Delta T = \frac{(k_1/\rho_1 c_1)^{1/2} \mu \cdot P \cdot g \cdot v}{3.8 L \cdot J \cdot [1.125 K_2 (k_1/\rho_1 c_1)^{1/2} + K_1 (L v)^{1/2}]} \quad (24)$$

donde

ρ_1 = peso específico de la superficie móvil.

c_1 = calor específico de la superficie móvil.

La figura 16 a) b) y c), muestra las temperaturas alcanzadas para pequeños cilindros de distintos metales y aleaciones, deslizando sobre una superficie de acero



- Figura 16 -

El aumento puntual de temperatura produce diversos efectos.

Enunciaremos algunos :

- 1) Desgarramiento superficial.
- 2) Soldadura por fricción.
- 3) Descomposición química del lubricante.
- 4) Fluencia superficial del metal.

16.6.6. Influencia del Estado Superficial:

Ya se habló en los puntos 16.3 y 16.4.b., de la contaminación superficial. De ésta interesan los óxidos, nitruros, sulfuros, etc. La Tabla 4, da algunos valores de μ para velocidades de aproximadamente 10 cm/min., en la que no hay aumento apreciable de temperatura. Es el trabajo de Campbell (1939) y las superficies han sido desgasadas en vacío y limpiadas químicamente.

TABLA 4

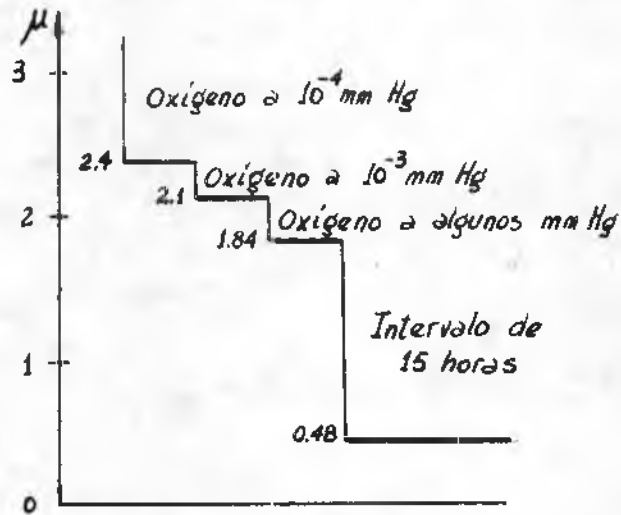
VALORES DE μ PARA DISTINTOS ESTADOS SUPERFICIALES

(Fuller, p. 329)

Metal	Sup. limpia	oxidada	sulfurada
acero-acero	$\mu = 0,78$	0.27	0.39
latón-latón	0,88	-	0,57
cobre-cobre	1,21	0.76	0,74
aluminio-aluminio	1,23	0.82	-

Se han efectuado ensayos en hierro, desgasado a 10^{-6} mm. de Hg. A esa presión, el coeficiente de fricción era aproximadamente 100. Prácticamente había unión. Se admitía oxígeno a distintas presiones, midiendo en cada caso el coeficiente de fricción.

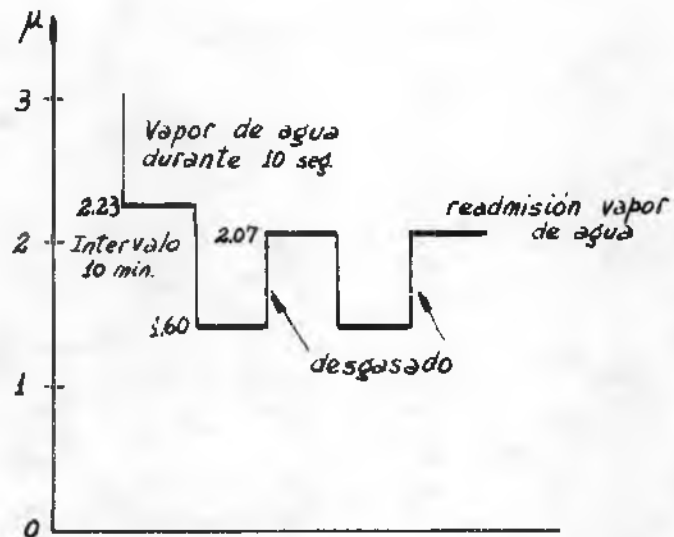
Pequeñas cantidades de oxígeno reducen notablemente fricción. La figura 17, muestra este efecto.



— Figura 17 —

Muchos gases y vapores producen efecto similar a vapor de agua, anhídrido carbónico, anhídrido sulfuroso, cloro, etc. Este efecto se debe en parte a la formación de capas de compuestos y en parte a simple adsorción física (adsorción de Van der Waals). El compuesto queda adherido a la superficie del metal desgasado a 10^{-6} mm. Hg., mientras que la capa de adsorción física se elimina reduciendo la presión.

La figura 18, muestra para vapor de agua sobre hierro. Al entrar vapor de agua durante 10 seg., se obtenía una notable reducción de μ , que continuaba si se dejaban pasar 10 min. Al degasar, volvía a aumentar μ y readmitiendo vapor de agua, volvía al valor anterior. Este ciclo se repetía fácilmente.



— Figura 18 —

16.6.7. Influencia de la Velocidad de Deslizamiento :

Se ha apreciado una marcada disminución del valor de μ con la velocidad de deslizamiento. Dokos (1946) obtuvo los valores indicados en la Tabla 5, para deslizamiento de acero de bajo carbono, sobre acero de medio carbono, con alta presión de contacto.

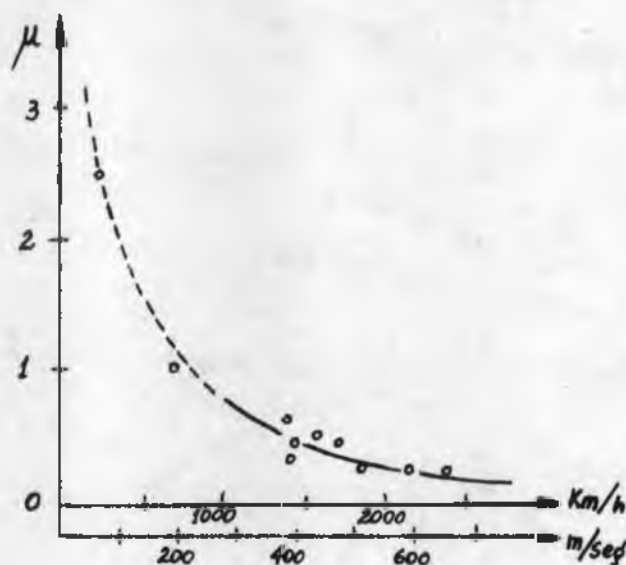
TABLA 5

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO

(Fuller, p. 333)

Velocidad (mm./seg.)	0.0025	0.025	0.25	2.5.	25	250	2.500
μ	0.53	0.48	0.39	0.31	0.23	0.19	0.18

Para muy grandes velocidades, J. W. Beams, usó una ultracentrífuga y esfera de acero suspendida con un electroimán. La figura 19, muestra los resultados obtenidos para la esfera de acero sobre una superficie de cobre, con una carga de 10 gramos.



— Figura 19 —

A velocidades normales, ($v < 5.000$ mm/seg), el coeficiente de fricción es aproximadamente cinco, ($\mu \approx 5$), lo cual es lógico pues las superficies son limpias y el ensayo se efectúa en un vacío mediano. Al

aumentar la velocidad, disminuye μ . A 500 Km/h $\mu \approx 1.6$; a 1.000 Km/h $\mu \approx 0.8$; a 2.000 Km/h baja a $\mu \approx 0.2$

A bajas velocidades se produce desgarramiento superficial (zona punteada de la curva). A grandes velocidades, la superficie de cobre funde, actúa como lubricante.

16.6.8. Efecto de la Dureza :

Se puede clasificar en forma grosera, los siguientes pares de metales en fricción.

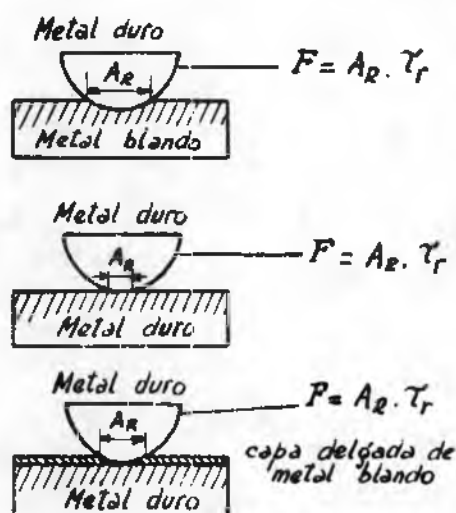
1) Un metal duro desliza sobre un metal blando. Ejemplo : acero sobre cobre. El cobre (superficie fija) tiende a soldarse sobre el acero y fragmentos de cobre quedarán en la superficie. El metal duro no sufre daño.

2) Un metal blando, desliza sobre un metal duro. Ejemplo : aluminio sobre acero. La superficie fija dura, rayará al metal blando.

3) Metales similares deslizan uno sobre otro. Ejemplo : níquel sobre níquel. Dan las condiciones más severas de trabajado.

Cada tipo caracteriza estados finales superficiales, modificados por las propiedades de ambos materiales, grado de lubricación, etc.

Resulta conveniente analizar lo que sucede con una herramienta de metal duro que desliza sobre superficies distintas, (Figura 20 a, y b.).



— Figura 20 —

La fuerza a aplicar para vencer la fricción (ecuación 5.9) es :

$F = A_R \cdot \tau_r$ luego, en el caso a), al deslizar sobre un metal blando, se tiene :

$$\begin{aligned} \tau_r &- \text{es pequeño} \\ A_R &- \text{es grande} \end{aligned} \quad (25)$$

En el caso b), si el metal es duro :

$$\begin{aligned} \tau_r &- \text{es grande} \\ A_R &- \text{es pequeña} \end{aligned} \quad (26)$$

Sumando ambos efectos, si se deposita una capa delgada de un material blando sobre la superficie dura, figura 20 c., resulta que :

$$\begin{aligned} \tau_r &- \text{es pequeño} \\ A_R &- \text{es pequeña} \end{aligned} \quad (27)$$

Se ha conseguido un efecto lubricante, disminuyendo así la fricción. Como ya se verá, se utiliza para trabajar materiales muy duros o con fuerte endurecimiento por trabajado, como el acero inoxidable.

Por ejemplo : semiesfera de acero deslizando sobre una superficie plana de acero con una carga de 1 kg; $\mu \approx 0,8$. Si se cubre la superficie con una capa delgada de indio de aproximadamente 10 micrones, el valor baja a $\approx 0,2$. Para estas condiciones, un aumento moderado de presión aplicada produce sólo un ligero aumento en la superficie de contacto A_R . Se tiene que, si la carga se eleva a 8 Kg., $\mu \approx 0,04$. Este aumento de carga tiene como límite la rotura de la capa lubricante, con el consiguiente contacto acero-acero nuevamente y el aumento del coeficiente de fricción.

16.6.9. Ejemplo de cálculo para Trefilación :

Se verá el efecto de la fricción, en un ejemplo muy sencillo. Consideremos un proceso de trefilación; primero en el caso ideal sin fricción, la fuerza necesaria F , para trefilar de una sección S_0 a S_1 ; la matriz presenta un ángulo α .

- 1) Sin fricción : Proyectando sobre el eje x (figura 21, cara superior de la matriz).

$$\sigma_x = p \cdot \sin \alpha \quad (28)$$

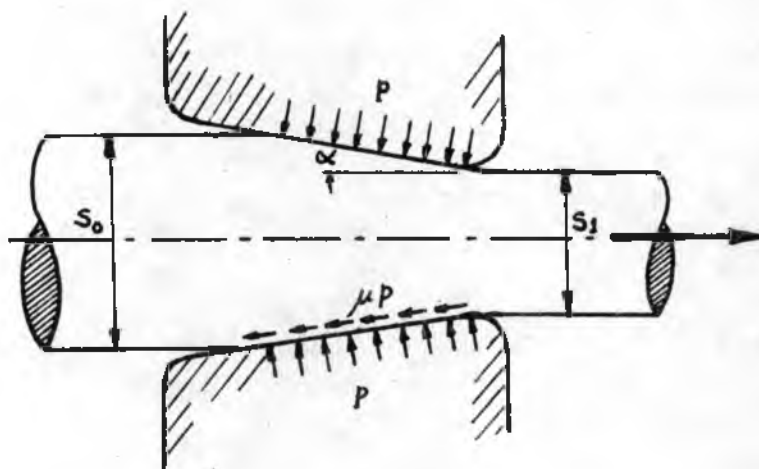
Esta tensión actuará sobre la corona circular ($S_0 - S_1$), proyectada normalmente a la dirección x .

$$S_x = \frac{S_o - S_1}{\text{sen } \alpha} \quad (29)$$

luego la fuerza F_o será :

$$\begin{aligned} F_o &= \sigma_x \cdot S_x = p \cdot \text{sen } \alpha \cdot \frac{S_o - S_1}{\text{sen } \alpha} = \\ &= p \cdot (S_o - S_1) \end{aligned} \quad (30)$$

2) Con fricción : Se supondrá que p no varía y que $\mu = c \frac{te}{\text{te}}$:
(cara inferior de la matriz en la figura 21.



— Figura 21 —

La proyección de tensiones dará :

$$\sigma_x = p \text{ sen } \alpha + \mu p \cdot \text{cos } \alpha \quad (31)$$

y como la sección S_x es la misma, tendremos:

$$\begin{aligned} F_1 &= \sigma_x S_x = p (S_o - S_1) + p (S_o - S_1) \frac{\mu \text{cos } \alpha}{\text{sen } \alpha} \end{aligned}$$

$$F_1 = F_o (1 + \mu \cotg \alpha) \quad (32)$$

Por ejemplo para $\mu = 0.10$ y $\alpha = 6^\circ$:

$$F_1 \simeq 2 F_o \quad (33)$$

Se duplica la fuerza necesaria, con el consiguiente riesgo de romper el alambre que se trefila. En la ecuación 16.32, se vé que el efecto de la

fricción aumenta cuanto mayor es el coeficiente de fricción y cuanto menor es el ángulo

Al trefilar, lo mismo que en cualquier otro proceso de trabajado, el coeficiente de fricción no es constante, debido a las variaciones de presión, velocidad de deformación, etc. Las soluciones basadas en valores de μ constante, como en el ejemplo presente, tendrán un cierto grado de error.

16.7 LUBRICACION

En el punto 16.5.2. se analizaron superficies con y sin medio lubricante y, al clasificar los tipos de fricción en el punto 16.6.2., volvimos a emplear la lubricación. En el punto 16.6.8., vimos una capa delgada de metal blando como lubricante. Esto lleva a la idea de la estrecha conexión entre fricción y lubricación, resultando prácticamente imposible su estudio o análisis por separado.

Empleando una definición cruda y amplia a la vez, al igual que el punto 16.2. para "fricción", puede decirse que "Lubricación es el proceso por el cual se procura disminuir la fricción entre dos superficies en movimiento relativo".

Esa disminución tiene que ser compatible con las necesidades de "agarre" (Bite) y "acabado", además de desarrollar menor cantidad de calor de fricción y menor "daño por fricción" (wear).

En el punto 16.6.2., se efectuó una clasificación de tipos de fricción. No es erróneo utilizar la misma para lubricación. Así será :

- a) Lubricación fluida (fluid Lubrication) - $\mu \approx 0.005$
- b) Lubricación mixta (semi-fluid lubrication) - $\mu \approx 0.005 - 0.05$
- c) Lubricación límite o de borde (boundary lubrication) $\mu \approx 0.02$ á 0.1 , que comparamos con la fricción en seco ($\mu \approx 0.5$ á 1.5)

Evidentemente, nuestro interés se concentra en los tipos b) y c), más especialmente el c). Sin embargo la transición es gradual.

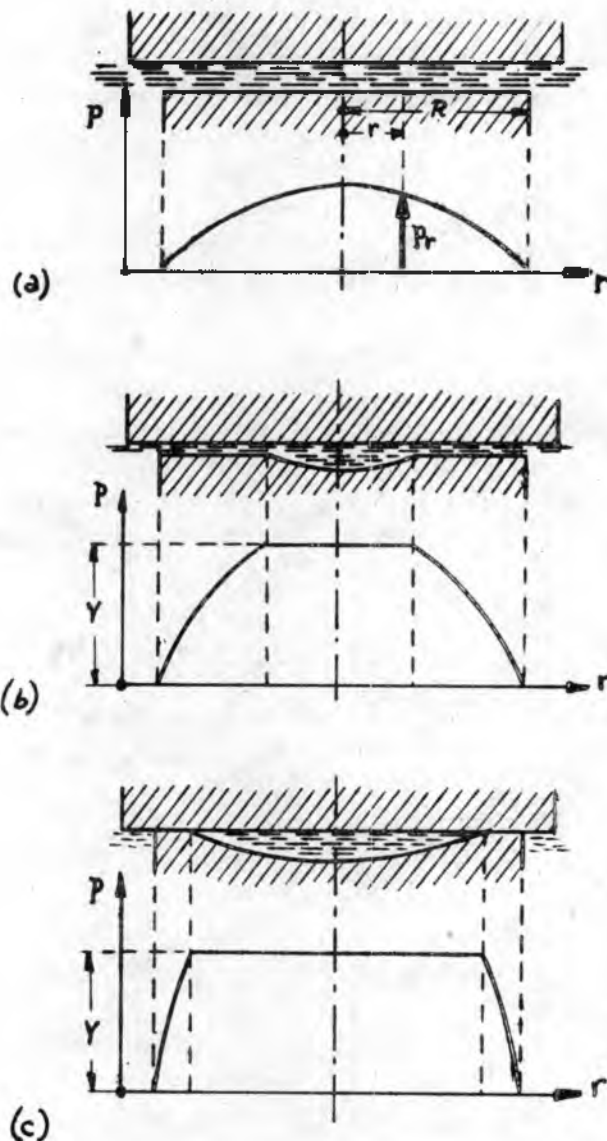
Por ejemplo : si comprimimos un disco de aluminio con una matriz de acero, y usamos un lubricante de viscosidad independiente de la presión, tendremos (figura 22 a.) a una distancia r del centro, se cumplirá la ley parabólica :

$$p_r = \frac{3 \eta v (R^2 - r^2)}{t^3} \quad (34)$$

donde η - viscosidad
 v - velocidad normal de acercamiento
 t - espesor de la capa lubricante

Llega un momento en que $P_r \approx Y$ en el centro, con lo cual el disco deformará plásticamente. La figura 22 b.) muestra ya una zona central deformada y en la figura 22 c.) se han unido los bordes, quedando una bolsa con lubricante en el centro. Se observan dos zonas :

- 1) Central, con lubricación hidrodinámica (a alta presión)
 - 2) Bordes, con lubricación límite.
- Es un caso de "lubricación mixta".



- Figura 22 -

16.7.1. Lubricación Límite o de Borde :

Inicialmente, Hardy (1936) llamó "lubricación límite" a la obtenida con algunos compuestos orgánicos derivados del petróleo (parafinas, alcoholes, ácidos grasos, etc.) cuyo comportamiento era muy especial. Actualmente se ha extendido el término a otros tipos de lubricantes, incluyendo también los "sólidos".

Hardy estudió este tipo de fricción y lubricación, llegando a considerar la fricción como un estado de fuerzas superficiales de tipo molecular. El lubricante, lo que haría, sería disminuir ese campo de fuerzas, pero sin eliminarlo totalmente.

Bowden y Tabor (1948), completaron estos trabajos, determinando la formación de compuestos de espesor molecular en las superficies, como resultado de la interacción "Óxido metálico-lubricante". Se efectuó con Rayos X y difracción electrónica. Incluso demostraron que si las superficies metálicas no están oxidadas, disminuye notablemente el efecto de lubricación, y no se forma el compuesto.

Deryagin (1952) interpreta matemáticamente los resultados de Hardy, y propone reemplazar la ecuación 16.11 por :

$$F = \mu (P + A_R K_o) \quad (35)$$

donde K_o = cohesión específica de la superficie en contacto.

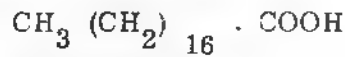
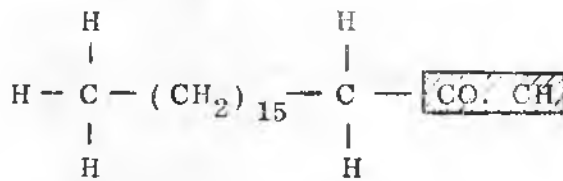
Para deformación elástica, $\mu A_R K_o$ es despreciable y nos queda la ecuación 16.11, pero para deformación plástica es importante.

16.7.2. Mecanismos de Lubricación Límite :

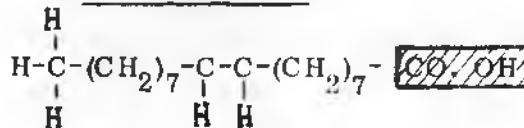
Para este tipo de lubricación, el lubricante debe tener baja tensión superficial y una adhesión muy buena con las superficies metálicas.

Esta última condición, se cumple, por ejemplo, para una cantidad de lubricantes orgánicos, como : hidrocarburos saturados nafténicos, alcoholes, ácidos, etc.

Por ejemplo, el ácido oleico o el esteárico, cuyas composiciones se indican en la figura 23.



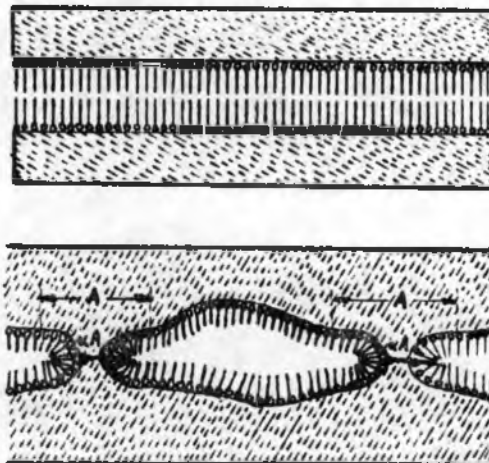
ácido esteárico



ácido oleico

— Figura 23 —

La "cabeza polar" ataca la superficie metálica y se fija a ella. Se produce una delgada capa de "jabón" que es la que produce el efecto lubricante. En la figura 24 se puede ver esquematizado este tipo de lubricación.



— Figura 24 —

La figura 24 a.) sería para dos superficies planas ideales o sin carga. En la figura 24.b) se aprecia el efecto al ser cargado. La capa lubricante soporta parte de la carga, y existen "juntas" metal-metal. Bowden y Tabor, encontraron la siguiente relación :

$$F = \alpha A_R \tau + A_R (1 - \alpha) \tau_L \quad (36)$$

donde $\alpha A_R \tau$ - debida a las "juntas" metálicas
 $A_R (1 - \alpha) \tau_L$ - debida a la capa lubricante adherida.
 τ_L - tensión tangencial del lubricante
 α - porcentaje del área real de contacto como "juntas".

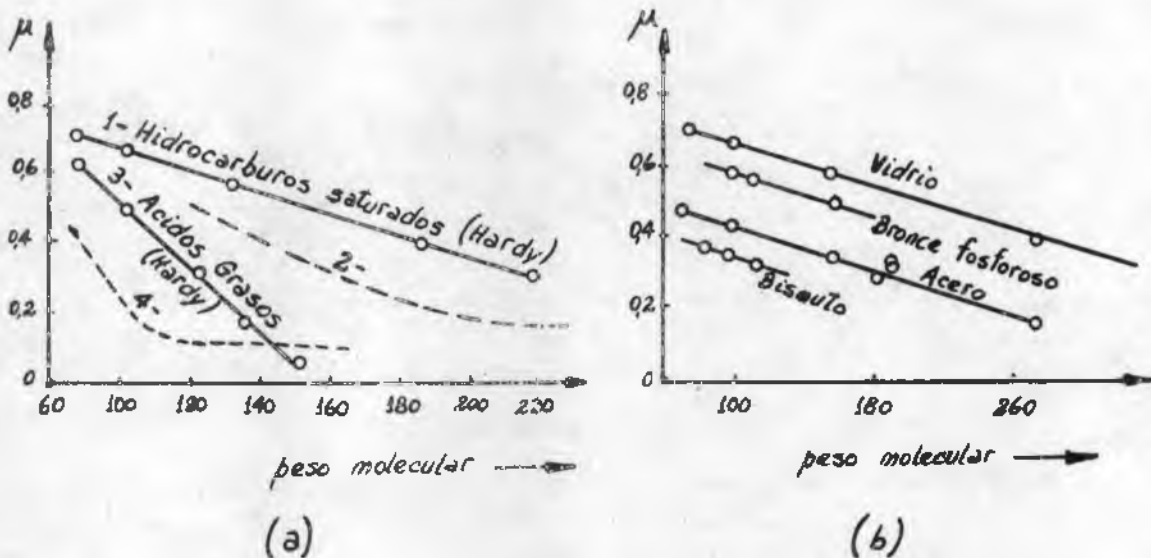
El efecto lubricante dependerá de la reactividad superficial del metal. La Tabla 6 muestra este efecto, comparando los coeficientes de fricción para superficies limpias, con aceite parafínico como lubricante y aceite parafínico más 1% de ácido láurico.

16.7.3. Efectos sobre Lubricantes Orgánicos

i) Peso molecular : Distintas experiencias han demostrado que al aumentar el peso molecular del compuesto orgánico utilizado, disminuye la fricción. Las figuras 25.a) y 25.b), muestran este efecto . La primera sobre acero con :

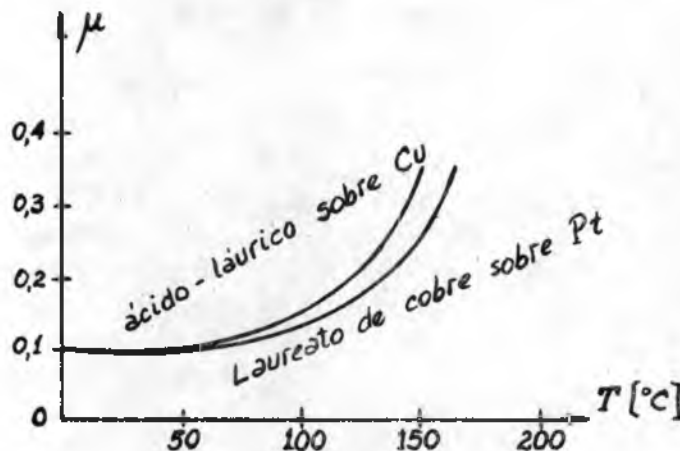
- 1) Hidrocarburos saturados - Valores obtenidos por Hardy para fricción estática.
- 2) Hidrocarburos saturados - Obtenidos por Bowden y Tabor, considerando "agarre".
- 3) Acidos grasos (Hardy)
- 4) Acidos grasos (Bowden y Tabor)

La figura 25 b.) muestra hidrocarburos saturados sobre distintos metales (Campbell - 1932)



— Figura 25 —

- ii) Capa de compuesto (jabón) : Estudiando el efecto de la temperatura se llegó a la conclusión de que es la capa de jabón formado, y no el ácido, lo que provee la lubricación. Se usan normalmente los "jabones" en vez de los ácidos como lubricantes (por ejemplo oleato de calcio), pero el efecto lubricante es menor que el del jabón formado "in situ".
- iii) Temperatura : La figura 26 muestra la variación del coeficiente de fricción en función de la temperatura. En general tienen buen comportamiento, incluso hasta el punto de fusión del ácido usado como lubricante.



— Figura 26 —

16.7.4. Lubricantes para Altas Presiones :

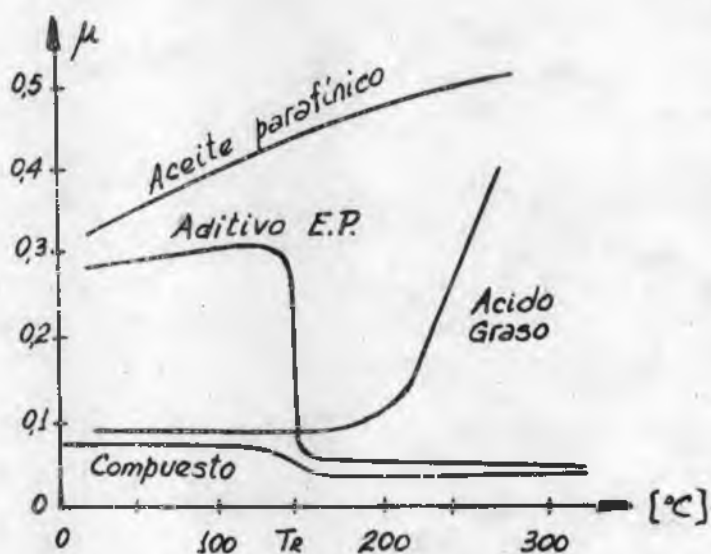
Se le agregan a los enunciados en el punto 16.7.2, aditivos, llamados "aditivos E.P." (extrema presión), y los elementos básicos de ellos son :

- a) Cloro - Como ester clorado - Forma capas de cloruros de hasta 1000 Å. Si se recubre con parafina, disminuye aún mas μ .
- b) Azufre - Aceites y grasas sulfuradas - Forma sulfuros y, si bien no tiene un efecto lubricante tan marcado como los cloruros, es más estable a altas temperaturas. Se usa por ejemplo "ácido oleico sulfurado". La figura 27) compara ambos, sobre hierro.
- c) Fósforo - Como fosfatos - Se supone que forma una capa eutéctica de bajo punto de fusión. Se produce un efecto de pulido de la superficie.



— Figura 27 —

En general, la mezcla de estos lubricantes con los "aditivos E.P." produce resultados óptimos. Es conveniente agregar ácidos grasos (en pequeñas porciones) a los hidrocarburos o aceites parafínicos, para mejorar las condiciones de lubricación de los aditivos E.P. La figura 28 muestra la variación de cada uno de estos elementos y del compuesto obtenido, en función de la temperatura. Por abajo de T_R , el ácido graso provee buena lubricación y, el aditivo E.P., mantiene esas condiciones, incluso más allá de la fusión del ácido graso.



— Figura 28 —

16.7.4.1 Selección de Aditivos E. P.

La reactividad de los aditivos, que para máquinas en funcionamiento produciría ataques muy intenso, en los procesos de trabajado, en los cuales el metal está poco tiempo en contacto con el lubricante, puede ser alta. Algunos factores que influyen pueden ser :

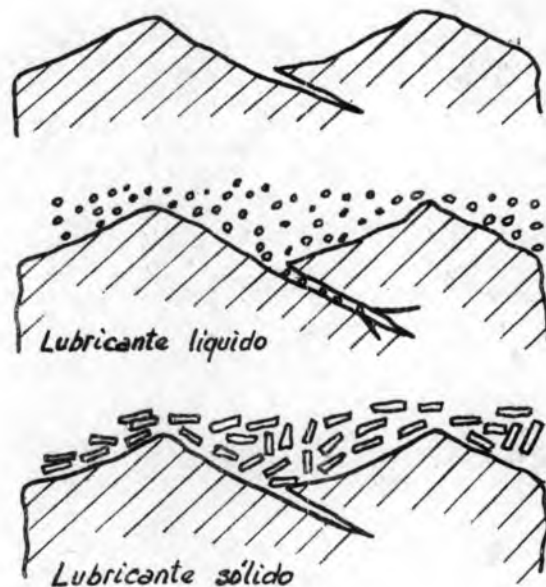
- i) Estabilidad a elevada temperatura.
- ii) Poca corrosión con las superficies metálicas.
- iii) Baja resistencia a la fricción.
- iv) Interacción con otros lubricantes o aditivos.

16.7.5. Lubricantes Sólidos :

Las condiciones extremas de trabajo han llevado a utilizar lubricantes sólidos, en general pueden agruparse en :

- a) Sólidos cristalinos o estructura laminar (grafito y S_2M_0)
- b) Sólidos orgánicos
- c) Capas de metales blandos
- d) Recubrimientos químicos
- e) Capas de polímeros

Además de mantener coeficientes de fricción bajos para severas presiones y/o altas temperaturas, los mecanismos de fractura superficial disminuyen, como muestra la Figura 29.



— Figura 29 —

El lubricante fluido, entre a la grieta y ayuda a propagarla, mientras que los sólidos tienden a cerrarlas.

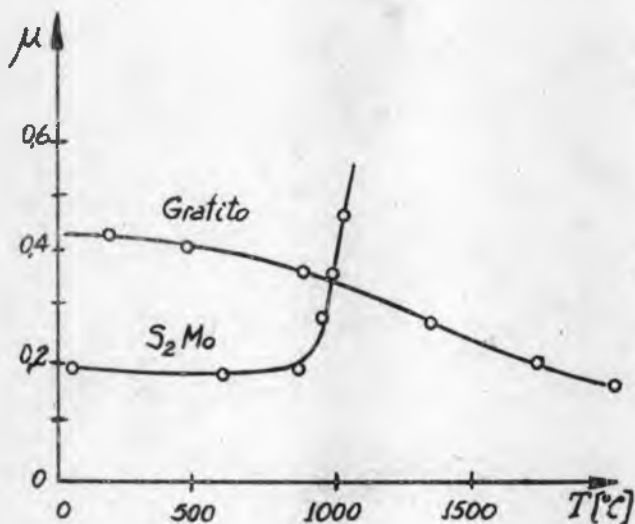
16.7.5.1 Sólidos cristalinos o de estructura laminar :

Se enuncian los más importantes, grafito y bisulfuro de molibdeno. Otros son : bisulfuro de tungsteno, nitruro de boro, óxido de boro, mica, vermiculita, sulfato de plata, etc. También se utilizan talco, óxido de calcio, albayade, etc., principalmente en procesos de trabajado.

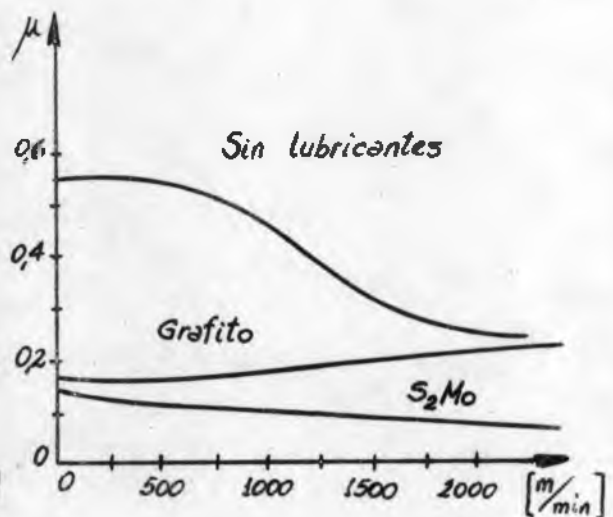
Por ejemplo el grafito : En vacío es mediano lubricante ($\mu \approx 0.5$), mientras que en aire baja a ($\mu \approx 0.2$). A los 400°C , comienza a sublimar como CO_2 , pero en atmósfera inerte puede trabajar comodamente hasta 2500°C .

El S_2Mo es estable hasta unos 700°C en aire, luego se descompone dando trióxido de molibdeno, que es abrasivo y aumenta notablemente el coeficiente de fricción. Comparando el efecto de temperatura de ambos a partir de 700°C , resultará mejor el grafito, pero con respecto a la velocidad de deslizamiento, resulta mejor el S_2Mo .

Las figuras 30 a) y 30 b) muestran ambos casos.



— Figura 30 a. —



— Figura 30 b. —

16.7.5.2 - Sólidos orgánicos

Se usan algunos de alto peso molecular.

a) Ceras :

sintéticas, microcristalinas, de abejas, etc. Normalmente se agrega a las ceras 10 a 20% grafito coloidal.

b) Jabones metálicos :

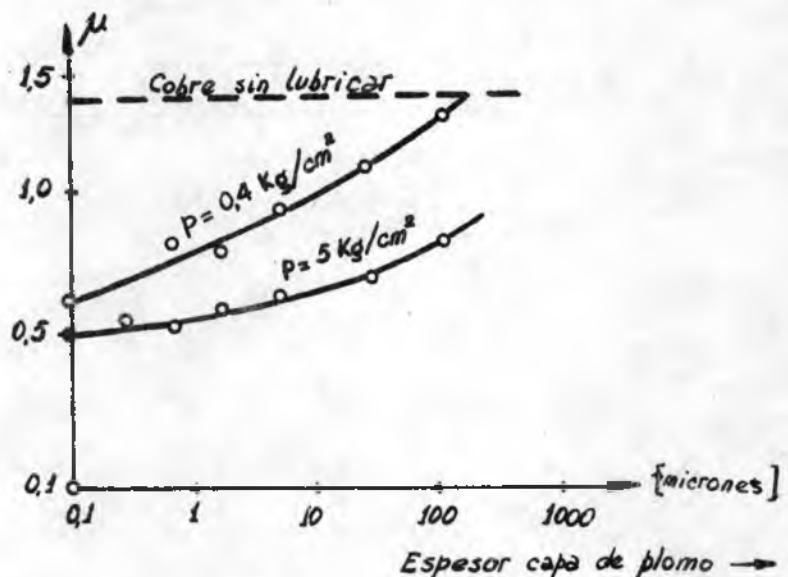
Estearatos (de aluminio, calcio, zinc, magnesio, sodio, litio), oleatos, palmitatos, etc. Son más difíciles de usar, pues no son solubles y presentan alto punto de fusión. Se aplican en polvo.

c) Sebos, bentonita etc. etc.

A menudo se utilizan mezclados, para mejorar sus condiciones de estabilidad a temperatura.

16.7.5.3. - Capas de metales blandos

Ya se vió en el punto 16.6.8. la posibilidad de usar capas delgadas de metales blandos, como lubricantes para deformar metales muy duros o con fuerte grado de endurecimiento, como el acero inoxidable. Se usan para ello plomo, indio, estaño, cobre o zinc, con espesores efectivos entre 10 y 0.1 micrones. La figura 31 muestra el coeficiente de fricción para cobre recubierto de plomo en función del espesor de la capa de plomo.



- Figura 31 -

16.7.5.4 - Recubrimientos químicos

Pertenecen a este tipo los sulfuros, cloruros y fosfuros, que se formaban sobre los metales por la reacción química con los aditivos E.P.

Otros tipos de recubrimientos son :

a) Fosfatos :

Generalmente aplicado como fosfato de zinc, mezclado con pequeñas cantidades de fosfato de hierro y manganeso. Se usan para aleaciones ferríticas, y aleaciones de aluminio y zinc.

b) Oxalatos :

Al igual que los fosfatos, proveen una capa absorbente que permite incrementar la adhesión de otros lubricantes.

c) Distintos tipos de óxido :

En general ya vistos. La tabla 7 da algunos coeficientes de fricción para diferentes metales y sus óxidos.

TABLA 7

COEFICIENTE DE FRICCIÓN PARA METALES LIMPIOS Y CON ÓXIDO

(Bowden y Tabor)

METAL	Dureza Kg/mm ²		Coef. de fricción	
	Metal	Óxido	Metal-metal	Óxido-óxido
Oro	20	-	2	-
Plata	26	-	1	0.8
Estaño	5	1650	1	1
Aluminio	15	1800	1.2	0.8
Zinc	35	200	0.8	1.2
Cobre	40	130	1.6	0.8
Hierro	120	150	0.6	1.0
Cromo	800	-	-	0.4

En general, los tres tipos de recubrimiento, a), b) y c), no proveen en si lubricación, sino que sirven de base y complemento para otros lubricantes.

Ya se señaló que los metales que no forman oxidos o presentan superficies inertes, son difíciles de lubricar, se necesita tener una "capa superficial razonablemente reactiva".

16.7.5.5. - Capas de plásticos

Bowden y Tabor demostraron que el comportamiento de los plásticos o polímeros, es muy semejante al de los metales, en lo que hace a fricción, la excepción es el PTFE (politetrafluoroetileno), que presenta características muy especiales. La tabla 12 da valores para algunos plásticos.

TABLA 12

VALORES DE FRICCIÓN PARA ALGUNOS PLASTICOS

(Freeman p.150)

Plásticos	Y (Kg/mm ²)	k (Kg/mm ²)	T _a (°C)	μ
PVC (cloruro de polivinilo)	15	5	65	0.4 - 0.5
Polietileno	2	1.4	80	0.25
Perpex	20	6	71	0.4 - 0.5
Nylon	10	6	121	0.25 - 0.3
Polistirene	20	4	71	0.4 - 0.5
PTFE (Teflon-Fluon)	2	2	260	0.05 - 0.1

NOTA - Acero sobre plástico

T_a - Temperatura de ablandamiento

También se usa la bakelita y la micarta, como resulta de esta tabla, el nylon y el PTFE, como los más adecuados.

El PTFE, no cumple las leyes clásicas de fricción. Incluso mantiene bajo μ para superficies desgastadas en alto vacio.

Los inconvenientes que presenta el PTFE son :

- i) No tiene resistencia mecánica.
- ii) Es pobre conductor del calor.
- iii) Tiene alto coeficiente de expansión.

Estos inconvenientes se eliminan usando sobre una superficie porosa, como cobre sinterizado. Mantiene $\mu = 0.05$, hasta 250°C .

16.7.6. - Lubricantes Gaseosos

Algunas veces, los vapores de aceites y ácidos orgánicos, se aprovechan para mejorar la lubricación en trabajado de metales. Por ejemplo, al usar el aceite de palma para laminación en alta temperatura, se obtiene ese efecto.

Se han hecho experiencias con H_2S , mejorando algo las características de "daños por fricción". Ha dado resultados óptimos, al usarlo con herramientas de molibdeno o aceros de alto contenido de molibdeno. Forma "in situ" S_2Mo , que presenta mejores características que el aplicado exteriormente.

16.7.7. - Vidrios Lubricantes

Trabajos de J. Sejournet y L. Sabataille, (1939-1940), permitieron la utilización de vidrio como lubricante, posibilitando así la extrusión en caliente de aceros inoxidables, aleaciones de alto contenido de níquel, etc. En 1950, obtuvo patente para este tipo de lubricación. Si bien se ha estudiado la posibilidad de aplicar el vidrio como lana de vidrio, placas, etc, se continua usando polvo de vidrio.

16.8. - Lubricantes en Trabajo Mecánico

Considerando la diversidad de procesos y necesidades, es lógico suponer que se aplicarán distintos tipos, desde gaseosos hasta sólidos. La mayoría de ellos han sido desarrollados en forma empírica, y recién en los últimos años, se han incrementado y sistematizado los estudios sobre fricción y lubricación en trabajo de metales.

16.8.1. - Requerimientos de un Lubricante Ideal

Deberá cumplir una serie de funciones, que se señalan sucintamente :

- a) Mantener condiciones de "lubricación límite" o "hidrodinámica" a altas presiones.
- b) Disminuir la fricción superficial, hasta valores compatibles con el "agarre"

y el "acabado superficial" deseados, pero disminuyendo el aumento de temperatura.

- c) Disipar el calor generado en el proceso de trabajado, o sea, cumplir la doble misión de "lubricante" y agente "refrigerante".
- d) Prevenir la "adhesión metálica" y el "desgarramiento" entre la matriz y el metal trabajado.
- e) Reducir la "transferencia de metal" entre la superficie del metal y la herramienta.
- f) Eliminar las partículas abrasivas (como polvo, escamas de óxidos, partículas formadas por "unión-rotura" de las juntas, etc.) de la superficie de trabajo.
- g) Mantener condiciones aceptables de "acabado superficial" y características metalúrgicas de los productos terminados.
- h) No dejar residuos al recocer el material trabajado.
- i) Facilidad de ser removido de la superficie en las operaciones de acabado.

Lo ideal sería tener "lubricación fluida" o "hidrodinámica", pero generalmente se presenta "lubricación límite o de borde", por lo cual a lo antedicho habría que agregar :

- j) Poseer propiedades físicas y químicas, que le permitan adherirse a las superficies de la matriz y del metal trabajado.
- k) Tener gran estabilidad química a alta temperatura.
- l) Poseer baja reactividad y no interactuar sobre otros lubricantes o aditivos.
- m) No presentar toxicidad (que sus vapores no sean nocivos).
- n) Poseer aceptable conductividad eléctrica, que asegure la desaparición de cargas estáticas por fricción.

16.8.2. - Tipos de Lubricantes

Los principales constituyentes de los lubricantes para trabajado mecánico son :

1) Agua :

Tiene alto calor específico y es principal constituyente cuando se necesita refrigerar y remover contaminantes, simultáneamente. A fin

de evitar efectos químicos secundarios, debe ser "pura", destilada o, por lo menos, "tratada" o "ablandada"

2) Aceites minerales puros :

Son en general muy poco usados, se les utiliza extensamente con el agregado de "aceites o ácidos grasos", por ejemplo : "aceite mineral" mas 2 ó 3% de "aceite graso", se usa para laminar secciones pequeñas. "Aceite mineral sulfurado" mas "aceites grasos" para estampado profundo o extrusión.

3) Aceites y ácidos grasos :

Los "ácidos grasos" son los más usados, formando "jabones metálicos" por acción química sobre el metal. Los "aceites grasos" son saponificados y combinados con "aceites minerales" forman "grasas" usadas en trefilación de alambres. Estas grasas se mezclan comunmente con cal para dar recubrimiento de baja fricción antes de pasar el alambre por la matriz.

4) Ceras :

Las "ceras", son razonablemente buenos lubricantes para exigencias de alta presión, fundamentalmente en combinación con ácidos grasos y jabones. Sus propiedades son buenas si no se excede el punto de fusión de las mismas. Se usan generalmente : ceras parafínicas, ceras "ablandadoras", ceras naturales, etc., en procesos de estampado profundo, extrusión y laminación.

5) Jabones :

"Jabones metálicos" secos o en polvo, son frecuentemente usados en estampado profundo y trefilación de alambres. Por ejemplo : oleato de calcio, estearato de calcio, etc.

6) Aditivos EP :

Compuestos de "azufre" y "fósforos" incorporados o con "aceites minerales" o con los "ácidos grasos", formando "aceites o emulsiones compuestas".

También se usan aditivos "clorados", pero presentan el riesgo de formar ácido hidrocórico.

7) Sólidos minerales :

Pueden ser constituyentes "activos" o "pasivos".

Como "activos" se usan en forma de suspensión coloidal o como aditivos, para mejorar las propiedades lubricantes a alta presión y/o alta temperatura, más allá del campo de utilización de los "aditivos orgáni-

cos". El grafito y el bisulfuro de molibdeno, son dos ejemplos. Los "passivos", son minerales inertes, agregados para dar "cuerpo" a otros lubricantes, mejorando la adhesión al metal y el comportamiento en condiciones severas de trabajo. Se usan cal, talco, caolín, carbonatos, mica, etc.

8) Sólidos metálicos :

Metales duros se recubren con metales blandos (plomo, cadmio, cobre, indio, etc.) para facilitar el trefilado de barras y tubos, repusaje, etc.

9) Vidrios :

Se usan como recubrimientos de baja fricción en operaciones de trefilado de tubos (que alcancen temperaturas suficientemente altas como para que el vidrio se vuelva plástico), extrusión en caliente, etc.

10) Sintéticos :

Forman una proporción creciente de lubricantes para trabajado. Incluye polietilenglicol y siliconas. Tienen ambos la ventaja de operar en un gran rango de temperaturas y quemar sin dejar residuos.

11) Plásticos :

Se usan en estampado profundo desde hace poco tiempo, principalmente nylon, teflón y polietileno. Se aplican en hojas o láminas de algunos micrones de espesor.

Las tablas 8 y 9 dan valores del coeficiente de fricción estático y dinámico, para algunos lubricantes sólidos. Corresponden a fricción acero-acero, y están determinados con el llamado ensayo "press fit".

16.8.3.- Valores de Fricción en Operaciones de Trabajado

La tabla 10, da valores del coeficiente de fricción para diferentes procesos. Son datos tomados de "Practical Metallurgy" de Sachs y Van Horn.

La tabla 11, da valores de fricción para el trabajado de acero, en función del acabado superficial normal de las matrices o herramientas, para las temperaturas de trabajado y con los lubricantes comunes usados.

5.9. - Comentarios Generales

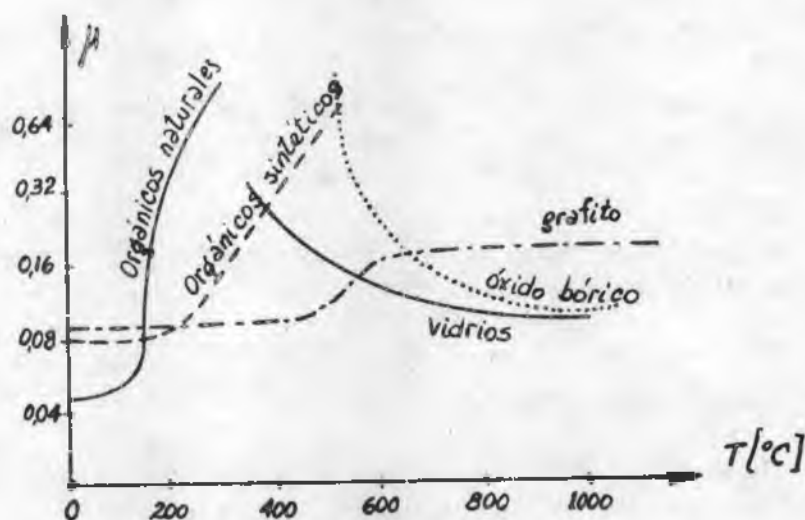
En general puede decirse que se conoce poco del fenómeno de fricción y de lubricación, incluso de las propiedades de los materiales relacionadas con ellos. Se investiga muy desordenadamente en ese sentido y, una gran parte de los

trabajos son efectuados por compañías particulares productoras de determinados tipos de lubricantes. Ello hace que los resultados sean, generalmente, comparados en forma muy parcial.

Si se resumen los factores que influyen en el trabajado de metales, se tiene :

- Acabado superficial - Ya visto en extenso.
 - Valor de la fuerza de fricción - También ampliamente expuesto.
 - Relación en "transferencia de metal" - (Wear rate) - Interesa en la lubricación de ejes, cojinetes, etc. Debe ser muy pequeña, pero en los casos en que la deformación se efectúa en un número pequeño de pasos, puede ser grande sin muchos inconvenientes.
 - Consumo y costo - Si bien en algunos casos se justifica la utilización de lubricantes caros, en general, en los problemas de producción, en que entran grandes cantidades en juego, este debe ser relativamente barato, llegando a relaciones de compromiso entre la eficiencia del lubricante y su costo.
- A veces, la alta estabilidad de un lubricante, y su bajo consumo, que permite utilizarlo bastante tiempo o en numerosas operaciones, permite el uso de lubricantes más caros.

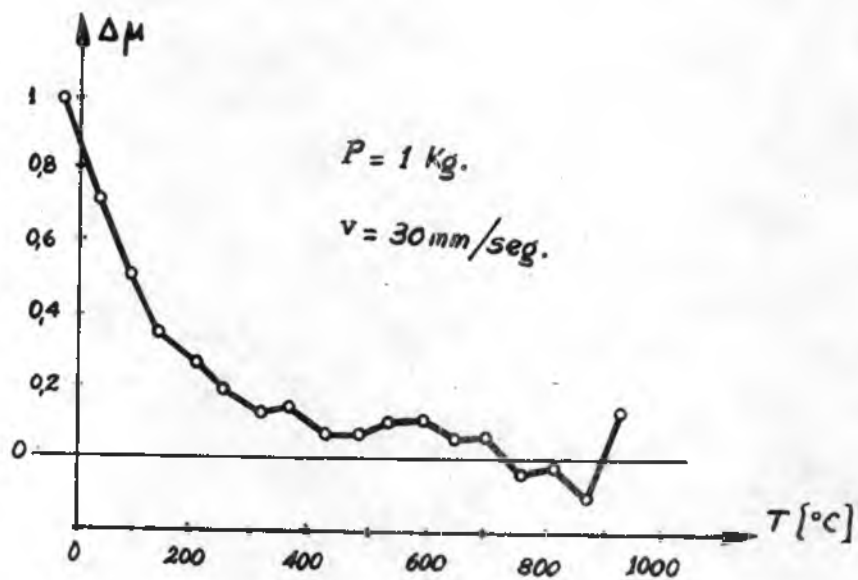
Existen otros dos factores básicos : temperatura y velocidad de deformación o de deslizamiento. Ya se vió su efecto para casos particulares produciendo adsorción y desadsorción, reacciones químicas y cambios de estado en el lubricante. Rabinowicz, presenta un interesante trabajo que resume el estudio del efecto de la temperatura para 50 combinaciones diferentes de metales y lubricantes. La figura 32, muestra estos resultados. En ella, para una carga y velocidad dada, se grafica la variación de las propiedades de lubricación ($\Delta\mu$) en función de la variación de temperatura (ΔT). Así por ejemplo, un lubricante con buenas propiedades a 300°C, quiere usarse a 400°C ($\Delta T = 100^\circ\text{C}$), encontramos el $\Delta\mu \approx 0.7$, significa que mantiene esas buenas propiedades en un 70%.



- Figura 32 -

Otro lubricante usado a 600°C , quiere usarse a 1000°C , ($\Delta T = 400^{\circ}\text{C}$). Aquí, $\Delta\mu \approx 0.10$, no mantendría nada más que en 10% sus propiedades.

En la figura 33, se presentan los valores del coeficiente de fricción en función de la temperatura, para algunos lubricantes tipos.



— Figura 33 —

La conclusión final a que arribamos es que, en el estado actual de conocimientos, no se puede predecir si un lubricante será bueno o malo, para un determinado proceso y un dado material, porque uno similar lo sea. No se pueden extrapolar las propiedades de los lubricantes, y encontramos que sirven como tales las sustancias más contradictorias : aceite, grafito, teflón, vapores de aceites, plomo, vidrio, etc. etc.

16.10 - BIBLIOGRAFIA

a) BASICA

- 16.1. Theory and Practice of Lubrication for Engineers
D.D. Fuller
(John Wiley - 1963) Cap. 10 y 11 (pág. 306-408)
- 16.2. Mechanics of plastic deformation in metal processing
Thomsen, Yang y Kobayaski
(Mc Millan - 1965) Cap. 13 (pág. 217 229)
- 16.3. Engineering Theory of Plasticity
E.P. Ünksöv
(Butterworths - 1961) (pag. 36-44)
- 16.4. Lubrication and Friction
F. Freeman
(Pitman - 1962) Cap. 13 a 16 (pag. 119 - 162)
- 16.5. Fundamentals of Deformation Processing
Editores Backofen, et al. (Syracuse Univ. Press - 1964)

"Surface conditions" - M.C. Shaw (pag. 107-130)

"Fundamentals of friction and lubrication" - E. Rabinowicz
(pag. 131-142)

b) CONSULTA

- 16.6. The Friction and Lubrication of Solids
F.P. Bowden y D. Taber
(Oxford U.P.) Vol. I (1950) - Vol. II (1964)
- 16.7 "Solid Friction" - Friction and Wear Symposium
Editor R. Davies
(Elsevier - 1959)

TABLA 16.1

Algunas definiciones relativas a "rugosidad superficial"

(Normas : IRAM 5065 y ABNT-P/NB/93)

- 1) Superficie real - Es la superficie límite que separa el objeto del espacio que lo rodea.
 - 2) Superficie ideal - Es la superficie representativa del diseño sin tener en cuenta los errores de forma ni de rugosidad superficial. (fig. 16.2.a.).
 - 3) Superficie efectiva - Es la superficie relevada mediante un instrumento de medición microgeométrico (fig. 16.3.a.).
 - 4) Perfil real - Es la línea resultante de la intersección de la superficie real con un plano convencionalmente definido respecto de la superficie ideal.
 - 5) Perfil ideal - Es la línea resultante de la intersección de la superficie ideal con un plano convencionalmente definido respecto a dicha superficie (fig. 16.3.a.).
 - 6) Perfil efectivo (P) : Es la línea resultante de la intersección de la superficie efectiva con un plano convencionalmente definido respecto a la superficie ideal (fig. 3.a. y 16.3.b.).
 - 7) Línea de referencia - Es la línea escogida convencionalmente que sirve para evaluar cuantitativamente el perfil efectivo.
 - 8) Irregularidades - Son para el alcance de esta norma los picos y valles de la superficie real.
 - 9) Rugosidad superficial - Es el conjunto de irregularidades que forman el relieve de la superficie definida convencionalmente dentro de los límites de la zona, en la que no se consideran ni errores de forma ni ondulaciones.
 - 10) Longitud de prueba - Es la longitud del perfil escogido con el propósito de hacer una medición individual de la rugosidad.
- Nota : La longitud de prueba puede incluir una o varias longitudes de base.
- 11) Longitud de base - (L) - Es la longitud de una sección de la superficie encogida para evaluar la rugosidad (fig. 3.b.)

- 12) Línea media del perfil (m) : Es la línea que teniendo una forma de perfil ideal, divide al perfil efectivo de tal manera que entre los límites de la longitud de base, la suma de los cuadrados de las ordenadas ($y_1, y_2, \dots y_n$) de ese perfil con respecto a esa línea sea mínima. (fig. 3.b.).
- 13) Altura máxima de irregularidad - (h_{max}) : Distancia entre dos líneas paralelas a la línea media y que son tangenciales al pico y al valle más pronunciados en una longitud de base (Fig. 16.3.).
- 14) Profundidad media (h_n) : ordenada del pico más pronunciado, referida a la línea media del perfil (Fig. 16.3.).
- 15) Media aritmética (h_m) : Es el valor promedio de las ordenadas, ($y_1, y_2, \dots y_n$) tomadas con respecto a la línea media del perfil sin considerar su signo (fig. 16.3.b.).

NOTA . Es el llamado CLA - "Center line Average"

$$h_m = \frac{1}{L} \int_0^L [Y] dx$$

en forma aproximada $h_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i]$

- 16) Media geométrica (h_{mc}) : Es el valor promedio geométrico de las ordenadas ($y_1, y_2, \dots y_n$) tomados con respecto a la línea media del perfil (fig. 16.3.b.).

Nota : Normalmente se le llama "valor medio cuadrático" (RMS-Root Mean Square Average).

$$h_{mc} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx}$$

o en forma aproximada $h_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}}$

- 17) Altura promedio de las irregularidades por el método de los diez puntos (h_{pi}): Es la distancia promedio entre las cinco ordenadas máximas ($y_1, y_2, \dots y_9$) y las cinco ordenadas mínimas ($y_2, y_4, \dots y_{10}$) medidas desde una línea paralela a la línea media del perfil y tomadas dentro de los límites de la longitud base (Fig. 16.3.c.).

$$h_{pi} = \frac{(y_1 + y_3 + \dots + y_9) - (y_2 + y_4 + \dots + y_{10})}{5}$$

- 18) Coeficiente de "vaciado" (k_v) : Relación entre la profundidad media y la altura máxima de irregularidad.

$$k_v = h_n / h_{\max}$$

- 19) Coeficiente de "llenado" (k_d) : Diferencia entre la unidad y el coeficiente de "vaciado".

$$k_d = 1 - k_v$$

- 20) Longitud de contacto real, a una profundidad c (L_c) : Suma de los segmentos de una línea paralela a la dirección general del perfil y situada a una distancia c por abajo del pico máximo, interceptada por el perfil efectivo en la longitud de base (fig. 16.3.d.).

$$L_c = A + B + C + E + F$$

- 21) Porcentaje de contacto (k_c) : Relación entre la longitud de contacto real y la longitud de base.

$$k_c = L_c / L$$

MAQUINADO	RUGOSIDAD R_m (μm)												
	0,025	0,050	0,100	0,20	0,40	0,80	1,6	3,2	6,3	12,5	16	20	25
Rebabado, cizallado, corte a la llama													
Torneado, fresado, limado													
Taladrado													
Cepillado													
Alesado													
Brochado													
Rectificado													
Bruñido													
Superacabado (lapidado)													
Pulido especular													
Mandrilado													
Laminado en caliente													
Colado en arena													
Forjado													
Colado en coquilla													
Colado a presión													
Laminado, cilindrado, y tref. en frío													
Extruido													

Rugosidad no frecuente

Rugosidad común

TABLA 16.6

COEFICIENTES DE FRICCION A TEMPERATURA AMBIENTE

Superficie	limpia	aceite parafí- nico	aceite paraf.+ 1% ácido laurico	Reactividad
niquel	0.7	0.3	0.28	inerte
cromo	0.4	0.3	0.3	
platino	1.2	0.28	0.25	
oro	1.4	0.8	0.7	
hierro	1.0	0.3	0.2	mediana
aluminio	1.4	0.7	0.3	
cobre	1.4	0.3	0.08	reactivo
cadmio	0.5	0.45	0.05	
zinc	0.6	0.2	0.04	
magnesio	0.6	0.5	0.08	

TABLA 16.8

COEFICIENTE DE FRICCION DE ALGUNOS LUBRICANTES SOLIDOS I

Lubricantes sólidos	μ din.	μ est.
<u>Sólidos cristalinos</u>		
Bisulfuro de molibdeno natural	0.050	0.053
" " " sintético	0.091	0.106
" " tungsteno	0.090	0.098
" " titanio	0,25	-----
" " telurio	0,25	-----
" " selenio	0,25	-----
grafito natural ¹	0,25	-----
" coloidal en agua (22%)	0.100	-----
nitruro de boro	0,25	-----
hidróxido de bario	0.151	0.163
cloruro de plomo	0.191	0.214
mica	0,25	-----
ioduro de plata	0.231	0.245
talco	0.25	-----
<u>Otros compuestos inorgánicos</u>		
borax	0.210	0.226
caolín	0.25	-----
rottenstone	0.189	0.195
óxido de plomo-óxido de zinc	0,25	-----
vermiculita	0.160	0.167
<u>Recubrimientos químicos</u>		
Fosfato hierro-manganeso	0,213	0.218
S. Mo sobre fosfato de hierro-manganeso	0.067	0.074
Sulfuro fundido (570°C) "Sulfinuz"	0.242	-----

Nota - Acero sobre acero - Ensayo "press-fit"

TABLA 16.9.

COEFICIENTES DE FRICCION DE ALGUNOS LUBRICANTES SOLIDOS II

<u>Lubricante sólido</u>	T_f (°C)	μ din.	μ est.
<u>Ceras</u>			
de abejas	60-63	0.050	0.055
de Spermaceti	43-49	0.048	0.062
de Bayberry	44-49	0.054	0.070
sintética	93-96	0.061	0.62
de Candelilla	67-70	0.099	0.113
de Montan	78-90	0.108	0.120
de Carnauba	83-86	0.143	0.169
<u>Otros tipos</u>			
Poli-etilen-glicol (alto M.W.)	53-56	0.077	0.078
Sebo (glicérico hidrogenado)	59-63	0.082	-----
Parafinas	49-77	0.104	0.112
<u>Jabones (estearatos)</u>			
de dietilenglicol	54-59	0.083	0.089
de calcio	157-163	0.107	0.113
de aluminio	129-160	0.114	0.119
de sodio	198-210	0.164	0.192
de litio-12-hidróxido	210-215	0.211	0.218

Nota : Acero sobre acero - Ensayo "press-fit"

TABLA 16.10

<u>Valores de μ para diferentes procesos</u>	μ
<u>A - Laminado en frio</u>	
acero al C - rodillo de acero pulido - lubricado	0.04-0.05
" " " C " " " " - inmersión	
buena lubricación	0.05-0.10
" " " rodillo rugoso (sand blast)	0.30
A, Cu y Pb - rodillo acero pulido	0.10
" " " rodillo rugoso	0.40
<u>A' - Laminado en caliente</u>	
acero al C - rodillo de acero - 400-900°C	0.40
" " " " " " - 1000°C	0.30
" " " " " " - 1100°C	0.20
" " " rodillo de fundición (aprox. 50% mayor)	
aluminio - rodillo de acero - 375°C	0.54
cobre - rodillo de acero - 750°C	0.35
niquel y plomo - rodillo de acero - 900 y 1800°C	0.32
bismuto y cadmio " " " - 150 y 1800°C	0.25
estaño y zinc " " " - 100 y 1100°C	0.17
<u>B - Trefilado</u>	
acero al C - matriz CW - diferentes lubricantes	0.03-0.06
cobre - " " - lubric. forzada de aceite	0.06
latón - " acero - " " " "	0.10
cobre e inox. - CW - cera	0.07
" " " - aceites lubricantes minerales	0.30
<u>C - Estampado profundo</u>	
aluminio - lubricado con sebo	0.10
cobre - " " aceite a presión	0.15
latones - " " " " "	0.08-0.12
bronces - " " " " "	0.14

TABLA 16.11

COEFICIENTE DE FRICCION PARA ALGUNOS PROCESOS
EN ACEROS

Proceso	Acabado sup. herram.	Temp. def.	Lubricante	
Compresión	3.2 - 12.6 micr.	900-1200°C	sin lubricar	0.3-0.5
	3.2 - 12.6 micr.	900-1200°C	aceites	0.25-0.4
Compresión	0.4 - 1.6 micr.	20°C	sin lubricar	0.25-0.35
	0.4 - 1.6 micr.	20°C	aceite maq.	0.15-0.25
	0.1 - 0.4 micr.	20°C	aceite maq.	0.15-0.25
Extrusión	0.2 - 0.8 micr.	900-1200°C	(Pasta de vidrio)	0.10-0.20
	0.05-0.2 micr.	20°C	(aceite + grafito)	0.05-0.15
Punzonado	0.2 - 0.8 micr.	20°C	(jabones, emulsión)	0.05-0.15

NOTA : Para alta velocidad, μ disminuye en 20 a 25%.

TEXTURA

1'. INTRODUCCION

Cada grano de un agregado policristalino normalmente tiene una orientación cristalográfica diferente de la de sus vecinos. Considerado como un todo, las orientaciones de todos los granos pueden estar distribuidas al azar en relación con un sistema de referencia elegido, o pueden tender a agruparse, en mayor o en menor grado, alrededor de alguna o algunas orientaciones particulares. Cualquier agregado caracterizado por la última condición se dice que tiene orientación preferida o textura, que puede definirse simplemente como una condición en la cual la distribución de las orientaciones cristalinas no es al azar.

Hay muchos ejemplos de orientación preferida. Los cristales individuales en un alambre trefilado en frío, por ejemplo, están orientados de manera tal que la misma dirección cristalográfica $[u\ v\ w]$ es en la mayoría de los granos paralela o casi al eje del alambre. En chapa laminada en frío, la mayor parte de los granos están orientados con un cierto plano (hkl) aproximadamente paralelo a la superficie de la chapa, y una cierta dirección $[uvw]$ en ese plano aproximadamente paralela a la dirección de laminación de la chapa. Estas se llaman texturas de deformación. Básicamente, son debidas a la tendencia, analizada al estudiar el ensayo de un monocristal, que presenta el mismo de rotar durante la deformación plástica. En un policristal el fenómeno es más complejo, aunque la causa es esencialmente la misma.

Cuando un metal o una aleación trabajado en frío, con textura de deformación, es recristalizado por recocido, la nueva estructura granular usualmente tiene una orientación preferida también, a menudo diferente de la del metal trabajado en frío. Esta se denomina textura de recocido o de recristalización, y se distinguen en general dos clases, primaria y secundaria, según el proceso de recristalización involucrado. Tales orientaciones preferidas son debidas a la influencia que tiene la textura de la matriz sobre la nucleación y/o crecimiento de los nuevos granos en aquella matriz.

Puede haber orientación preferida también en fundiciones, recubrimientos con baños calientes, películas evaporadas, capas electrodepositadas, etc. Tampoco está la textura confinada a productos metálicos: las rocas, fibras y chapas naturales y artificiales y agregados similares orgánicos e inorgánicos usualmente exhiben orientación preferencial. En efecto, la orientación preferida es generalmente la regla, no la excepción, y la preparación de un agregado con una orientación cristalina al azar es dificultosa. Hasta un cierto punto, sin embargo, la orientación preferida en productos metalúrgicos puede controlarse operando en condiciones adecuadas. Por ejemplo, es posible algún control de la textura de chapa laminada mediante la elección correcta del grado de deformación, temperatura de recocido y tiempo de recocido.

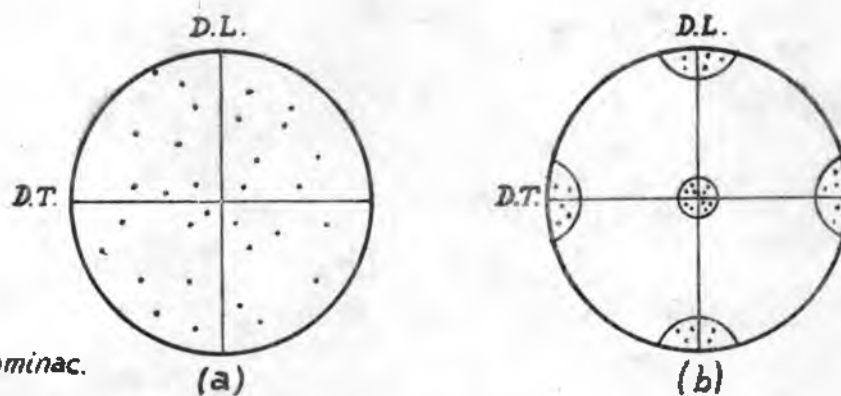
La importancia industrial de la orientación preferida estriba en el efecto, a menudo muy marcado, que tiene sobre las propiedades macroscópicas del metal. Dado el hecho de que la mayor parte de los monocristales son anisotrópicos, se sigue que un agregado con orientación preferida también lo será. Esto es en general pernicioso, por ejemplo, en el embutido profundo de chapa, el metal debería fluir igualmente en todas las direcciones, pero esto no se producirá si el metal tiene un alto grado de orientación preferida, dado que el punto de fluencia y toda la curva de deformación del metal diferirá en las distintas direcciones. En casos excepcionales, el uso a dar al material requiere propiedades direccionales.

y entonces se desea una orientación preferida. Por ejemplo, la chapa de Fe-Si usada para núcleos de transformadores debe sufrir ciclos repetidos de magnetización y desmagnetización, lo que requiere una elevada permeabilidad en la dirección del campo aplicado. Dado que los monocristales de Fe son más fácilmente magnetizables en la dirección $[100]$ que en cualquier otra, los tratamientos de laminación y de recocido dados a la chapa se eligen de manera de producir un algo grado de orientación preferida, en la que tanto granos como sea posible tengan sus direcciones $[100]$ paralelas a una dirección de la chapa, en este caso la de laminación.

Debe notarse que la orientación preferida es solamente una condición cristalográfica y que no tiene nada que ver con la forma del grano que se observa en el microscopio. Por lo tanto, la presencia o ausencia de orientación preferida no puede ser descubierta por examen microscópico, salvo técnicas especiales como por ejemplo las microfигuras de corrosión. Es cierto que la forma del grano está afectada por las mismas fuerzas que producen orientación preferida. Así por ejemplo los granos se aplanan por laminado, y éste usualmente está acompañado por orientación preferida, pero una forma aplanada no es en sí misma evidencia directa de orientación preferida. Un análisis de difracción con rayos X puede dar tal evidencia. Esto se hace más visible en los metales recristalizados, que pueden tener una microestructura equiaxial y, al mismo tiempo, un alto grado de orientación preferida.

Ya se sabe que una fotografía de difracción de rayos X a través de una ventanilla sobre una probeta policristalina con radiación característica da lugar a los anillos de Debye. Estos anillos en general no son de intensidad constante alrededor de su circunferencia a menos que los cristales individuales en la probeta tengan orientación al azar. Si la probeta presenta orientación preferida, los anillos de Debye son de intensidad no uniforme alrededor de su circunferencia (si la orientación preferida es ligera) o realmente discontinuas (si existe un alto grado de orientación preferida). En el último caso, ciertas porciones del anillo de Debye faltan porque las orientaciones que reflejarían a aquellas partes del anillo simplemente no están presentes en la probeta. Anillos de Debye no uniformes pueden tomarse por lo tanto como evidencia conclusiva para orientación preferida, y analizando la no uniformidad se puede determinar la forma y grado de orientación preferida presente.

La orientación preferida se describe mejor por medio de una figura de polos. Esta es una proyección estereográfica que muestra la variación en la densidad de polos con la orientación polar para un conjunto seleccionado de planos cristalinos. Este método de describir texturas fué usado primero por el metalurgista alemán Wever en 1924, y su significado puede ilustrarse mejor mediante el siguiente ejemplo simple. Supóngase tener una chapa de grano muy basto de un metal cúbico que contiene sólo 10 granos, y que se determina la orientación de cada uno de estos diez granos por uno de los métodos de Laue. Se representan las orientaciones de todos estos granos juntos graficando las posiciones de sus polos $\{100\}$ sobre una proyección estereográfica simple, con el plano de proyección paralelo a la superficie de la chapa. Dado que cada grano tiene tres polos $\{100\}$, habrá en total $3 \times 10 = 30$ polos graficados en la proyección. Si los granos tienen una orientación completamente al azar, estos polos estarán distribuidos casi uniformemente (tenderán a agruparse más hacia el centro debido a problemas de ángulo sólido en la proyección estereográfica), sobre la proyección, como se indica en la figura 1.a. Pero si existe orientación preferida, los polos tenderán a agruparse en ciertas áreas de la proyección, dejando otras virtualmente desocupadas. Por ejemplo, este agrupamiento podría tomar la forma particular de la figura 1.b. Esto se conoce como "textura cúbica" porque cada grano está orientado con sus planos (100) casi paralelos a la superficie de la chapa y la dirección $[001]$ en estos planos casi paralela a la dirección de laminación. (Esta textura simple, que puede ser descrita por la



D.L. = Dirección de laminación.

D.T. = Dirección transversal

Fig. 1

notación abreviada $(100)[001]$, forma realmente una textura de recristalización en muchos metales c.c.c. en condiciones adecuadas). Si se hubiese construido una figura de polos (111) graficando únicamente los polos $\{111\}$, la figura de polos resultante se vería completamente diferente de la 1.b. para la misma orientación preferida. En efecto, consistiría en cuatro áreas de "gran intensidad", una cerca del centro de cada cuadrante. Esto ilustra el hecho de que la apariencia de una figura de polos depende de los índices de los polos graficados, y que la elección de los índices depende de cuál aspecto de la textura se quiera mostrar más claramente.

Naturalmente, cuando el tamaño de grano es pequeño, como ocurre normalmente, la determinación separada de las orientaciones de un número representativo de granos está fuera de cuestión, de manera que se usan métodos de rayos X en que los efectos de difracción de miles de granos son promediados automáticamente. La figura de polos (hkl) de un material de grano fino se construye analizando la distribución de intensidad alrededor de la circunferencia del correspondiente anillo de Debye hkl . Hay dos métodos para hacerlo, el fotográfico y el difractómetro. El método fotográfico es cualitativo y, aunque de suficiente precisión para muchos propósitos, está siendo rápidamente obsoleto por la mayor precisión del método difractométrico.

Aunque sólo una figura de polos puede proveer una descripción completa de la orientación preferida, puede obtenerse alguna información simplemente por comparación de las intensidades de las líneas de difracción calculadas con las observadas con una cámara Debye-Scherrer o un difractómetro. Cualquier desviación radical entre las intensidades observadas y calculadas es evidencia inmediata de orientación preferida en la probeta y, de la naturaleza del desacuerdo, pueden usualmente extraerse algunas conclusiones limitadas respecto de la textura. Por ejemplo, si se examina una chapa en el difractómetro con el método usual (la probeta formando ángulos iguales con el rayo incidente y con el reflejado), entonces los únicos granos que pueden contribuir a la reflexión hkl son aquellos cuyos planos (hkl) son paralelos a la superficie de la chapa. Si la textura es tal que hay muy pocos granos tales, la intensidad de la reflexión hkl será anormalmente baja. O bien una reflexión dada puede ser de intensidad anormalmente alta, lo cual indicaría que los planos correspondientes estaban preferentemente orientados paralelos o casi a la superficie de la probeta. Como una ilustración, la reflexión difractométrica (200) de una probeta con textura cúbica es anormalmente alta, y de este hecho sólo es posible concluir que hay una orientación preferida de los planos (100) paralelos a la superficie de la chapa. Sin embargo, no es posible

ninguna conclusión sobre si hay una dirección preferida en el plano (100) paralela a alguna dirección de referencia sobre la superficie de la chapa. Tal información puede obtenerse sólo de la figura de polos.

2. MECANISMOS DE TEXTURA - TEORIAS

No se pueden justificar las texturas de los metales policristalinos suponiendo que cada grano gire en la misma forma en que lo haría un monocristal durante la deformación. En los policristales no actúan sólo uno o dos sistemas de deslizamiento, sino varios en cada grano. Ello se debe a que los granos han de deformarse manteniéndose unidos y sin dejar huecos entre ellos. Las teorías más satisfactorias referentes a los mecanismos de textura difieren principalmente en el número de sistemas de deslizamiento y eventualmente maclado que hacen intervenir en el proceso de la deformación plástica de un policristal.

Boas y Schmid proponen la actuación de tres de los sistemas de deslizamiento más cargados y que la textura de deformación en tracción y en compresión se compone de orientaciones estables bajo la acción del tipo de deslizamiento resultante, es decir, que la rotación producida en el deslizamiento sobre cada uno de estos sistemas compensa a la producida por los otros cuando se alcanza la posición estable. La teoría concuerda con las texturas principales observadas, pero no con algunas de las componentes de menor importancia.

Pickus y Mathewson sugieren que actúan tres o más sistemas de deslizamiento, los cuales conducen a una posición final en la que las direcciones activas de deslizamiento se disponen simétricamente alrededor de la dirección del flujo, por lo que las diversas rotaciones reticulares se compensan y las tensiones tangenciales son iguales en cada plano.

Hibbard y Yen generalizaron ciertos análisis anteriores de texturas basados en la relación entre la dirección del flujo y la orientación de sistemas de deslizamiento simétricamente dispuestos tales que se requiera una tensión mínima y se anulen todas las rotaciones. Esta disposición permitiría que el flujo continuase sin cambios en la orientación. Ellos calcularon la estabilidad relativa de varias orientaciones finales ideales para cristales c.c.c. y c.c.c.c. y varios tipos de deformación: tracción, compresión y laminación. Las estabildades relativas calculadas de texturas ideales corresponden bien con las texturas de deformación reseñadas. Su análisis no intenta explicar cómo se alcanza la posición de la textura ideal, ni la variación de la misma con la composición.

El maclado mecánico durante la deformación en frío de los metales hexagonales compactos es muy frecuente y significativo en la determinación de la orientación preferida final. En el caso del laminado, por ejemplo, si sólo se produjo deslizamiento durante el mismo, la rotación de los subgranos trataría de ubicar el plano basal paralelo al de laminación. En esta posición, un deslizamiento posterior no puede funcionar fácilmente para acomodar el alargamiento. El maclado mecánico, sin embargo, reorienta el plano basal para que pueda proseguir el deslizamiento.

Taylor ha desarrollado una teoría de texturas de deformación sobre bases más rigurosas que las anteriores. Supone que el cambio de forma de los granos es exactamente igual al de los agregados. De esta manera, y para que se mantenga la continuidad, deben actuar durante la deformación por lo menos cinco sistemas de deslizamiento. La elección de los sistemas que deben operar se hace mediante el principio del trabajo mínimo. Con este análisis se han podido predecir las orientaciones de aproximadamente la mitad de los granos del conjunto. La discrepancia fundamental con la realidad parece ser la suposición de que los granos deforman todos en forma homogénea, según el modelo del agregado. Una prueba de que ello no es así se tiene en el fenómeno de 'piel de naranja' que aparece al em-

butir chapas con tamaño de grano grande.

3. TEXTURAS PARA DIFERENTES PROCESOS

3.1. TEXTURAS DE ALAMBRES, BARRAS Y TUBOS

Una forma cilíndrica que retiene una sección circular durante el alargamiento exhibe sólo una textura unidireccional. Los cristales muestran una orientación preferida en el sentido en que una dirección cristalina específica se alinea con el eje cilíndrico, pero no existen preferencias en el plano transversal. Se ha encontrado que la textura final estable es independiente de los medios mecánicos de deformación. En este sentido, es lo mismo obtener una barra por laminado, trefilado o forjado rotatorio. En el caso del alambre trefilado, el ángulo de la trefila y la reducción por pasada, no influyen, como asimismo tampoco el uso o no de un mandril en el trefilado de tubos. Por supuesto, estas variables son muy importantes para la determinación de las fuerzas que entran en juego, de las tensiones residuales, y aún de la uniformidad en la textura desde la periferia al centro.

Las texturas de alambres no se reseñan usualmente por el uso de figuras de polos porque exhibirían simetría polar, o sea, darían una serie de bandas circulares concéntricas. En la tabla I se pueden ver algunos datos de texturas de alambres.

TABLA I

Texturas de deformación de alambres o de tracción

Metal	Red	Textura observada	Textura ideal (x)
Cu, Cu + < 2% Al Cu + < 5% Zn, Ag, Au Cu-Ni, Ni, Pb, bronce, Al	c.c.c.	$\{111\} + \{100\}$	1. $\{111\}$ 2. $\{100\}$
Pb, Al (reducciones severas) Cu + > 2% Al Cu + > 5% Zn	c.c.c.	$\{111\}$	1. $\{111\}$ 2. $\{100\}$
Mo, W, Fe α , ferrita aleada	c.c.	$\{110\}$	1. $\{110\}$
Mg, aleaciones de Mg, Zr	H.C.	$\{210\}$	
Zn	H.C.	$\{001\}$ a 70° del eje del alambre	

(x) Los números indican orden relativo de estabilidad.

La posición de los polos octaédricos en la textura de alambre $\{111\}$ se muestra en la figura 2. Mientras que un plano octaédrico es normal al eje del alambre y no puede trabajar durante el alargamiento del mismo, los otros tres están todos girados 20° respecto de dicho eje. En cualquier cristal están, por supuesto, fijos, pero todas las posiciones obtenibles por rotación alrededor del eje son igualmente estables. En esta orientación, las direcciones de deslizamiento $\langle 110 \rangle$ en cada plano están dispuestas como se muestra, de manera que dos direcciones deben cooperar para permitir el alargamiento, con un movimiento neto en la dirección $\langle 112 \rangle$ que biseca a las dos direcciones $\langle 110 \rangle$.

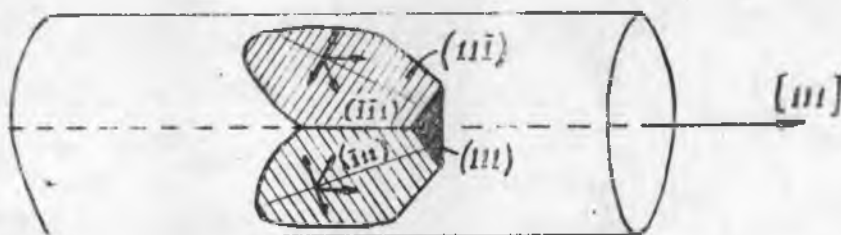


Fig. 2

En general, existe una variación en la textura desde la periferia al centro. En las capas más extensas, el eje de fibra está inclinado con respecto al eje del alambre. Esta inclinación puede ser de 8 a 10° en cristales cúbicos. Esta disposición cónica ha hecho que algunos la denominen textura cónica de fibra. Se origina en el flujo cónico (no homogéneo) del material durante la deformación y depende un poco del proceso de conformado llevado a cabo.

3.2. TEXTURAS DE LAMINACION.

El flujo que se produce durante la laminación plana es tal que la chapa se alarga a expensas de su espesor, manteniendo prácticamente inalterado su ancho. Este efecto no puede compararse con un estado simple de tracción superpuesto con uno de compresión, por ejemplo. Es por ello que resulta difícil el estudio de la deformación de los cristales a los efectos de determinar posibles texturas ideales. Se han aplicado todas las teorías ya vistas, lográndose en muchos casos resultados satisfactorios, aunque en otros, no. La textura de una chapa laminada se representa mejor mediante una figura de polos del tipo de la figura 3, por ejemplo

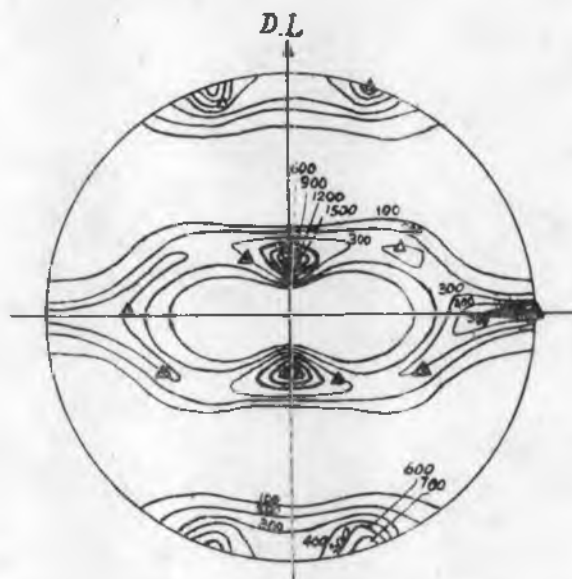


Fig. 3

Se trata de una figura de polos (111) de la textura interior de una chapa de Al 2s, reducida un 95% por laminación en frío, invirtiendo el sentido en cada paso. El espesor de la chapa laminada era de 0,6 mm, y el de la muestra, tomada del centro, 0,1 mm. Las posiciones de los polos (111) para orientaciones ideales próximas a (123) $[1\bar{2}1]$ se indican con Δ . Las orientaciones (110) $[1\bar{1}2]$ y (112) $[11\bar{1}]$, propuestas previamente, se indican con $\blacktriangle$ y $\blacktriangle$, respectivamente. Las intensidades para esta representación se determinaron mediante un contador Geiger; se indican en unidades arbitrarias.

Conviene destacar que es muy frecuente que la textura de la capa superficial sea distante de la del centro. Por ello se indica la zona en la figura de polos.

Las variables que pueden influir en la textura de laminación son las siguientes:

- * Tipo de red: Cada retículo cristalino tiene un tipo básico característico de textura de deformación. Indudablemente, esto está asociado con los sistemas de deslizamiento característicos de cada red.

Composición: Los elementos de aleación pueden formar solución sólida o bien una segunda fase. El efecto de esta última se entiende mejor. La presencia de cantidades apreciables de CFe_3 en el acero se sabe que reduce o elimina el desarrollo de la orientación preferida que se observa en el acero bajo en C laminado en frío. Análogamente, de 5 a 10% de Si en Al como cristales finos entécticos, inhibe el desarrollo de la textura de deformación característica del Al laminado en frío. En ambos casos, se presume que las partículas de segunda fase, duras y discontinuas, interfieren con la rotación normal de los cristales de la matriz. Otra forma quizás mejor de describir el efecto, es establecer que cada zona de borde entre matriz y partícula de segunda fase, requiere sistemas adicionales de deslizamiento análogo a los requeridos por los bordes de grano de una fase.

Si la segunda fase está en forma de placas (p.ej. el CFe_3 en la perlita), la deformación provocará una reorientación tal que las placas se alinean en direcciones comunes. Esta "preferencia" no es del tipo discutido en textura, aunque su importancia es obvia.

Temperatura de deformación: El número de sistemas activos de deslizamiento y la relación existente entre la tensión necesaria para el deslizamiento y la que provoca maclado, son función de la temperatura. Es de esperar por lo tanto que cambie la textura con la temperatura a la que se produce la deformación. En algunos casos, como es el acero, la cuestión se complica porque está involucrado además un cambio de estructuras.

Textura previa. Es difícil obtener un material de partida con orientaciones completamente al azar, para efectuar estudios de textura. Tanto el trabajado previo y recocido, como la colada, pueden introducir una textura previa. Es por ello que suelen ser distintas las texturas con deformaciones del orden del 90%, a las obtenidas con deformaciones menores, del orden de 30 a 40 %.

3.3. LAMINACIÓN CRUZADA.

Se obtiene la misma textura que en compresión si se lamina a un material cambiando en cada pasada la dirección del flujo de una manera sistemática. Barrett llamó a esta operación laminación de compresión. Es interesante observar que la cantidad de endurecimiento para una reducción dada, es menor en el laminado cruzado que en el común.

4. TEXTURA POR RECOCIDO.

Después de recocidos, los metales con fuerte textura por deformación en frío presentan muchas veces orientaciones preferidas semejantes o no a las que poseían antes de la recrystalización. Este fenómeno ha sido estudiado por su doble carácter tecnológico y científico. Sin embargo, la complejidad del problema hace que aún existan dudas sobre los mecanismos íntimos que operan en este proceso.

Bengers y Louwerse sugieren que las texturas de recristalización están determinadas por núcleos existentes en el material deformado que tienen la orientación del recristalizado. Las teorías de la nucleación orientada tropiezan con la objeción de que probablemente se encuentren núcleos suficientes en cualquier orientación en exceso de los necesarios para determinar una textura.

Barrett ha propuesto que una teoría de las texturas debe basarse más bien en el principio de que ciertas orientaciones pueden provocar un crecimiento más rápido que otras a través del metal deformado, siendo más lentos los desplazamientos atómicos cuando el nuevo grano tiene una orientación próxima a la de la matriz y más rápidos cuando difiere de la matriz en una cierta proporción. Se puede concluir que un principio importante para la determinación de las texturas de recristalización es que la velocidad de crecimiento depende de la orientación, y que las texturas de flejes laminados de Al, de monocristales deformados y recristalizados de cobre y de aluminio y de algunos otros metales pueden explicarse fácilmente mediante este principio. Sin embargo, existen otros factores que deben tenerse en cuenta para explicar por qué las texturas de deformación y recristalización se relacionan por rotaciones alrededor de (111), y solamente una o dos y no todas las ocho posibles. Debe estudiarse también la influencia de la poligonización en todo el proceso. Además, algunas veces se produce la recristalización con cambios tales de orientación en cada grano nuevo, que se retiene la textura de deformación como una componente de la total de recristalización.

Las texturas que se originan por el crecimiento de los granos de los metales que han recristalizado deben producirse por el crecimiento preferido de granos que tienen determinadas orientaciones con relación a sus vecinos.

En resumen, algunas texturas de recristalización se parecen a las de deformación a partir de las cuales se originan, otras son completamente diferentes y en algunos casos se obtiene una orientación al azar. El control de las orientaciones preferidas se logra ajustando bien las condiciones del trabajado en caliente, trabajado en frío y recocido, así como la pureza del metal, composición de las aleaciones y grado de laminación cruzada, por ejemplo.

En general es necesaria una textura de deformación bien desarrollada para obtener una de recristalización muy marcada.

5. INFLUENCIA DE LA TEXTURA EN EL ESTAMPADO PROFUNDO: EL OREJADO.

La direccionalidad en los aceros de calidad de embutido ha sido un tema del mayor interés para fabricantes y usuarios de chapa. Por lo general se la reconoce sólo en el sentido bidimensional, indicada por las diferencias en propiedades medidas en el plano de la chapa. Esta direccionalidad "planar" se determina fácilmente mediante ensayos mecánicos comunes con probetas cortadas de la chapa a ángulos variables de la dirección de laminación. En el embutido, da origen al "orejado", o sea a la formación de orejas en los bordes del recipiente embutido, como se ve en la figura 4.



Fig 4

Usualmente se forman dos, cuatro o seis orejas según el tipo de orientación preferida de la chapa. Trabajando en aleaciones de Al-Pb se encontró que las orejas se formaban en las direcciones del material en que era menor su resistencia a la rotura, o bien en las que presentaban mayor alargamiento. En este sentido la direccionalidad es una propiedad objetable.

Sin embargo, la ausencia de orejado durante el embutido no excluye otras componentes de direccionalidad en la chapa. La direccionalidad es un efecto tridimensional y su diferencia en el plano de la chapa no asegura que las propiedades medidas en una dirección perpendicular a la chapa son iguales que las medidas en el plano de la misma. La direccionalidad "perpendicular" de un material es a menudo más pronunciada que la planar, pero no se pone de manifiesto en el trabajo de prensado. Sin embargo, es muy importante en la performance del material durante el estampado.

Las probetas de tracción de chapas en el rango de la deformación plástica, exhiben a menudo deformaciones distintas en su ancho y en su espesor. Este comportamiento es una manifestación de direccionalidad perpendicular y puede demostrarse que es una consecuencia de una diferencia en la resistencia del material en dirección perpendicular y paralela al plano de la chapa. La relación de deformaciones en ancho y en espesor medidas en un ensayo de tracción es un valor aproximadamente constante durante toda la deformación plástica. Se suele denominar R y es sugerido como una medida de la direccionalidad. Un valor de $R = 1$ en todas las direcciones es un índice de material completamente isótropo. En el caso del embutido, se demuestra que se comportan mejor aquellos materiales que tienen $R > 1$. De esta manera, la pared del recipiente que se va formando resiste mejor los esfuerzos a que está sometida para que el material que forma la pestaña fluya al interior de la matriz.

O sea, este tipo de direccionalidad es altamente favorable para obtener una chapa de buena calidad de embutido.

6. DETERMINACION DE TEXTURAS.

Indudablemente el mejor método para determinar una textura es mediante figuras de polos, como ya se vió al principio. Ello involucra técnicas y equipos muy especiales y refinados de manera que a veces se recurre a otros procedimientos más sencillos.

En general, se mide la anisotropía que presenta el material en algunas de sus propiedades. El fundamento de estos ensayos estriba en que, si bien cada cristal es de por sí anisótropo, el agregado cristalino, formado por gran cantidad de pequeños granos, debe poseer una isotropía estadística, a menos que tenga textura cristalográfica que esté formado por pocos granos grandes o bien, en algunos casos, que tenga un fibrado mecánico o sea, una distribución especial de inclusiones, impurezas o segundas fases. De todos modos, siempre que existiesen dudas acerca del origen de la anisotropía, cualquier causa salvo la textura es determinable mediante técnicas metalográficas comunes.

Además de los ensayos de tracción, de compresión o de flexión, existen otros que se han empleado para poner de manifiesto la anisotropía.

El ensayo de desgarramiento propuesto por Brown y Jerns es uno de los más simples. Se inicia el corte de una tira de aproximadamente 1 cm. de ancho

en diferentes direcciones de la chapa, y luego, mediante una llave y de forma análoga a como se hace una lata de sardinas, se arrancan las tiras de la chapa (ver figura 5). Por razones no muy bien explicadas, las longitudes relativas de las tiras arrancadas en distintas direcciones parecen ser un índice de la anisotropía.

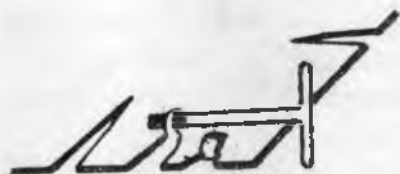


Fig. 5

Los ensayos de embutidos indican, como se acaba de ver, si existe anisotropía o no en el material (por lo menos en sentido planar), por la formación de las orejas. La altura de éstas es una medida de la intensidad de la anisotropía.

Las vibraciones de las placas forman figuras de la mayor variedad, que se pueden ver si se espolvorean las placas con arena. Si la placa se fija por su centro y se la golpea en un borde, la arena se aglomera sobre las líneas nodales, formando las llamadas figuras de Cladrin.

Las medidas del par magnético pueden emplearse para hacer manifiesta la anisotropía en materiales ferromagnéticos. En el magnetómetro de torsión, se suspende de un alambre una muestra circular que queda sometida a un campo magnético. Se sujetan agujas indicadoras al alambre para medir la posición angular de la muestra y el par ejercido por ella al torcer el alambre. El par se origina cuando la dirección del campo magnético no coincide con la dirección de fácil imanación del material.

7. ELIMINACION DE TEXTURAS

A los efectos de eliminar la textura se deben manejar cuidadosamente las siguientes variables del proceso de fabricación: cantidad de deformación en caliente y temperatura a la que se efectúa; secuencia de deformaciones en frío y recocidos adecuada.

En general, una cantidad de deformación en frío relativamente pequeña seguida por una temperatura de recocido relativamente elevada, conducen a orientaciones al azar. La cantidad de deformación en frío que puede tolerarse depende del tamaño de grano previo, habiendo aparentemente una cantidad mínima en que deben ser reducidos los granos para producir una distribución al azar.

Existen algunos casos particulares, estudiados más en detalle, que se reseñan a continuación:

Palmer y Smith llegaron a las siguientes conclusiones, tras muchas experiencias en latón:

- 1 - Si el latón está completamente recristalizado, la anisotropía es tanto mayor cuanto más alta es la temperatura de recocido.
- 2 - Cuanto más baja es la temperatura de recocido que precedió a la última laminación, tanto mayor es la direccionalidad final.
- 3 - Cuanto más baja fue la temperatura de los primeros recocidos intermedios, tanto más alto es el carácter direccional final, a menos que las reducciones de espesor dadas entre los recocidos fuesen muy elevadas.
- 4 - El grado de anisotropía no es afectado sensiblemente por variables del proceso tales como reducción por pasada, velocidad del laminador, lubricación del fleje, tamaño y orientación de los granos en el tocho de colada, ni impurezas, mientras se mantengan dentro de cierto rango.

Tungloff y Bolilen estipulan que la anisotropía en latón 68-32 aumenta con:

- 1 - El aumento de la penúltima reducción de espesor.
- 2 - Aumento de la última reducción.
- 3 - Disminución de la penúltima temperatura de recocido.
- 4 - Aumento de la temperatura de recocido final.

En el caso de la textura de cubo, (100) [001], los siguientes factores son los más eficaces para reducir y eliminar la direccionalidad que provoca su presencia:

- 1 - Pequeña reducción en frío (aproximadamente 50% o menos) con recocidos intermedios.
- 2 - Que el penúltimo tamaño de grano sea grande.
- 3 - Recocido final a baja temperatura.
- 4 - Adiciones de pequeñas cantidades de elementos de aleación.

Está entonces en lo cierto B. Chalmers cuando afirma: "Parece que la producción de una orientación al azar o una preferida deseada es aún un problema que puede resolverse mejor con métodos empíricos".

8. TEXTURAS DE CHAPAS DE HIERRO - SILICIO

Las chapas de hierro - silicio son especialmente adecuadas para algunas aplicaciones en la industria eléctrica, tales como la fabricación de núcleos de transformadores. Ello se debe a que es posible, mediante un proceso adecuado, obtener un material con textura de fácil magnetización en alguna dirección especial en la que la intensidad magnética resulta así más elevada que en otras direcciones, evitándose de este modo pérdidas elevadas de flujo.

Se trata de texturas logradas por recristalización secundaria. Para que ésta se produzca, debe restringirse el crecimiento de los granos primarios. En los metales cúbicos cara centrada, esto se logra mediante una textura de recristalización primaria muy desarrollada. En los metales cúbicos cuerpo centrado, la recristalización secundaria se pro-

d - se a menudo a partir de una matriz con una débil textura de recristalización primaria. La inhibición del crecimiento de granos primarios se puede lograr de dos maneras distintas.

a - inclusiones

b - efecto de espesor de la muestra.

En el segundo caso, el crecimiento se interrumpe cuando el tamaño de grano primario iguala al espesor de la muestra.

Existen tres tipos principales de textura en aleaciones de hierro-silicio para transformadores

1 - Textura de Goss o "cubo de canto" ("cube on edge")

2 - Textura de Assmuss o cúbica

3 - Textura de Littmann

En todas ellas, se trata de lograr que el plano de la chapa contenga una dirección preferida $\langle 001 \rangle$, que es de fácil magnetización en las aleaciones de hierro.

La textura de Goss es del tipo $\{110\} \langle 001 \rangle$. Se ilustra en la figura 6. Tiene una dirección de fácil magnetización en el plano de la chapa.

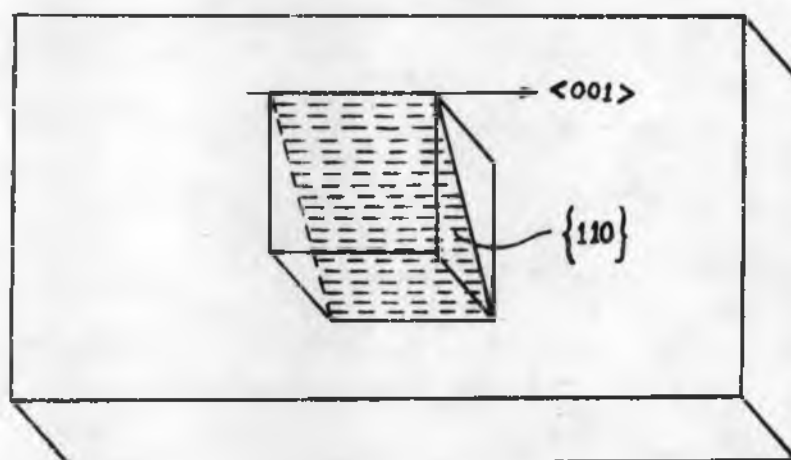


Figura 6

Un análisis típico de chapa de hierro-silicio comercial para transformadores es: Si : $3 \pm 3,25\%$; C : $0,03\%$; Si : $0,015 \pm 0,03\%$; Mn : $0,05 \pm 0,06\%$. El sulfuro de manganeso se usa en este caso como inhibidor del crecimiento de grano. El proceso para la obtención de la textura de Goss comienza con el material laminado en caliente, con un espesor aproximado de 2 mm. Este se lamina en frío a un espesor de 0,6 mm y se somete

a un recocido a temperaturas comprendidas entre 800 y 900 °C durante unos minutos. Luego se lamina en frío a un espesor de aproximadamente 0,3 mm. Mediante un breve recocido de carburante, se reduce el contenido de C a aproximadamente 0,005 % y se recrystaliza el fleje. Un recocido final durante varias horas a alrededor de 1200 °C da como resultado la textura de recrystalización secundaria $\{110\} \langle 001 \rangle$.

La textura cúbica o de Assmuss es del tipo $\{100\} \langle 001 \rangle$. Tiene dos direcciones $\langle 001 \rangle$ en el plano de la chapa. Se representa en la figura 7.

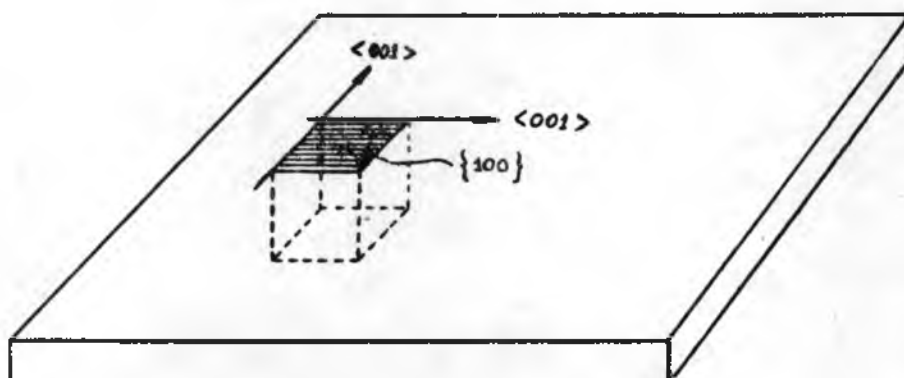


Figura 7.

Existen varios procesos que permiten la obtención de chapas de hierro-silicio con esta orientación preferida. Uno de ellos, reseñado por Möbius y Pawlek para contenidos de Si mayores del 1,8 % es el siguiente: 80% de deformación en frío, recocido a 850 °C durante una hora y media, 74 % de reducción en frío y un recocido final de 12 horas a 1250°C luego de un breve tratamiento de envejecimiento a 100 ó 200 °C. No se especifica la atmósfera final del horno para el recocido final, pero probablemente se trata de hidrógeno.

Es muy importante, cuando se usa el efecto de espesor de la chapa como inhibidor del crecimiento primario, la atmósfera en que se efectúa la recrystalización secundaria, dado que la misma puede determinar la aparición de una textura u otra.

La textura de Littmann es $\{120\} \langle 001 \rangle$. Contiene una dirección de fácil magnetización en el plano de la chapa. Se usa principalmente en aplicaciones de alta frecuencia, donde son necesarias chapas muy delgadas, del orden de 0,01 mm de espesor. La textura $\{120\} \langle 001 \rangle$ se obtiene a partir de las chapas de 0,3 mm con textura de Goss, que son laminadas y recocidas en un proceso patentado por Littmann.

BIBLIOGRAFIA

- "Metalurgia mecánica", G. Dieter, Ed. Aguilar.
- "Elementos of X-Ray Diffraction", B.D.Cullity, Ed. Addison-Wesley
- "Estructura de los metales", C S. Barrett, Ed. Aguilar
- "Cold Working of Metals", A S.M.
- "Preferred Orientations in Wrought and Annealed Metals", F.L.Dillamore, W.T. Roberts - Metallurgical Reviews, 1965, Vol. 10 N° 39, Institute of Metals.

PROCESOS DE LABORATORIO

Los metales pueden ser trabajados en el laboratorio para estudiar el efecto de la deformación sobre las propiedades del metal, para producir una estructura deseada tal como un tamaño de grano fino, o para preparar probetas de forma y tamaño adecuados. Ocasionalmente, la deformación deseada puede producirse con equipos comunes en la mayoría de los laboratorios. Por ejemplo, deformaciones pequeñas controladas pueden producirse por un estiramiento ligero de probetas en una máquina de tracción, por flexión de una chapa alrededor de un mandril, o por indentación con una máquina de dureza Brinell o Rockwell. Operaciones de forja útiles pueden llevarse a cabo en forma satisfactoria en frío o en caliente mediante un yunque y un martillo. Sin embargo, se necesitan equipos más elaborados para la mayor parte de las operaciones de fabricación.

1. LAMINACION

Es el proceso de trabajado más común. Incluye la laminación de fleje plano y de barras. La chapa metálica se fabrica mediante rodillos cilíndricos lisos, llamados a veces "planos", para diferenciarlos de los tallados (o acanalados) usados para las barras. De estos dos procesos, el laminado plano es practicado mucho más ampliamente en el laboratorio porque la chapa o el fleje hallan más uso como material de ensayo que la barra, y ésta puede obtenerse a menudo en forma más conveniente mediante el martillado (swaging).

1.1. LAMINACION DE CHAPA : En lenguaje comercial, se llama chapa al metal laminado vendido en longitudes y anchos definidos, mientras que el fleje es chapa metálica bobinada de longitud indefinida. Sin embargo, los dos términos se usan en forma más o menos indistinta en el laboratorio.

Para laminar chapa a partir de un pequeño lingote, éste debe tener forma rectangular (un paralelepípedo) de aproximadamente el mismo ancho que la chapa deseada, y razonablemente fino para reducir la cantidad de laminado requerido.

Dado que la mayor parte de los lingotes colados tienen una superficie algo rugosa debido a factores tales como paredes de molde rugosas, gotas frías u otras irregularidades en el proceso de solidificación, es a menudo deseable "limpiar" (scalp) las superficies planas del lingote por maquinado, eliminando alrededor de 1,5 a 3 mm. de cada lado. Se obtiene así una superficie mejor de la chapa laminada, eliminando astillas (slivers),

óxidos superficiales, laminados, etc. Si en los recocidos intermedios entre operaciones de laminación se forman capas relativamente fuertes de óxido, es una buena práctica decapar al metal en ácidos fuertes diluidos, o bien arenar o bombardear con perdigones la superficie antes de continuar la laminación.

No conviene colar lingotes más finos de 6 mm. ($1/4''$). Sin embargo, el lingote debería ser por lo menos cuatro veces más grueso que la chapa requerida, para obtener una rotura suficiente de la estructura de colada. Aunque hay algún ensanchamiento del fleje durante el laminado, usualmente no es suficiente para ser importante, y puede en general ser despreciado.

1.2. TIPOS DE LAMINADORAS

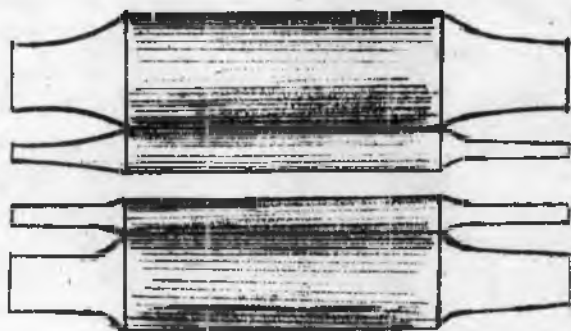
La mayoría de las laminadoras de laboratorio son dúo, o sea, sólo se usan dos rodillos (ver figura 1)



Laminadora Dúo

— Figura 1 —

Cuando debe laminarse material muy fino, particularmente si éste es duro o resistente, es preferible una laminadora cuarto. Esta consiste en dos rodillos de trabajo accionados, relativamente pequeños, respaldados por dos rodillos de soporte mucho mayores (figura 2)



Laminadora cuarto

— Figura 2 —

Esta disposición permite aprovechar la ventaja de la más favorable relación de diámetro de rodillo a espesor del material, lo que permite laminar hasta espesores más finos que con diámetros mayores. La función de los rodillos de soporte es reforzar a los rodillos de trabajo de manera que éstos no flexionen bajo las tremendas presiones necesarias para laminar hasta espesores muy finos. La laminadora dúo es una laminadora especial, y no es buena para laminación general dado que el rango de espesor de fleje que puede trabajar es muy estrecho.

En las laminadoras de laboratorio, los rodillos pueden variar en diámetro desde alrededor de 50 mm. (2") para las laminadoras de joyero operadas a mano hasta alrededor de 300 mm (12") para equipos mayores accionados por motor. Los rodillos de joyeros están limitados a pequeñas muestras de alrededor de 25 mm. de ancho y no son satisfactorios para materiales tenaces como el acero inoxidable; en materiales blandos como el Cu y el latón pueden servir en el rango de espesor desde alrededor de 6 mm. (1/4") hasta 0.01 mm. (0,005"). Para laminar muestras mayores en forma satisfactoria, es necesario un equipo accionado por motor. El diámetro de rodillos de tales laminadoras es a veces pequeño, de aproximadamente 75 mm. (3"), pero más a menudo es de 150 mm (6") o más. Rara vez se usan en el laboratorio rodillos tan grandes como 300 mm (12") de diámetro, dado que el tamaño y el costo del equipo aumenta rápidamente con el diámetro de rodillos. De acuerdo con Sachs y Van Horn, en el laminado en frío con laminador dúo, la longitud de los rodillos no debería ser mayor que $1\frac{1}{2}$ vez el diámetro. En caso contrario habría una flexión excesiva de los rodillos.

Se ha establecido que el diámetro de rodillos no debería ser mayor de aproximadamente 500 veces el espesor de la chapa para reducciones plásticas. Si se usan mayores relaciones de diámetro de rodillos a espesor, la reducción por pasada se hace demasiado pequeña, dado que al disminuir mucho el espesor de la chapa, la fuerza separadora de rodillos aumenta notablemente para una misma reducción. Presiones de rodillo muy elevadas sólo son practicables por el uso de rodillos de pequeño diámetro donde el área de contacto entre rodillo y chapa es pequeña. Algunas laminadoras especialmente diseñadas para producir hojas muy finas tienen rodillos de trabajo de aproximadamente 12 mm (0,5") de diámetro, y son capaces de laminar hojas de hasta 0,001 mm (0,0005"), algo más finas que las indicadas por la relación 500/1. Por otro lado, con rodillos de 150 mm (6") de diámetro, no es fácil laminar mucho menos que lo 0,3 mm predichos por la relación. Después que se alcanzó el espesor práctico inferior, no se produce una mayor reducción debido a que los rodillos son separados elásticamente.

Los mejores rodillos para el laminado en frío se hacen de acero de herramientas de baja aleación y los de laminado en caliente se hacen generalmente de fundición en coquilla o de acero fundido de baja aleación. Algunos fabricantes de rodillos suministran rodillos de acero rápido templado, pero éstos son comparativamente caros. Sin embargo, tienen la ventaja de

que aún si la temperatura aumenta demasiado, no se produce ablandamiento, y la superficie de los rodillos permanece inalterada después de un uso considerable. Además, pueden usarse para la laminación en frío. El alto costo de tales rodillos impide su uso, excepto en laminadoras pequeñas. La superficie algo más rugosa de la fundición es adecuada para el laminado en caliente, y estos rodillos son considerablemente más baratos que los de acero. Para las mayores tensiones encontradas en el laminado en frío, la fundición en coquilla puede no ser adecuada, y su superficie generalmente más pobre es a menudo objetable.

La cantidad de reducción conseguida por pasada depende del diámetro de los rodillos, de su rugosidad, tensión de fluencia del metal a ser laminado, potencia disponible, lubricación y método de carga del material en la laminadora. Para el laminado en frío simple de la mayor parte de los metales en una laminadora dúo, es común una reducción de alrededor del 10 al 20%. La reducción total entre operaciones de recocido depende de las características del metal. Metales muy dúctiles tales como Cu puro, Ag, Au, Al y unos pocos más pueden laminarse indefinidamente sin romper. Sin embargo, aún con estos metales es generalmente deseable usar algún recocido intermedio para permitir una reducción más rápida en espesor. La mayoría de los metales y aleaciones son recocidos después de alrededor de 40 a 80% de reducción en espesor.

El trabajo gastado durante el laminado está dado por la ecuación :

$$W = V \sigma \ln \frac{h_0}{h}$$

donde : W es el trabajo gastado para deformar el metal

V es el volumen de metal laminado

σ es la tensión media de deformación (promedio entre la de entrada y salida)

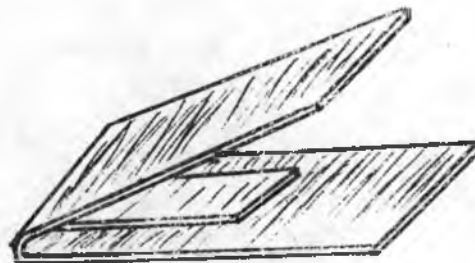
h_0 es el espesor original del fleje

h es el espesor final del fleje

Dado que la fórmula superior desprecia a la fricción, los intentos de calcular la potencia real requerida para formar una muestra mediante su uso darán por resultado valores muy bajos, posiblemente en un factor de alrededor de 3 o aún mayor si el fleje es muy fino, o si el laminado se efectúa en caliente.

1.3. LAMINACION EN PAQUETE:

Si es necesario laminar chapas más finas que las que pueden hacerse en un laminado común, es posible emplear la laminación en paquete, en la que la chapa es colocada en el medio de un forro de acero, construido con una chapa de alrededor de 0,75 mm (0,03") de espesor (ver figura 3)



—Figura 3—

De esta manera pueden laminarse chapas de alrededor de 0,025 mm. de espesor, usando una laminadora dño regular, pero la superficie no es usualmente tan lisa como cuando los rodillos hacen contacto con la misma.

1.4. LAMINACION CRUZADA

El ancho del fleje puede aumentarse mediante la "laminación cruzada" o laminación en una dirección perpendicular a la dirección original. De este modo pueden prepararse piezas de ancho casi igual a la longitud de los rodillos, aún cuando el fleje de partida sea considerablemente más angosto. Se recomienda generalmente que la probeta sea recocida antes del laminado cruzado dado que eventualmente puede producirse fragilidad en la dirección transversal debida a textura de laminación pronunciada o a inclusiones. Esta dificultad no es fácil de encontrarse, sin embargo, en materiales muy blandos y dúctiles. La laminación cruzada se usa a menudo como medio para preparar muestras con un mínimo de propiedades direccionales debidas a texturas de laminación.

1.5. LAMINACION DE COMPRESION

C. S. Barrett usó una técnica que llamó "laminación de compresión" para estudios de la naturaleza de la deformación de compresión de los metales y para reducir más aún la orientación preferida. Esta técnica involucra laminar un disco, usando reducciones muy pequeñas por pasada. Girando el disco unos pocos grados antes de cada pasada, se varía continuamente la dirección de laminado. Así no se desarrolla orientación preferida en el plano de laminación, pero la pieza tendrá una textura fibrosa similar a la desarrollada en alambres. Puede verse fácilmente que esto equivale a una compresión pura del disco, pero, dado que no se desarrollan fuerzas de fricción en un monto significativo, pueden producirse deformaciones de compresión mucho mayores que las posibles cuando la muestra es prensada entre placas pulidas lubricadas en una máquina de compresión.

1.6. LAMINACION EN CALIENTE

Ya se vió los metales calientes son más blandos que los fríos; de aquí que puedan efectuarse mayores reducciones por pasada en el laminado en caliente que en frío. El término laminado en caliente usualmente implica que el metal recrystaliza durante el trabajado; de esta manera, no es necesario el recocido en el curso del laminado en caliente. El laminado en caliente puede usarse como un proceso intermedio para reducir al metal rápidamente a cerca del espesor final. Al terminar con un laminado en frío, puede obtenerse una estructura trabajada en frío en la chapa final si se desea, y al mismo tiempo se produce una probeta de mejor acabado superficial que el que se puede obtener en el laminado caliente.

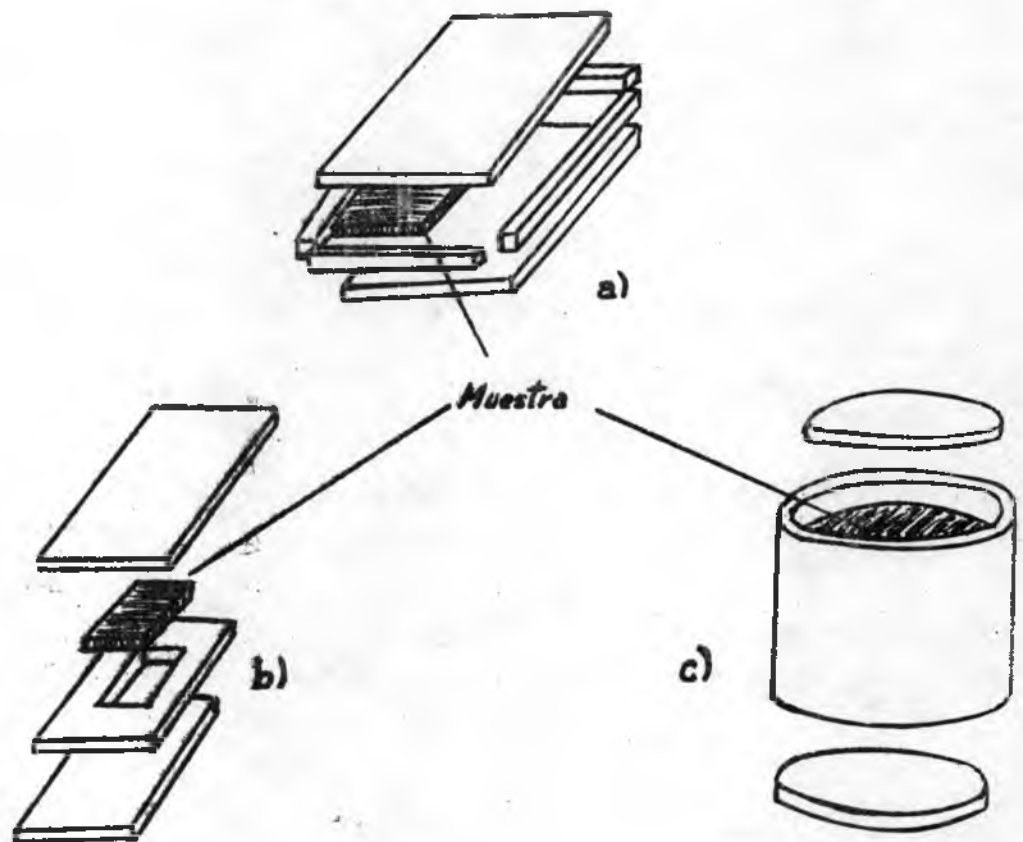
Sachs y Van Horn establecen los siguientes rangos de temperaturas para la forja de algunos materiales metálicos. Puede suponerse que el rango de temperaturas para las otras operaciones de trabajado en caliente sería esencialmente el mismo.

Rango aproximado de temperaturas para el trabajado en caliente de varios metales :

Aceros al carbono	
0,1 % C	1300°C
1,5 % C	1050
Aceros de baja aleación	25 a 50°C menos que para el acero al C del mismo contenido de C
Aceros de alta velocidad o inoxidable	1050 - 1200
Ni	1250 - 875
Monel	1175 - 1000
Incomel	1250 - 1000
Cu	900 - 850
Latones	800 - 650
Al	500 - 350
Aleaciones de Al	500 - 400
Aleaciones de Mg	400 - 200
Aleaciones de Zn	300 - 220

1.7 LAMINACION CON ENMARCADO

Los metales reactivos tales como el Zn y el Ti pueden absorber cantidades objetables de O y N del aire en el laminado en caliente. En estos casos es posible proteger el metal enmarcándolo temporariamente en una camisa de acero o de otro metal (ver figura 4). Tal camisa puede hacerse fácilmente de chapa soldando una caja de 3 mm (1/8") a 6 mm (1/4") de espesor de placa, o para probetas cilíndricas con un tubo con extremos soldados.



— Figura 4 —

Los flejes laterales de la figura 4a) no son necesarios si el material a laminarse es de un espesor de alrededor de 0,75 mm (0,03") o más fino. Usualmente no es necesario expulsar el aire del interior del marco si éste ajusta bien a la muestra.

Otra técnica para prevenir el ataque atmosférico excesivo es calentar el material en un baño de sales fundidas, seleccionando la sal de manera que su punto de fusión esté por debajo de la temperatura de laminación. La sal adherida al material proporciona en algunos casos suficiente protección durante el laminado.

1.8 DEFECTOS DE LAMINADO

El defecto de laminado más común, fractura de borde, se encuentra en metales laminados cuando se intenta una reducción demasiado grande entre recocidos, o donde el metal tiene una ductilidad limitada. Este defecto aparece como grietas transversales en el borde del fleje, que se propagan gradualmente a través del mismo. Si se para la laminación cuando aparecen las primeras grietas de borde, puede usualmente salvarse la chapa mediante un recocido y luego recortando los bordes para quitar las grietas.

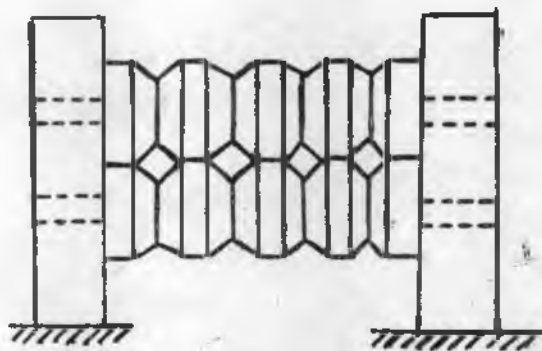
Si no se recorta el material agrietado, las grietas pueden progresar aunque se usen recocidos muy frecuentes. Una preparación inadecuada del lingote es responsable de la mayor parte de los inconvenientes encontrados en la laminación. Como se mencionó antes, el "despellejado" (scalping) del lingote mediante maquinado plano sobre ambos lados es de considerable ayuda en asegurar una buena superficie, y ayudará también a evitar grietas.

Una forma exagerada de grietas de borde se produce con los materiales frágiles donde las primeras grietas que aparecen pueden ir todo lo largo a través de la chapa perpendicularmente a la dirección de laminación. En este caso, la muestra debe tirarse o volverse al horno de fusión.

Otro defecto conocido como "efecto cocodrilo" se observa a veces cuando se produce un cierto tipo de distribución de tensiones residuales durante la operación de laminado. Este defecto está caracterizado por una rajadura en un extremo a lo largo de un plano central paralelo a la superficie de la chapa. Esta situación es particularmente frecuente al laminar aleaciones fuertes, y puede evitarse por recocidos más frecuentes durante el laminado en frío o por el laminado en caliente.

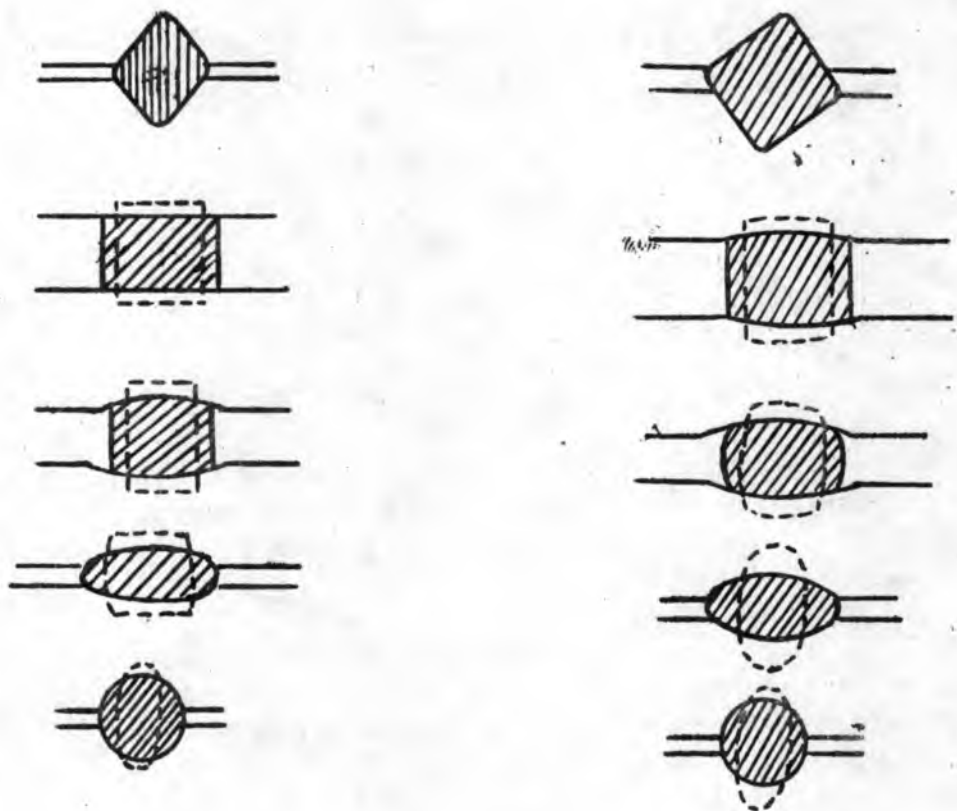
1.9. LAMINACION DE BARRAS

Hay muchas formas de rodillos acanalados (figura 5) usados en el laminado de barras (que es usualmente un proceso de trabajado en caliente), siendo el tipo más común en el laboratorio el de canales ovales casi semi redondos, aunque es buena una serie de pasadas de forma romboidal si se quiere terminar con una sección transversal cuadrada. Estos tipos son los más simples dado que no se necesitan guías para mantener a la barra en el canal adecuado.



— Figura 5 —

Las guías son pistas de forma y tamaño adecuados para permitir que la barra pase justa pero que no le da libertad para girar al entrar o abandonar los rodillos. Sin embargo, los canales ovales casi redondos tienen la desventaja de que permiten el giro de la barra a través de la laminadora, con la consiguiente pérdida de control del proceso. Además, si los canales no son suficientemente ovales, el metal estará demasiado constreñido excepto en las aperturas de cada lado y tenderá a formar demasiada rebaba. Las pasadas para el laminado de barras de acero son frecuentemente una serie de óvalos casi planos y rombos (figura 6), finalizando con canales semiredondos para permitir una mayor trabajado del metal, de donde proviene una mejor rotura de la estructura de colada. En la figura 6 se muestran dos diseños similares de pasadas para ir de un cuadrado, o casi, a un redondo. Las líneas de trazos indican el material cargado proveniente de la pasada anterior. Como es obvio, se requiere un considerable planeamiento para una serie de rodillos acanalados, dado que las distintas áreas de las aberturas y los cambios de forma deben regularse adecuadamente para el tipo de material que se lamina, dado que diferentes materiales muestran distintas tendencias al flujo lateral (o ensanchamiento). Hay una tendencia considerable a formar rebaba en el espacio comprendido entre los rodillos, pero éste se minimiza con un buen diseño.



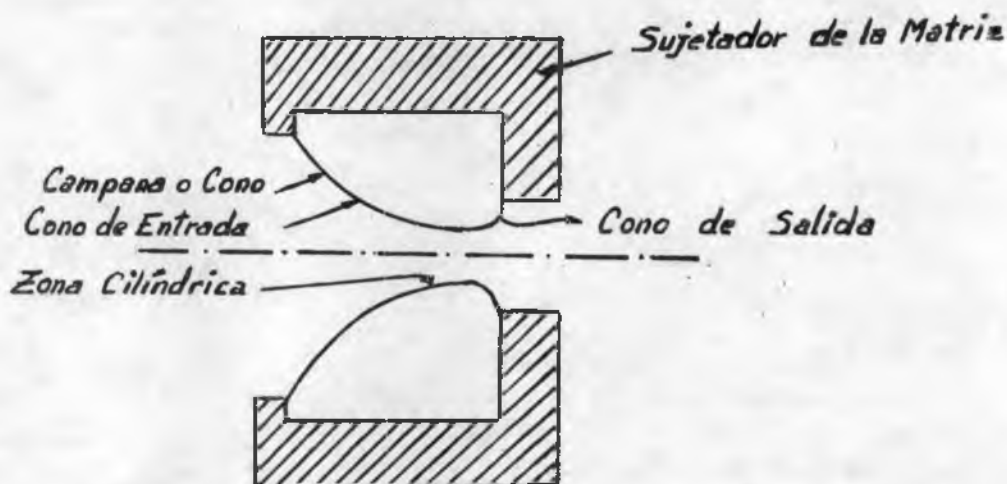
— Figura 6 —

La colocación de un par de rodillos acanalados en la laminadora es una tarea larga, particularmente si deben usarse guías; de aquí que no sea particularmente atractivo en el laboratorio donde es importante la flexibilidad. En una laminadora pequeña, la cantidad de trabajo no es grande. Por otro lado se consigue mayor adaptabilidad con la martilladora (swaging)

2. TREFILADO DE ALAMBRE

2.1. MATRICES Y LUBRICANTES

En el trefilado de alambre, una barra puntiaguda o un alambre es obligado a pasar a través de un agujero o matriz de forma especial de manera de reducir el diámetro de alambre y aumentar correspondientemente su longitud. La figura 7 muestra una sección transversal a través de una trefila para alambre típica que puede hacerse de acero templado, carburo de tungsteno, o diamante.



— Figura 7 —

La matriz consiste en un sujetador de matriz que soporta el carburo o diamante, mientras que la matriz misma consta de cuatro partes : 1) la campana o cono, 2) el cono de entrada o de trabajo, 3) la zona cilíndrica y 4) el cono de salida.

La campana es el gran radio a la entrada de la matriz que sólo sirve para guiar al alambre puntiagudo en el cono de entrada, cuyo ángulo puede variar desde alrededor de 12° para metales más duros a alrededor de 30° para materiales blandos. Es en la porción cónica de la matriz que se produce la reducción real. Esta área es seguida por una sección recta o cilíndrica llamada soporte (bearing) que da el tamaño del alambre y tiende a conferirle una superficie lisa. El cono a la salida de la matriz es para relajar la presión de matriz en la superficie externa de la misma, y evitar así la rotura superficial de los materiales de matriz frágiles. El proyecto

de matrices de trefilado es complejo y aparentemente no hay reglas bien reconocidas para la elección del ángulo de entrada óptimo, longitud de zona cilíndrica, etc.

Las matrices de acero no se usan mucho a causa de las elevadas fuerzas de fricción que desarrollan. Las trefilas de carburo de tungsteno se usan generalmente para tamaño de hasta 0,5 mm. (0,020") de diámetro. Para tamaños más pequeños se prefieren usualmente las trefilas de diamante. Se producen excesivas roturas del alambre (fallas de tracción), cuando se usan trefilas de carburo de tungsteno en tamaños más pequeños, debido a una fricción excesiva. Por otro lado, las trefilas de diamante tienen una mínima tendencia a rayarse durante el trefilado debido a su dureza extremadamente elevada. Es característico de estas trefilas que si se grafica costo de matriz versus tamaño, la curva pasa por un mínimo en las proximidades de 0,025 mm (0,005") de diámetro. La razón para esto es que con tamaños mayores el costo del diamante es el factor determinante mientras que para tamaños menores el costo aumenta a causa de la dificultad en perforar y rectificar con precisión agujeros en matrices muy pequeñas.

Los lubricantes son de considerable importancia en el trefilado de alambres y se requiere de ellos en casi todos los casos que impidan el rayado de la trefila, fallas por tracción, y para producir una buena superficie. Varios jabones, incluyendo el jabón amarillo de lavar, o el jabón Ivory, han sido usados con éxito, frotando simplemente al alambre con el jabón sólido antes de trefilar. Hay muchos preparados comerciales conseguibles, algunos de los cuales son en esencia aceites emulsionados que pueden ser suspendidos en agua, muy parecidos a los aceites "solubles" usados en el maquinado de metales. Para usar tales emulsiones es generalmente deseable sumergir la matriz y el soporte de la misma en el líquido o por lo menos hacer gotear al líquido sobre la trefila, cuidando de mojar el lado de la campana de la misma donde entre el alambre.

En el trefilado de aceros más bien duros tales como los de alto contenido de C, se ha hallado necesario usar un recubrimiento de cal hidratada que se mantiene sobre el alambre de acero mediante una superficie algo rugosa obtenida en un tratamiento con ácido. El acero recubierto con cal es pasado durante el trefilado a través de una caja de lubricante sólido del tipo de jabón, tal como estearato o palmitato de Al, montada sobre el soporte de la trefila. Esta combinación de película de cal-jabón es tan adherente y protectora que pueden hacerse varias pasadas sin necesidad de lubricación adicional.

Algunos metales, tales como el W y el Mo, deben trefilarse en caliente. En tales casos es práctica general recubrir el alambre con "Aquadag", una suspensión coloidal de grafito en agua. Pasando primero el alambre a través del Aquadag, seguido de un calentamiento con una llama de gas, se elimina el agua, dejando una capa fina de grafito sobre el alambre que sirve como lubricante.

En el trabajo de laboratorio es generalmente deseable llegar hasta un diámetro de 1 mm (0,04") mediante martillado (swaging) antes de trefilar. El martillado es una operación algo más simple y rápida que el trefilado de alambre, particularmente cuando se trabaja con longitudes de 1 m o menos.

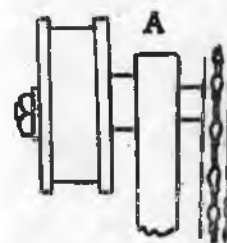
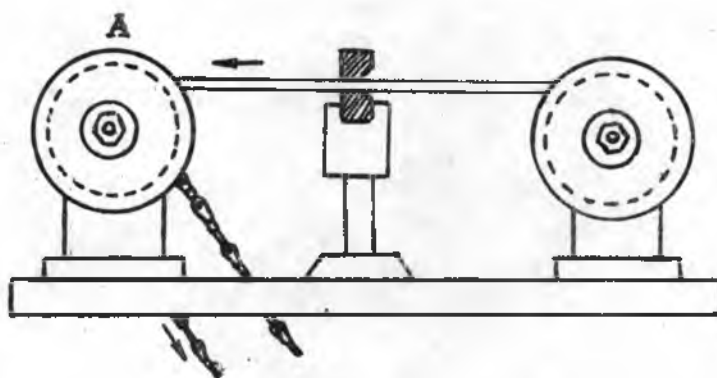
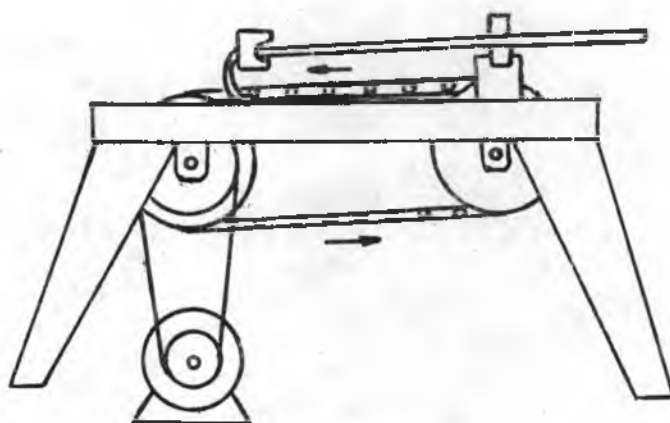
2.2. EQUIPO DE TREFILADO

Pequeñas longitudes de metales blandos en pequeño tamaño pueden trefilarse a mano a través de una trefila o una placa de trefilar de acero conseguible mediante un fabricante de equipos para joyeros. Pero generalmente se necesitan equipos más elaborados.

Hay dos tipos de equipos de trefilar adecuados para el trabajo de laboratorio : 1) el banco de trefilado y 2) la máquina de trefilar tipo reel. Al investigar el mercado de equipos de laboratorio para trefilado, se encuentra muy poco que sea a la vez conseguible y adecuado. Si el trefilado de alambres es sólo una operación ocasional en el laboratorio, se puede usar una máquina de ensayo de tracción. Montando una trefila en un adaptador adecuado en las mordazas inferiores de la máquina, y agarrando al alambre con las superiores, puede llevarse a cabo un trefilado de alambre muy satisfactorio si se requieren sólo pequeñas longitudes. El amplio rango de velocidades conseguibles es una máquina de ensayo de tracción hace posible empezar a trefilar lentamente, lo que es muy conveniente. Sin embargo, si se trefila alambre con frecuencia y si es deseable elaborar varios metros de una clase para una investigación, será más adecuada una máquina especial de trefilar alambres.

Casi todas las máquinas de trefilar alambres comerciales están concebidas para grandes producciones y son usualmente demasiado grandes, demasiado costosas y no flexibles. Sin embargo, ocasionalmente pueden obtenerse pequeños bancos de trefilar, de 2 m (6') de largo o algo mayores, de fabricantes de equipos de joyeros. Un banco de trefilado tiene ciertas ventajas sobre una máquina del tipo reel en que es más fácil de usar en los tamaños mayores de alambre y en corte longitud. Por otro lado, un banco de trefilado puede manejar únicamente alambres tan largos como el banco, y se requieren muchos cortes a medida que el alambre se va haciendo más fino. Con el tipo de máquina reel el alambre puede aumentar su longitud casi indefinidamente sin cortarse, siendo la operación esencialmente continua salvo para cambiar las trefilas. La figura 8 muestra esquemáticamente cada tipo de equipo de trefilado

La máquina de trefilar tipo reel puede hacerse fácilmente en el laboratorio. Todo lo que se requiere es un motor de 1/4 a 1/2 HP, con velocidad variable y tambores (preferiblemente de madera) montados sobre ejes de manera tal que se puedan cambiar a medida que progresa el trefilado.



— Figura 8 —

El tambor accionado por motor se convierte en alimentador cada vez que se cambia la matriz. El tambor alimentador debería tener un freno ajustable para no girar libremente y desbobinar rápidamente de lo que bobina el tambor de alimentación y la trefila, pero esto no es necesario en el trabajo de laboratorio. Todo lo que se requiere es impedir que el tambor alimentador sobrepase al accionado. El soporte de la trefila debe arreglarse para cambios de matriz rápidos y, si se usa lubricante líquido, debería montarse de manera tal de retener al lubricante goteado o bombeado alrededor de la trefila. Es muy importante tener una velocidad de accionamiento variable de manera de empezar a pasar a pasar el alambre a través de la matriz muy lentamente, a alrededor de 1,5 m (5 pies) por minuto, para evitar la aplicación de una carga de impacto. La velocidad puede incrementarse luego gradualmente hasta el orden de 30 m/min (100 pies/min) o aún mayores si se desea. Hay muchos métodos para asegurar el control de velocidad tales como dispositivos electrónicos para el control de motores de corriente continua, y dispositivos mecánicos como el de Reeves. A menudo son posibles soluciones especiales para el problema del control de velocidad a un costo muy bajo. Por ejemplo, se ha hallado que una bomba de aceite de un caudal adicional variable es muy adecuada

para una velocidad variable de "accionamiento fluido" para una máquina de trefilar alambres, que permite cambios continuos de velocidad desde casi cero hasta la velocidad total del motor eléctrico.

El aguzamiento del alambre para insertarlo a través de una trefila de manera que el dispositivo de agarre pueda tirarlo suele ser una operación dificultosa. Para tamaños pequeños, de aproximadamente 1 mm. (0,040"), el método más simple es probablemente el de afinar la punta mediante swaging usando matrices largas. Es por debajo de este tamaño donde se presentan las mayores dificultades. Un método es el limado, pero es trabajoso y frecuentemente no produce una punta suficientemente larga. Un método exitoso es el de atacar el alambre anódicamente manteniéndolo en un par de tenezas conectado al ánodo de una batería. Una solución de ácido clorhídrico 50-50 en un recipiente con el cátodo de grafito completa el circuito. La inmersión de 50 a 75 mm (2 a 3") del alambre en el ácido durante unos pocos segundos es usualmente suficiente para producir una punta fina muy larga. La punta no debe ser demasiado fina o romperá al tirar con las mordazas. No se recomiendan dispositivos de hacer puntas con rodillos pequeños acanalados de ancho de acanaladura variables.

2.3. DEFECTOS Y FALLAS DEL ALAMBRE

Si la barra a partir de la cual se hace el alambre tiene defectos superficiales tales como pliegues, hendeduras, o lóbulos debido a un swaging inadecuado, no será posible obtener un alambre de buena calidad. Si están presentes estos defectos, deberán eliminarse mediante rectificando sin centro, con limado, o por el uso de arenado, etc.

Si el alambre se rompe con una fractura copa y cono, las fuerzas de tracción eran demasiado elevadas. Esto puede ser provocado por una lubricación inadecuada que dar por resultado fuerzas de fricción excesivas, demasiada tracción posterior en el tambor de alimentación, una velocidad de trefilado inicial demasiado elevada (carga de impacto), o un diseño inadecuado de matriz tal como el ángulo de trefila.

Es importante que el alambre entre y salga de la trefila perpendicularmente a la cara de la misma, o sea, tener los ejes de trefila y de alambre alineados lo más posible. Si esto no se da, se superponen fuerzas de flexión a las de trefilado.

El trefilado de alambre menor de 0,075 mm (0,005") de diámetro no se recomienda en operaciones de laboratorio. Requiere considerable experiencia y equipo especial; cuando el alambre es de 0,025 mm (0,001") de diámetro, es más fino que un cabello humano, y es aún difícil de verse.

2.4. RECOCIDO DEL ALAMBRE

En principio, el alambre no presenta problemas de recocido diferentes de cualquier otra forma de metal, pero es bueno tener en mente que, si se debe recocer una bobina, puede ocurrir que las vueltas adyacentes se peguen. Esto es particularmente probable cuando el alambre es recocido en una atmósfera de hidrógeno a temperaturas relativamente elevadas. Es por esta razón que se usa tanto el "recocido de hebra" (strand annealing) en la industria del alambre. El recocido de hebra, como el nombre lo indica, implica recocer el alambre una hebra a la vez. En la práctica se usa un horno tubular más bien largo, equipado con tambores de sostén de cada lado. En un extremo del horno se monta un tambor alimentador que contiene al alambre duro, y se pasa un alambre largo de hierro resistente a través del tubo caliente enganchado al extremo libre del otro tambor. Se tira luego la mordaza de alambre, que trae consigo al alambre a ser recocido que se bobina luego en el tambor como en la máquina de trefilar. Con un poco de experiencia se determina la velocidad óptima de pasada del alambre a través del horno. Es deseable tener un soporte enfriado por agua a la salida del horno para que el alambre esté frío al bobinarse en el tambor; así se impide su oxidación al pasar por el aire. Es importante usar un accionamiento de velocidad variable aquí como en el trefilado, dado que el alambre es muy blando a la temperatura de recocido y cualquier tirón provocará adelgazamiento y aún rotura del mismo. Por la misma razón debe controlarse la tracción posterior del tambor.

BIBLIOGRAFIA -"

- Practical Metallurgy
G. Sachs, K. Van Horn
Ed. ASM
- Procedures in Experimental Metallurgy
A. V. Seybolt, J. E. Burke
Ed. Wiley



1. LAMINACION

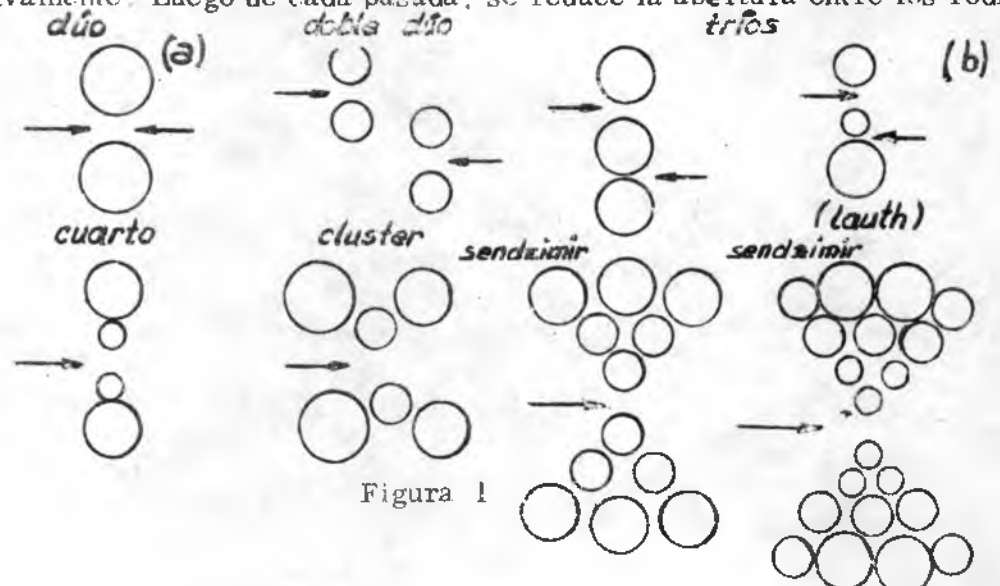
El término general de laminación se usa para describir distintos procesos que trabajan el metal por medio de rodillos. Las operaciones de laminación más importantes son aquellas en las cuales se convierten en productos terminados y semiterminados tales como chapas, flejes, barras, perfiles y tubos. En estas operaciones, el metal es sometido a compresión entre dos rodillos y la rotación de éstos sirve para hacer avanzar el metal en forma continua.

La apertura entre los rodillos es menor que el espesor del material entrante, de manera que el material es aplastado y su espesor, reducido. Los rodillos giran alrededor de sus ejes de manera tal que cuando el material es puesto en contacto con ellos, lo agarran y fuerzan a su interior. Sucesivas pasadas a través de rodillos de apertura decreciente reducen el material al tamaño deseado.

La laminación es un proceso que se puede llevar a cabo en frío o en caliente. Normalmente, el laminado en caliente se usa para las operaciones de desbaste y el laminado en frío para las de acabado. Existen numerosas excepciones, sin embargo.

Generalmente sólo se usa una caja de rodillos, o a lo sumo dos o tres para la primera parte del laminado en caliente y el lingote pasa varias veces entre los mismos rodillos. Las últimas etapas del laminado en caliente y la mayor parte del laminado en frío se efectúan en cajas múltiples.

Se usan varios tipos de laminadoras. La más simple, conocida como dúo ("twohigh"), consiste en dos rodillos, fig. 1a. Generalmente una laminadora tal es reversible, permitiendo que el material pase en ambas direcciones alternativamente. Luego de cada pasada, se reduce la apertura entre los rodillos



Es necesario un gran equipo auxiliar para invertir la rotación en las laminadoras. Para obviar esta necesidad, se ha proyectado al laminador trío ('three-high'). En éste se usan tres rodillos que giran como se indica en la figura 1. b. El material (bloom) es pasado primero a través de los dos rodillos inferiores en una dirección y vuelve luego a través de la apertura superior.

Cuanto menor es el diámetro de los rodillos, menor es la fricción entre éstos y el metal y por lo tanto se necesita menor potencia para una misma producción. Por otro lado, cuanto menor es el diámetro, menor es la rigidez de los rodillos. Así, las tensiones originadas por la resistencia del metal a la deformación conducen a la flexión de los rodillos y por consiguiente, a la producción de un material más grueso en el centro que en el borde. Esta diferencia de espesor puede corregirse en alguna medida con rodillos "bombé" (cambered rolls), o sea haciendo el diámetro en el centro mayor que en los lados. De esta manera puede producirse una chapa plana a pesar de la flexión de los rodillos. Así puede corregirse sólo una pequeña cantidad de deflexión, del orden de décimas de milímetro (unas pocas centésimas de pulgada). Si la deflexión es mayor a las altas tensiones producidas en los rodillos por la presión pueden añadirse efectos de fatiga y conducir a la rotura de los rodillos.

Para aprovechar la ventaja de los menores requerimientos de potencia de laminadoras con rodillos de pequeño diámetro, se han proyectado las laminadoras cuarto ('four-high').

En esta laminadora los rodillos centrales, de diámetro relativamente pequeño, se usan para el laminado. A cada lado de los mismos se coloca un rodillo de soporte. Esta idea ha sido extendida luego a una mayor cantidad, hasta llegar a los laminadores Sendzimir actuales. A causa del costo elevado de los rodillos estos laminadores son muy costosos y se usan sólo para el laminado en frío, donde las tolerancias dimensionales son menores.

1.1. LAMINACION PLANA Y DE PERFILES

Para la producción de chapas y de placas se usan rodillos cilíndricos.

Se llama placa (plate) a cualquier pieza de material cuyo ancho es por lo menos 20 veces el espesor y éste es por lo menos de 6,25 mm ($1/4''$); cuando el espesor es menor de 6,25 mm y mayor que 0,25 mm ($0,01''$) se denomina chapa (sheet); por debajo de este espesor se llama hoja (foil). El fleje (strip) es una chapa cuya longitud es mucho mayor que su ancho. En laminación la chapa se elabora pieza por pieza, y el fleje se bobina.

La colada de lingotes anchos en comparación con su espesor es más difícil que la de lingotes cuadrados. Al laminar, el alargamiento se produce principalmente en la dirección de laminación y prácticamente no hay ensanchamiento. Por estas razones, las chapas o placas de más de 0,60 ó 1 m (2 a 3 pies) de ancho se producen mediante laminación cruzada de lingotes para ensancharlos hasta que alcancen una dimensión transversal mayor que la de la

chapa requerida, luego de lo cual se laminan longitudinalmente hasta alcanzar el espesor deseado. Es necesario un ancho mayor que el de la chapa final debido a que los bordes de la chapa tienden a agrietarse y son necesarios varios cortes para eliminar las zonas agrietadas.

Luego de completar el laminado en caliente, la chapa o placa es, o bien enviada a los rodillos de acabado, donde se ajusta el espesor y se mejora la superficie, o es bobinada para facilitar el posterior manipuleo y laminado en frío.

Las barras y los perfiles se laminan generalmente a partir de un lingote cuadrado u octogonal. Una operación de desbaste en rodillos de superficie plana transforma al lingote en un "bloom" o "billet". El laminado sucesivo se lleva a cabo con rodillos que tienen canales especiales.

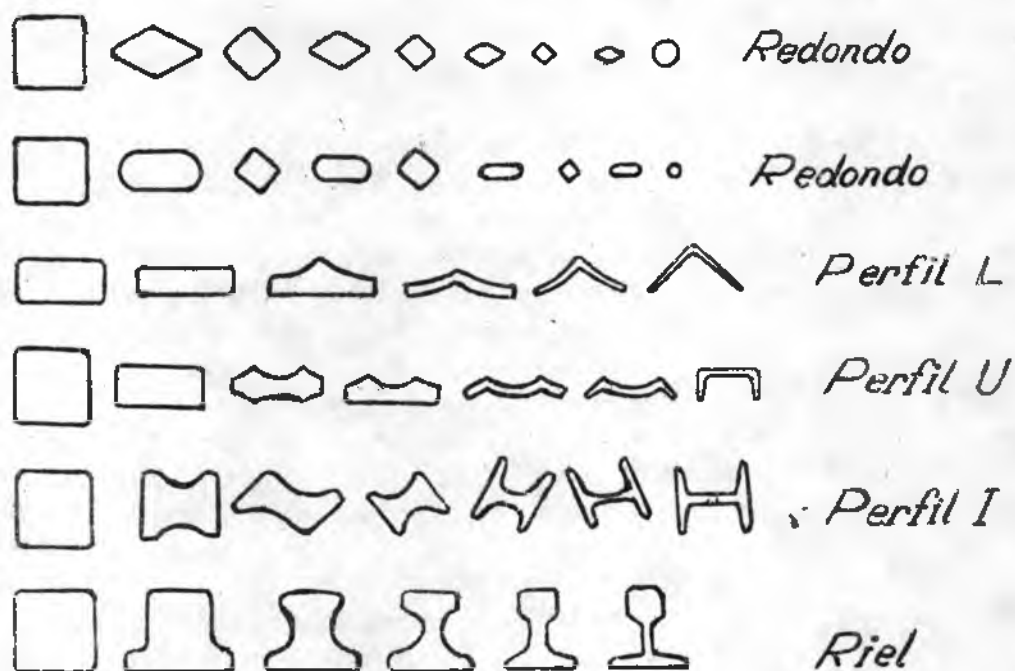


Figura 2

Como en el caso de la chapa, la presión debe aplicarse en una sola dirección a la vez y con varias pasadas se pueden conformar las diferentes superficies del perfil laminado. Si se aplicara la presión en todas las direcciones, se producirían rebarbas que al doblarse en la pasada siguiente darían lugar a la formación de defectos superficiales ('seams'). Por esta razón la barra redonda se lamina en canales óvalos o rombos hasta la pasada final.

1.2 DESBASTADO

Los desbastes son productos laminados en bruto a partir del lingote, generalmente con sección rectangular y aristas redondeadas, cuyos lados tienen por lo menos 130 mm de longitud. Los 'slabs' se distinguen de los desbastes en sí por sus dimensiones. Su anchura viene a ser 1,5 veces mayor que su espesor. El espesor mínimo es de 75 mm.

La laminación de lingotes requiere un detenido tratamiento del material. Con las primeras pasadas se suprime primero la conicidad del lingote colado. Seguidamente tiene lugar una compresión producida por el cierre y soldadura de los huecos (sopladuras y cavidades de contracción). Al mismo tiempo se destruye la estructura de fundición, de propiedades desfavorables. En las primeras pasadas, la reducción relativa de altura ha de ser pequeña, no debiendo exceder de un 10 al 13 %. Después puede ir aumentando para volver a ser pequeña en las dos últimas pasadas. Una vez eliminada la estructura de fundición aparece una estructura de grano fino y uniforme con buenas características del material. El aumento de la resistencia a la tracción que se produce con esto no es grande en general, pero en cambio, el límite de fluencia y, sobre todo, la tenacidad aumentan considerablemente. Ahora, la reducción puede ser tan grande como lo permita el tren de laminación, en cuyo caso hay que evitar una presión lateral demasiado intensa debido al ensanchamiento restringido. En las dos últimas pasadas, la reducción ha de ser nuevamente pequeña si se quiere obtener una sección bien rectangular y uniforme. Cuando se procede inicialmente a dar forma a unos tochos con sopladuras periféricas o zonas porosas, éstas se agrietan y dan origen a distintas clases de defectos superficiales. Consecuencia inevitable de ello son entonces los elevados gastos de escarpado. A pesar del proceso de trabajo aparentemente sencillo, la laminación de lingotes requiere una especial atención, puesto que tiene una influencia decisiva sobre el rendimiento general de toda la instalación de laminación.

Para evitar grietas laterales o agrietamientos de las aristas hay que calentar los tochos con uniformidad y laminarlos a la máxima temperatura admisible. Los aceros que por su naturaleza sean propensos al agrietamiento, tales como los aceros pobres en manganeso y los aceros con defectos de origen procedente de la acerería, requieren un tratamiento especialmente escrupuloso. Además de por un calentamiento uniforme y una temperatura lo más elevada posible, esto es también factible por una frecuente manipulación de los lados, es decir, volteando el lingote con frecuencia.

Los trenes de laminación utilizados en el desbastado se denominan "trenes blooming".

Los lingotes pueden ser laminados en trenes dúo o trío. Los más convenientes suelen ser los trenes trío con cilindros fijos y los que tienen cilindros susceptibles de ajuste. En los trenes trío con cilindros fijos, en cada canal se da solamente una pasada, con el canal siempre lleno. En los trenes dúo normalmente se dan en un canal varias pasadas. Por ello deben ir equipados con cilindro superior susceptible de regulación, como en los laminadores de chapa.

Pese a las ventajas ofrecidas por la laminación de lingotes en canales llenos, poco a poco ha ido cediendo su empleo y, por consiguiente el de los trenes blooming trío. Ello se debe a que a los trenes blooming con cilindros fijos les falta la adaptabilidad a las variables condiciones de trabajo.

Por ello se empezaron a usar cada vez más trenes con rodillos ajustables. En los laminadores dúo, existen dos diseños típicos fundamentales, el "americano" y el "alemán", que se pueden ver en la figura 3.

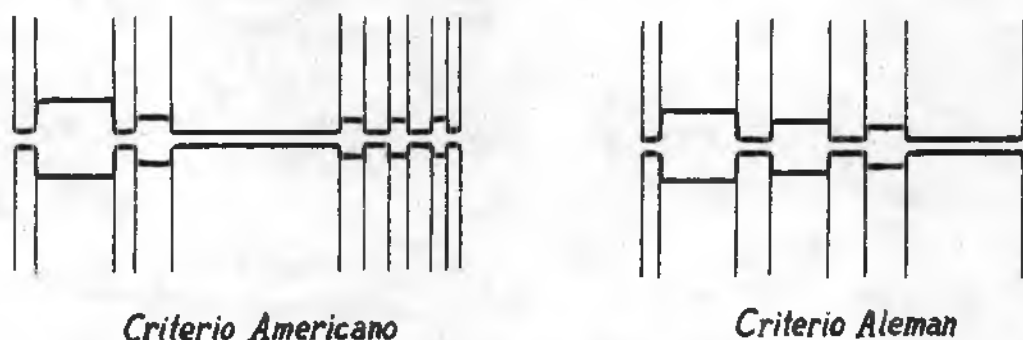


Figura 3

A pesar de sus reconocidas ventajas, la laminación blooming con canales llenos ha sido abandonada por haber pasado los trenes dúos blooming con cilindros ajustables a reemplazar a los trenes trío blooming. Las ventajas que ofrece el desbastar lingotes en canales llenos se consiguen plenamente con los trenes continuos, donde los cilindros están fijos y no se da más que una pasada en cada canal. Semejantes trenes se vienen explotando en los Estados Unidos desde hace varias decenas de años. En la figura 4 se pueden ver dos disposiciones de trenes de esta índole.

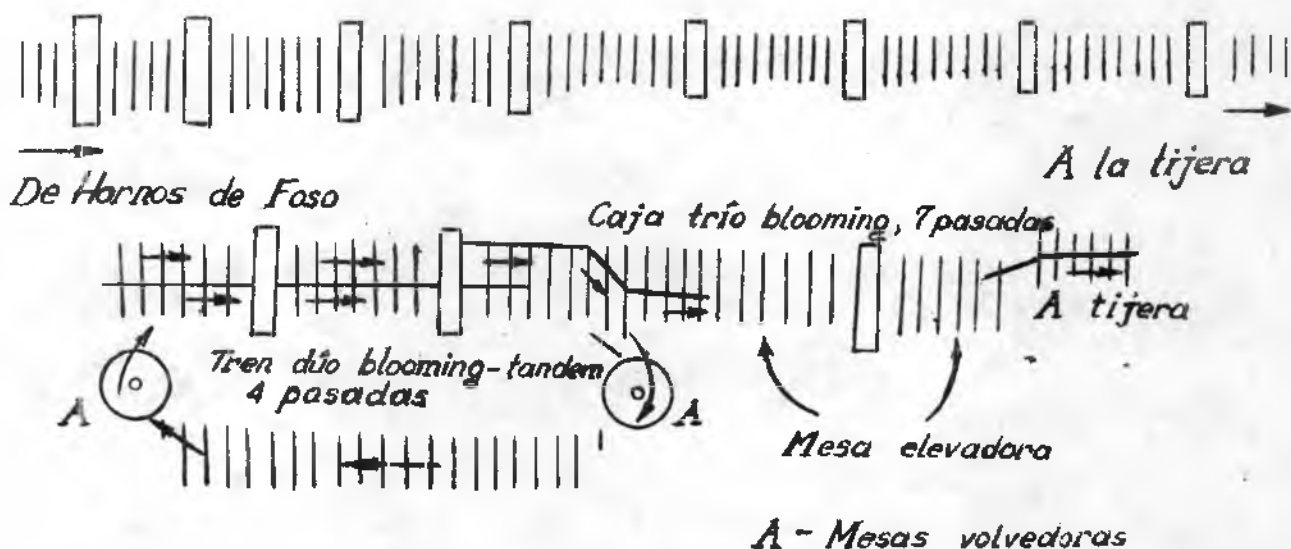


Figura 4

1.4. LAMINADOR PASO DE PEREGRINO.

Consta de dos cilindros cuyas acanaladuras son de perfil variable. Estos cilindros giran en sentido inverso al movimiento de avance del producto.

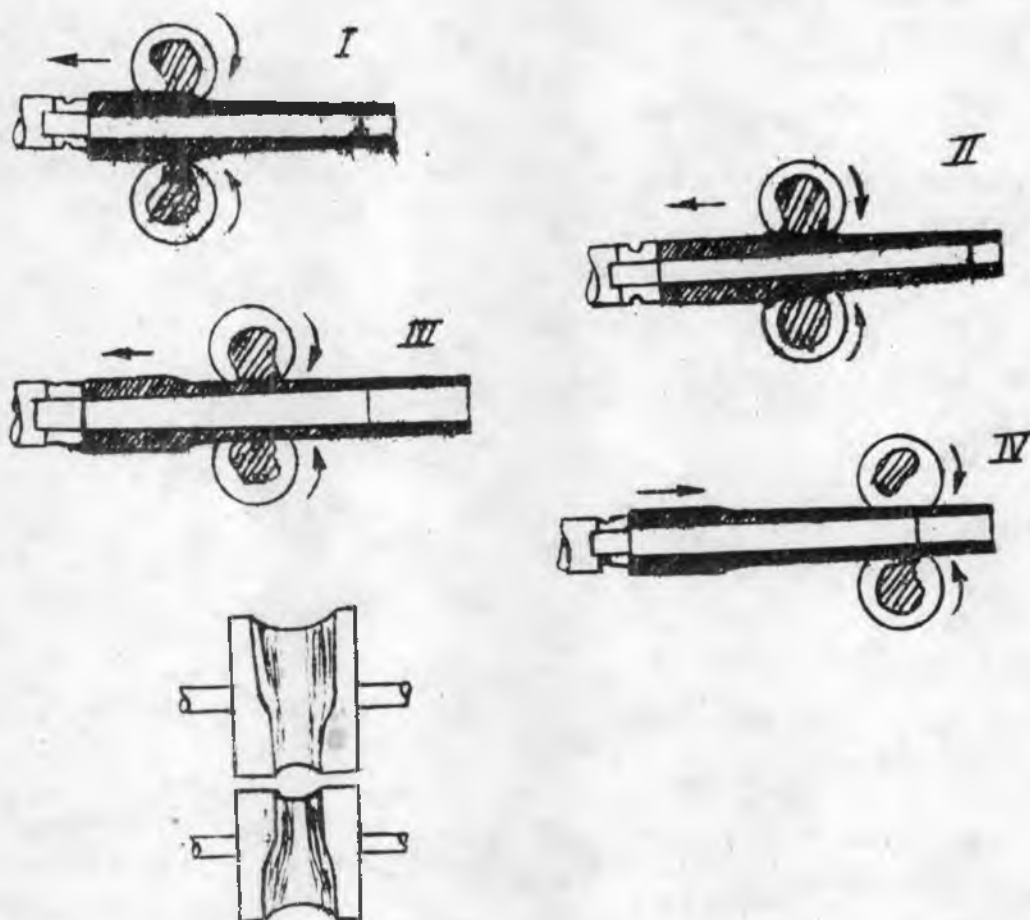


Figura 5.

Sobre la periferia de los cilindros se distinguen 4 sectores que corresponden a 4 secciones diferentes de la acanaladura:

- Un sector de desarrollo cónico que constituye la zona de ataque.
- Un sector de desarrollo cilíndrico que constituye la zona de terminación.
- Un sector donde la acanaladura se amplía progresivamente y que constituye la zona de salida.
- Un sector donde el diámetro de la acanaladura es superior al de los tubos y que constituye la zona de marcha en vacío.

El laminador va acompañado además de un aparato de presentación que consta de:

- a) Un sistema hidráulico de avance de todo el conjunto sincronizado con los rodillos.
- b) Un sistema neumático que acciona el mandril sobre el cual se apoya el tubo de acción rápida.
- c) Un sistema de rosca, llamado cuarto de giro, que gira al tubo 90° después de cada pasada de laminación.

El funcionamiento del conjunto puede explicarse así:

El sistema hidráulico mueve hacia adelante al tubo apoyado en el mandril. Cuando entra en contacto con los cilindros, la zona de ataque toma un trozo de metal, que se alarga hacia la zona de terminación. Como los rodillos giran hacia atrás, impulsan al tubo hacia atrás venciendo la acción del sistema neumático. El sistema hidráulico sigue haciendo avanzar al conjunto.

Una vez que los cilindros llegan a la zona de marcha libre, se produce el avance rápido por acción del sistema neumático y simultáneamente se produce el giro. Como todo el conjunto avanzaba en forma simultánea, el avance es mayor que el retroceso (de ahí el nombre) y la zona de ataque toma un nuevo trozo de metal. Así sigue el proceso hasta que todo el material queda laminado.

1.3. LAMINADORA MANNESMANN Y STIEFEL.

Se conocen también como laminadoras oblicuas. Para comprender mejor cómo se procesa el material en el laminador oblicuo, es conveniente ver lo que ocurre cuando se lamina transversalmente un redondo entre dos o tres rodillos.

Mientras las presiones ejercidas no produzcan fluencia en el material a lo largo de las generatrices de contacto, el redondo solamente girará. Cuando la presión sea suficientemente grande, se producirá fluencia plástica en las vecindades de esos puntos.

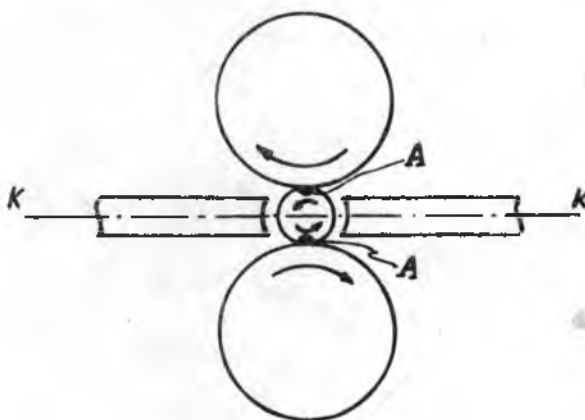


Figura 6.

Aún con grandes tensiones la longitud de contacto es pequeña comparada con el perímetro del redondo, y las regiones plásticas A-A penetran en muy poca profundidad y están lejos del plano medio K-K. Por esta razón el desplazamiento de cada partícula será mucho mayor cerca del área de contacto que en el interior o en el resto de la periferia. De modo que el material de la periferia que es recalado radialmente, puede desplazarse sólo en la dirección tangencial, debido a la presencia de un núcleo rígido.

Si el centro fuera realmente rígido como por ejemplo si el lingote fuera de acero templado recubierto con gran ajuste con un tubo de cobre, el tubo se laminaría ya que la barra de acero actuaría como un rodillo interno con lo que el tubo de cobre aumentaría su diámetro.

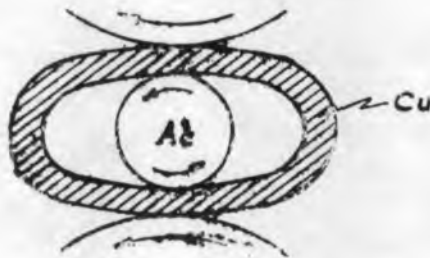


Figura 7a

Cuando se trata de un lingote sólido y homogéneo, tal cosa no puede ocurrir porque 'la cáscara' no puede alargarse por sí misma puesto que se lo impide el núcleo rígido. Cuando intenta efectuarse esta operación, lo que se logra es desplazar una porción de material por delante del área de contacto, rodar sobre ella y aplanarla nuevamente, dos o tres veces por giro, según que se disponga de dos o de tres rodillos. Como consecuencia de ello, el material falla por fatiga y se despegan cáscaras de la superficie.

De manera que no se consigue ni que el material cambie de forma, ni tampoco que avance entre los rodillos. Para ello es necesario:

- 1) Proveer una fuerza que haga mover al lingote axialmente.
- 2) Diseñar un perfil de los rodillos que facilite el movimiento de material desde la zona de contacto de máxima presión.

El primer requerimiento se satisface montando los rodillos inclinados respecto al eje del lingote.



Figura 7b

Si el rodillo gira a la velocidad periférica V , la velocidad periférica del lingote será

$$V_p = V \cos \varphi$$

La inclinación de los rodillos produce además una componente axial

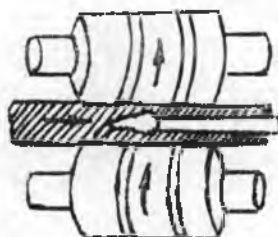
$$V_a = V \sin \varphi$$

que es la que hace avanzar al lingote.

El segundo requerimiento se satisface juntamente con el primero porque al montar los rodillos inclinados, la zona de contacto a lo largo de una generatriz se reduce ahora a prácticamente un punto. Al girar los rodillos, esta pequeña "isla" de contacto se desplaza, debido también a V_a , siguiendo un camino helicoidal.

Con este principio se han desarrollado varios tipos de rodillos dando lugar fundamentalmente a las laminadoras Mannesmann y Stiefel.

Una laminadora punzonadora ('piercing mill') de este tipo transforma un tocho macizo fundido o trabajado en caliente, de diámetro comprendido entre 50 y 350 mm (2 a 14"), en un tocho agujereado (hollow bloom) de un diámetro algo mayor, mediante dos rodillos y un mandril. Los rodillos tienen una forma abarriada y sus ejes están inclinados, como se vió previamente. En el centro del tocho se forma primero un agujero, antes que empiece a actuar el mandril. Este alisa luego la superficie interna y previene una rotura excesiva en el núcleo. En caso contrario pueden producirse slivers en la superficie interna del tubo. El espesor de pared es reducido luego por una acción de laminación entre el mandril y cada rodillo. En esta parte de la operación, el mandril y los dos rodillos forman esencialmente una laminadora trió y la pared del tubo representa a la chapa. Rodillos guías mantienen al tocho entre los rodillos de trabajo. En la laminadora tipo Mannesmann, los rodillos de trabajo están soportados en cada extremo, y esta laminadora se usa generalmente para el desbaste inicial. La laminadora Stiefel está equipada con rodillos soportados en voladizo. Se usan dos variedades de laminadoras Stiefel, una con rodillos de trabajo abarriados y la otra con rodillos en forma de disco. El último diseño permite el relaminado de los tubos a diámetros y a paredes menores que en las otras laminadoras. Los mandriles están muy tensionados en el proceso de punzonado y tienden a soldarse al material.



Laminadora Mannesmann

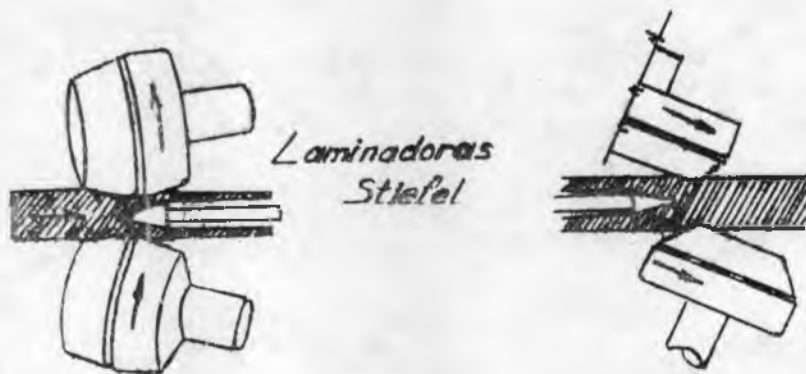


Figura 9.

1.5 LAMINADORA FORJADORA

Se usa para conformar piezas relativamente uniformes, tales como árboles, hojas de cuchillos, etc. Es muy adecuada para operaciones preliminares de forja que se completan luego en prensas y martinets. Se logran altas producciones. Es necesario un solo calentamiento.

Los rodillos contienen pasos de secciones variables sobre una parte de su circunsferencia, mientras que la porción restante es reducida a un diámetro tal que la parte forjada puede desplazarse libremente entre los rodillos. Esto se logra muchas veces mediante la colocación de sectores cilíndricos sobre los rodillos base.

Los rodillos forjadores rotan en dirección opuesta a la de una laminación común. La pieza es insertada en forma manual y es laminada hacia el operador como en el proceso del paso del peregrino.

1.6 LAMINADORA PLANETARIO.

Es una laminadora de concepción original diferente de los tipos ya vistos. Consta en esencia de varios rodillos de trabajo que giran alrededor de dos rodillos mayores que sirven de soporte. De esta manera es posible lograr en una pasada reducciones superiores al 90%.

Se usa para laminar fleje en caliente.

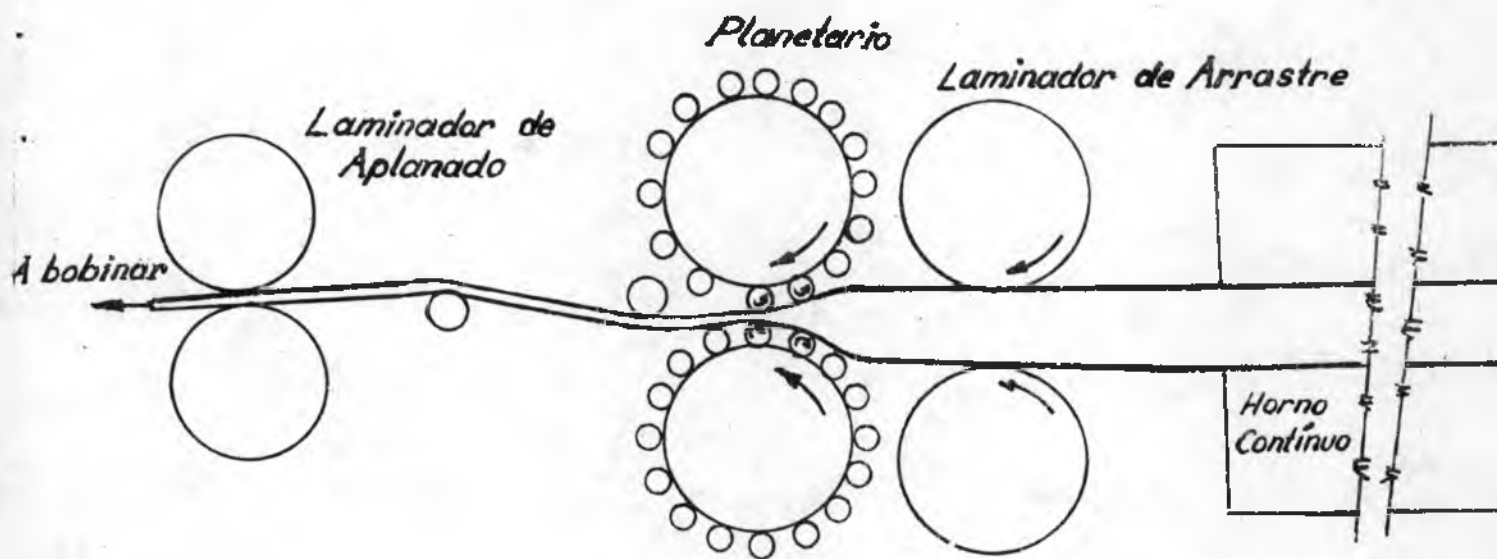


Figura 10

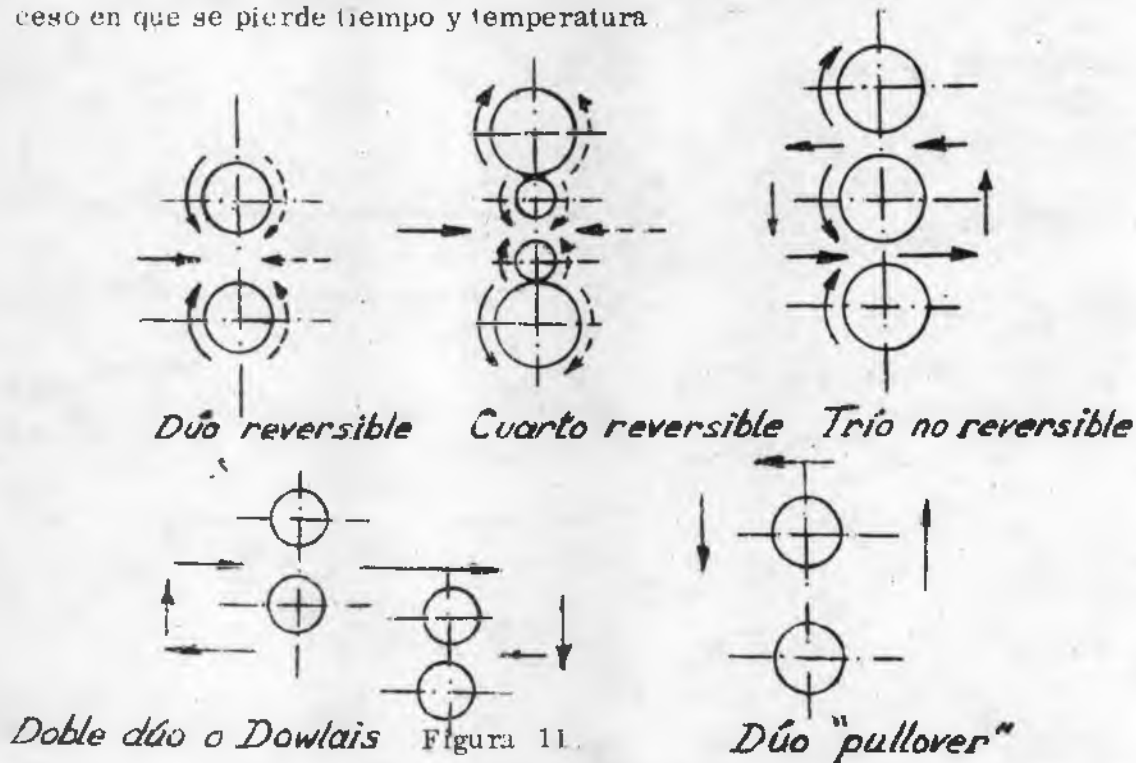
El conjunto consta de un horno de calentamiento continuo. Una vez comenzado el proceso no se detiene para evitar tiempos muertos. Cada chapa se suelda a la anterior. Al salir del horno la chapa pasa por un laminador de arrastre cuya función consiste en disminuir ligeramente el espesor de la chapa y fundamentalmente empujarla hacia el planetario. Este efectúa la reducción más importante en el proceso. Los rodillos de trabajo están perfectamente sincronizados los de arriba respecto de los inferiores. Su giro está dado durante el trabajo, por el arrastre de los rodillos de soporte. En la reducción intervienen varios rodillos pequeños. Existe además un laminador dúo de aplanado que tiene por misión mejorar el acabado del fleje que pasa luego a ser bobinado.

1.7. TRENES LAMINADORES.

- a) Caja. Un conjunto de rodillos montados en un par de alojamientos constituye una "caja". Las cajas pueden combinarse de distintas maneras para dar diferentes tipos de disposiciones, según las necesidades.

Una caja única puede ser dúo reversible, cuarto reversible, trío no reversible, doble dúo, dúo 'pullover'. Esto se ve en la figura 11. La laminadora trío permite pasadas en ambas direcciones con un motor continuo, mientras que las laminadoras dúo y cuarto requieren un motor con

inversión de marcha para lograr lo mismo. Ya se vió el porqué de las laminadoras cuarto. Una laminadora doble dúo (o Dowlais) usa dos pares de rodillos en una caja, situados en dos planos verticales paralelos distintos. El rodillo inferior de un par está más alto que el superior del otro par, permitiendo efectuar así pasadas en ambas direcciones con un motor continuo mediante una disposición adecuada de los engranajes. Una laminadora dúo "pullover" permite el uso de un motor continuo, pero el material es vuelto sobre el vértice del rodillo superior luego de cada pasada: es un proceso en que se pierde tiempo y temperatura.



b) Tren laminador Si se usan dos o más cajas, las mismas constituyen un tren laminador y pueden disponerse en distintas maneras, tal como se puede ver en la figura 12

- 1) Tren abierto. Las cajas que son accesibles por ambos lados son "cajas abiertas" y si éstas están puestas en línea una al lado de la otra y accionadas a través del mismo conjunto de engranajes, se dice que se tiene un "tren abierto" (figura 12 a.)
- 2) Tren "cross-country". Si las cajas están una al lado de la otra y la pieza a ser laminada es transferida de tabla a tabla, invirtiéndose la dirección de laminación en cada caja sucesiva, se dice que se tiene un laminador "cross-country" o en "zig-zag". (Ver figura 12 b.) Alternativamente, el material puede pasar a través de dos o más cajas en una dirección, luego después de un transporte, volver a través de un número similar. En cada uno de estos casos la pieza no está nunca en más de una caja al mismo tiempo y luego de cada transporte la parte final (cola) se hace frontal (cabeza) hasta el próximo transporte o transferencia. Cualquiera de estas cajas puede ser multipaso, tal como una caja dúo o trío reversible. El título de "cross-country" se aplica a menudo a cualquier disposición de cajas que hace uso de un esquema zigzagante de flujo en cualquier etapa entre las primeras y las últimas cajas.

- 3) Tren looping Cuando varias cajas están una al lado de la otra como en el primer laminador 'cross-country' descrito mas arriba y el material es looped de una caja a la otra resulta un tren de este tipo. Dado que las cajas adyacentes deben operar en sentido inverso, debe usarse el sistema motor de 'duo alternado' (fig. 12 c) o bien las cajas alternadas deben estar desplazadas ligeramente para formar otra linea que es accionada a traves de engranajes que giran en la dirección opuesta.

Otro accionamiento posible es el de la figura 12 d que permite variar las velocidades de las cajas (Esto último se puede aplicar tambien al tren 'cross-country'). En este tren el lado frontal del material permanece siempre tal y la pieza está en mas de una caja a la vez.

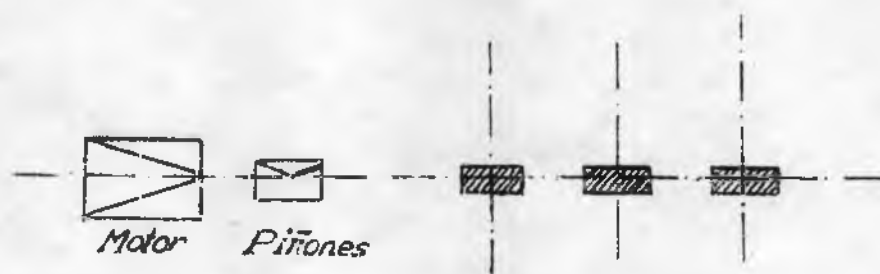
- 4) Tren continuo Consiste en una serie de cajas colocadas de manera tal que la pieza a laminarse entra a la primera pasada y viaja a traves del laminador tomando unicamente una pasada en cada caja.

Si las cajas estan ubicadas de manera tal que en alguna parte del tren la pieza está simultáneamente en una sola caja esta parte del tren es 'continua abierta' y si el material esta en dos o en más cajas a la vez esta parte del tren es 'continua cerrada'. Un tren looping puede incluirse tambien en la denominación de 'continuo'.

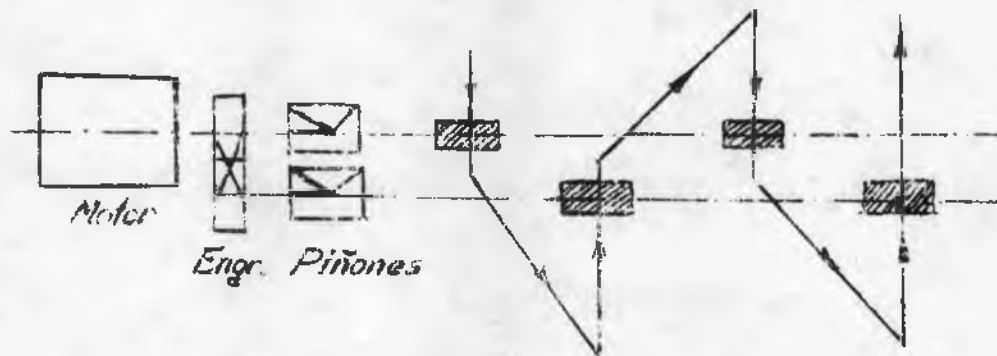
- 5) Tren semicontinuo Si una caja de desbaste multipaso o cualquier caja multipaso no continua precede a un tren continuo el resultado es un tren semicontinuo. Sin embargo el término es usado a veces para cualquier disposición de cajas que no es completamente continua pero que posee una parte que lo es.

- 6) Tren 'tandem' Es el término usado para dos o mas cajas en que una sigue a la otra en línea recta. Pueden ser duo, trío, cuarto, etc. y pueden ser multipaso. Si las cajas son de una sola pasada y la pieza a laminarse está simultáneamente en varias cajas el tren se denomina a menudo 'tandem continuo'.

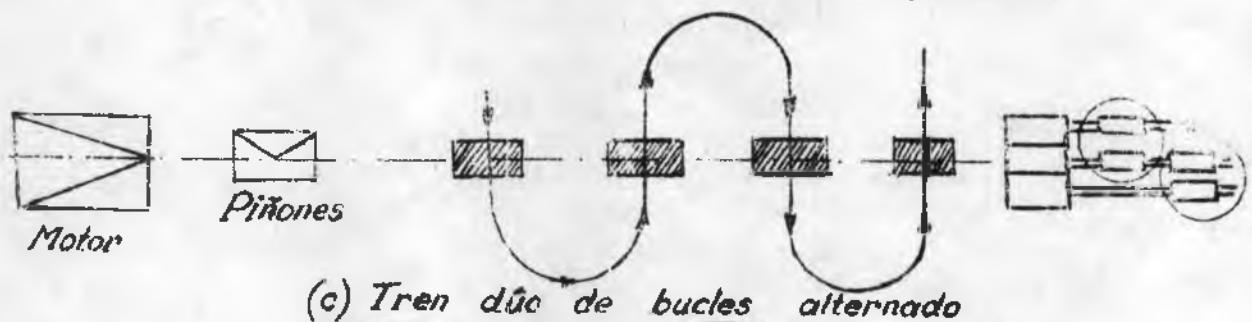
Los términos definidos más arriba son a veces ambiguos y un tren real puede tener partes de más de uno de los descriptos. Además las laminadoras pueden cambiar su rol cuando cambia el producto o sea para tamaños mayores un tren looping puede usarse como 'cross-country' colocándose mesas Y en lugar de las boquillas de looping.



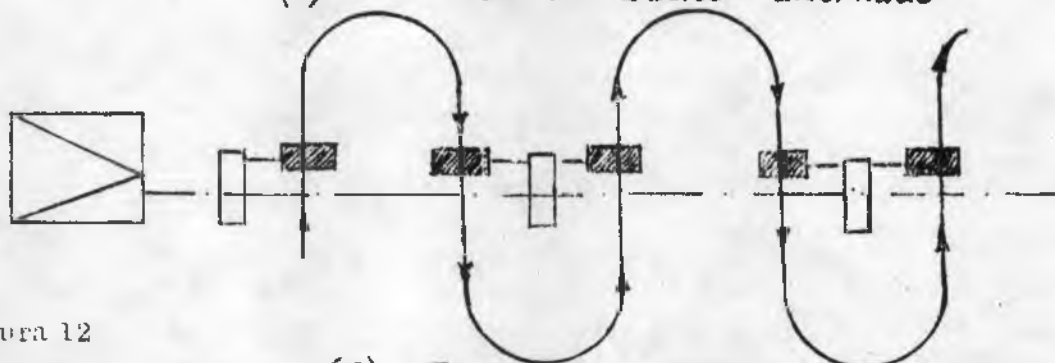
(a) *Tres cajas en tren abierto*



(b) *Cuatro cajas Cross-Country "Split Drive"*



(c) *Tren dño de bucles alternado*



(d) *Tren dño de bucles con transmisiones intermedias*

Figura 12

1 FORJADO

Es el término general que se usa para describir los procesos en caliente y en frío llevados a cabo en martinets, prensas y máquinas forjadoras. La fuerza primaria es de compresión. Esta se puede aplicar en forma localizada, de manera tal que las diferentes partes de la pieza sean trabajadas progresivamente en matrices abiertas, o bien sobre toda la superficie mediante matrices cerradas.

Cuando se usa este proceso a los efectos de obtener las propiedades mecánicas correspondientes al trabajado en caliente, es necesario entregar una cierta cantidad de trabajo para romper la estructura de colada. Por esta razón, el material de partida para el forjado de piezas es generalmente un material que ha sido previamente trabajado en caliente y la operación de forja se usa sólo para conformar la pieza. Cuando se usa material de colada para la forja, éste debe deformarse previamente para romper la estructura y luego se lleva a la forma deseada.

2.1 MATRIZ ABIERTA Y CERRADA.

A) Forja con matriz abierta. Es el procedimiento de forja más antiguo. Se usa para:

- 1) Series pequeñas
- 2) Mejorar la resistencia mecánica.
- 3) Obtener una forma más aproximada a la final.
- 4) Preparar billets, placas, exágonos, etc.
- 5) Conformado de piezas artísticas

Con este tipo de forja el flujo del material no está restringido. En la figura 13 se pueden ver algunos ejemplos.

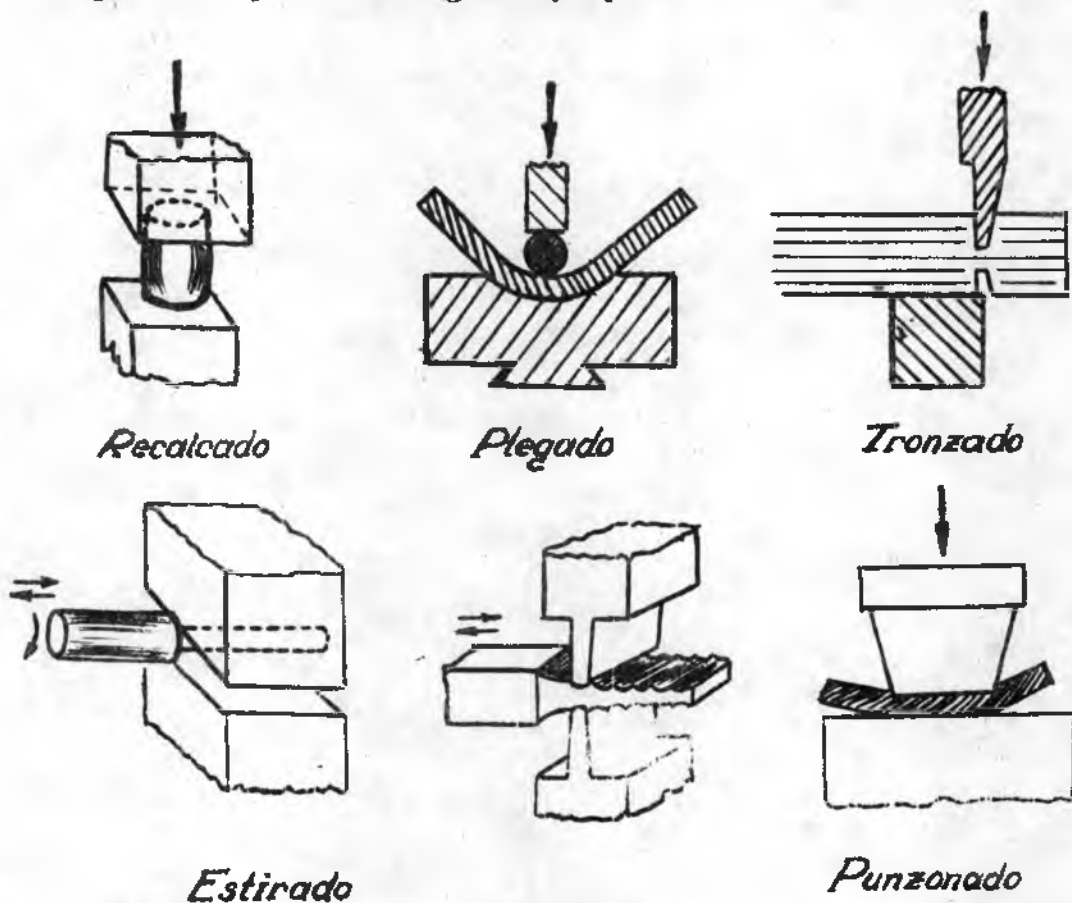


Figura 13

- B) Forja con matriz cerrada Mediante esta operación se deforma plásticamente al material obligándolo a fluir en matrices cerradas o estampas. Estas deben tener impresa la forma que se desea dar al material y deben permitir además una fácil extracción de la pieza elaborada, por lo cual suelen ser de dos piezas

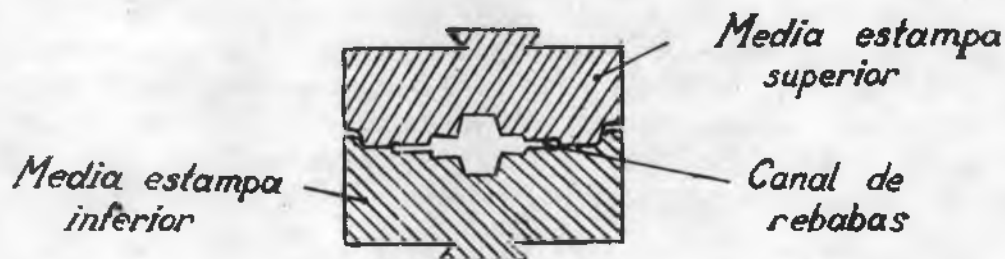


Figura 14

La hoja con matriz cerrada se usa para grandes series y para obtener piezas más exactas. En la etapa final, cuando el material en exceso fluye para llenar los canales de rebabas, la presión aumenta mucho, por lo cual se consigue un buen llenado de la cavidad de la estampa.

Muchas veces son necesarias operaciones previas que pueden realizarse en matrices abiertas generales (planas) o bien en matrices específicas. Existen al respecto dos criterios: el norteamericano y el europeo. En el primero, se ubican en el mismo bloque las matrices para efectuar todas las operaciones, con la estampa final ubicada en el centro. Se consigue así mayores producciones, aunque las máquinas deben ser más robustas para soportar los esfuerzos laterales y las matrices se desgastan más rápidamente. Según el criterio europeo, en cada bloque y por ende en cada máquina, se realiza una sola operación.

2.2. EQUIPO DE FORJA .

Pueden ser del tipo de martinete o prensas. En la figura 15 se ilustra el esquema de funcionamiento de estas máquinas.

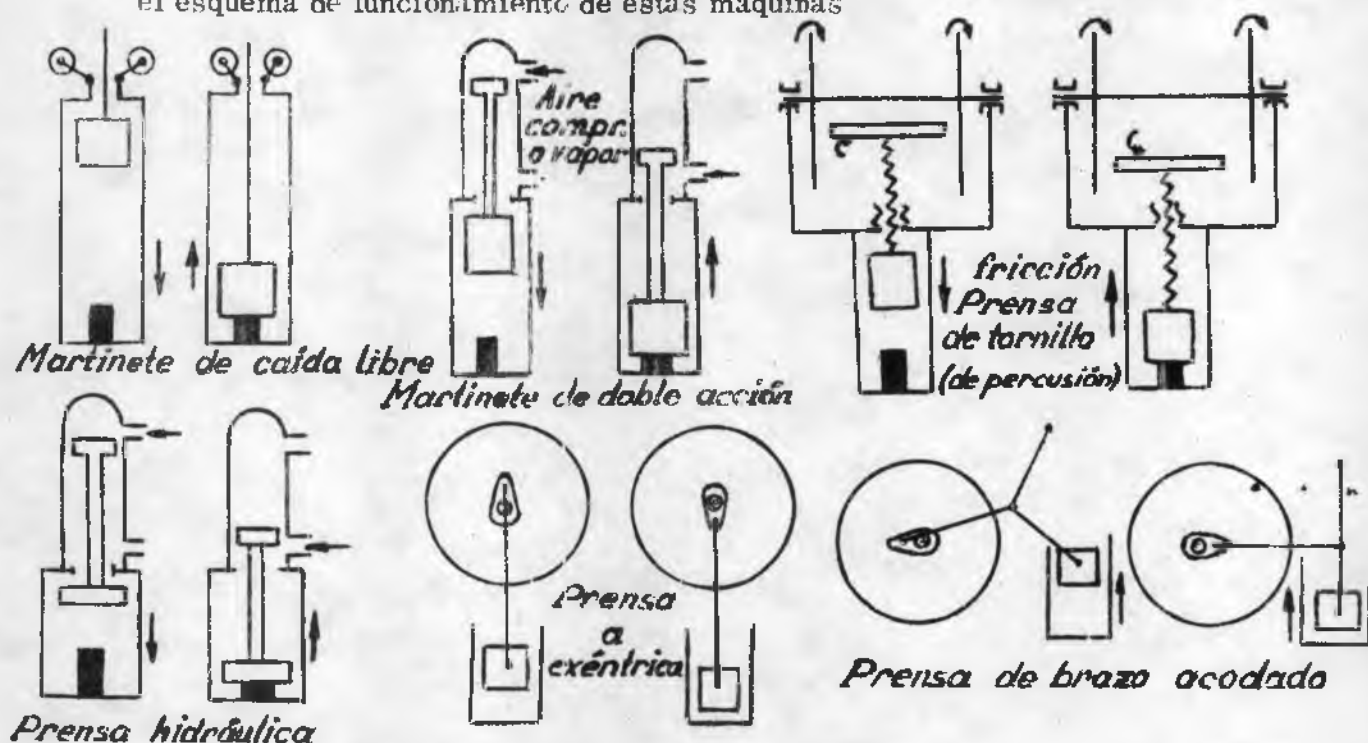


Figura 15

En los martinets la fuerza y la energía necesarias para realizar la forja son suministradas por la caída de un gran peso o maza. Hay dos tipos diferentes de martinets: de caída libre y de doble acción.

En los martinets de caída libre el peso cae por acción de la gravedad sin restricciones desde una cierta altura. Las diferencias fundamentales están dadas por el dispositivo empleado para levantar la maza. El trabajo entregado por golpe es $W = P \cdot h$.

En los martinets de doble acción la velocidad del peso que cae es aumentada por medio de vapor de agua o de aire comprimido. El trabajo entregado en cada golpe es en este caso

$$W = \frac{Pv^2}{2g}$$

Las prensas de forja son accionadas por dispositivos hidráulicos o mecánicos. Las prensas verticales hidráulicas, con el cilindro en su parte superior, son especialmente adecuadas para trabajo pesado y para aleaciones sensibles, tales como algunas de acero y de magnesio. Es el único tipo de prensa que suministre una presión uniforme y una velocidad de deformación casi constante. Sin embargo, esta velocidad es usualmente menor al principio del trabajo y mayor al final que la de las prensas mecánicas.

Las prensas operadas en forma mecánica se usan para todo el rango de forjado de piezas de tamaño medio y pequeño. La potencia es suministrada por un volante y transferida al material mediante dispositivos del tipo señalado en la figura 15.

Existen además máquinas forjadoras, que son prensas horizontales utilizadas para grandes producciones de piezas recaladas.

En el martinete se pueden conformar la mayor variedad de formas y tamaños de piezas forjadas. Es posible girar la pieza entre golpes sucesivos, colocarlas en diferentes cavidades y cortar la forma final con pequeña pérdida de material. La mayor luz existente entre la maza y el yunque es particularmente adecuada para este tipo de trabajo. La rotura de la estructura de colada de algunos especiales y el preformado de piezas estampadas de muchos metales se efectúa usualmente en martinets.

Las prensas hidráulicas y las máquinas de forja se están haciendo cada vez más populares para el trabajado con matrices cerradas. La industria actual requiere tolerancias estrechas en un esfuerzo para reducir las operaciones de acabado. Una construcción maciza con basidor doble y la maza en el centro reduce la deformación elástica de la prensa a un mínimo y un guiado cuidadoso y el centrado de la matriz disminuye el corrimiento de las dos mitades.

Existen algunos hechos en la operación de diferentes equipos de forja que deben considerarse cuando se trabajan materiales difíciles de forja. El límite superior del rango de temperaturas está determinado por la curva de solidus de la aleación. Cuando se alcanza este valor la pieza generalmente se rompe, especialmente cuando se trabaja con matrices abiertas. La potencia consumida durante el forjado se convierte en calor, y este calor o bien aumenta la temperatura de la pieza o es transmitido principalmente a través de las herramientas. En una prensa hidráulica de acción lenta, el calor es extraído más rápidamente que en un martinete donde las matrices más frías están en contacto con la pieza durante un tiempo menor. Por lo tanto, la temperatura de precalentamiento del material debe ser mayor para prensas que para martinetes. Con respecto al límite inferior del rango de forjado, la mayoría de los metales pueden ser trabajados a velocidad lenta hasta temperaturas comparativamente bajas, pero esto no es necesariamente cierto para una velocidad elevada, dado que la tendencia a endurecer y a fragilizarse aumenta con el incremento de la velocidad de deformación. Por lo tanto los materiales que tienen un rango estrecho de temperaturas de forja, tales como las aleaciones de Mg, deben deformarse a velocidad baja y uniforme, o sea, con prensas hidráulicas. Sin embargo, el endurecimiento puede tener ciertas ventajas como, por ejemplo la estructura de los granos de aleaciones de Al desarrolladas de esta manera que es usualmente más fina que la producida mediante velocidades de deformación bajas.

Otra característica asociada con los golpes de martinetes y las prensas de percusión (de fricción) es la localización de la deformación. La energía de impacto de un golpe no es consumida sólo por la deformación plástica, sino también en la aceleración de la masa de metal adyacente al pilón y en la deformación elástica del bastidor del martinete y fundaciones. El golpe transfiere por lo tanto más energía a la parte que entra primero en contacto con la maza que al resto de la pieza. En consecuencia, los golpes suaves sólo trabajan a las partes superficiales mientras que el núcleo puede no ser afectado.

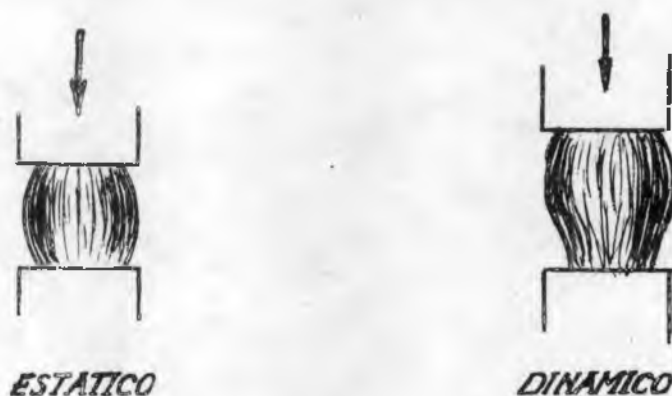


Figura 16

Las propiedades mecánicas de las piezas forjadas dependen principalmente de dos factores:

- 1) Propiedades del material
- 2) Dirección y magnitud de la deformación impuesta.

El forjado produce una estructura fibrosa en el material debido a que las inclusiones son alineadas en la dirección del flujo. Dado que las propiedades mecánicas varían según la dirección de la fibra, debe cuidarse de que la fibra sea paralela a las máximas tensiones que deberá soportar la pieza. Un ejemplo típico es un disco para engranaje mostrado en la figura 17. Cuando éste se forja como se indica en la parte a), la fibra en la zona donde serán maquinados los dientes es perpendicular a la carga. Esto da por resultado una zona muy débil en la base del diente, que es la parte más tensionada. Si, en cambio, el material de partida es primero recalcado como se muestra en la parte b), la fibra estará en la dirección correcta para soportar la carga y resultará así un engranaje más resistente.

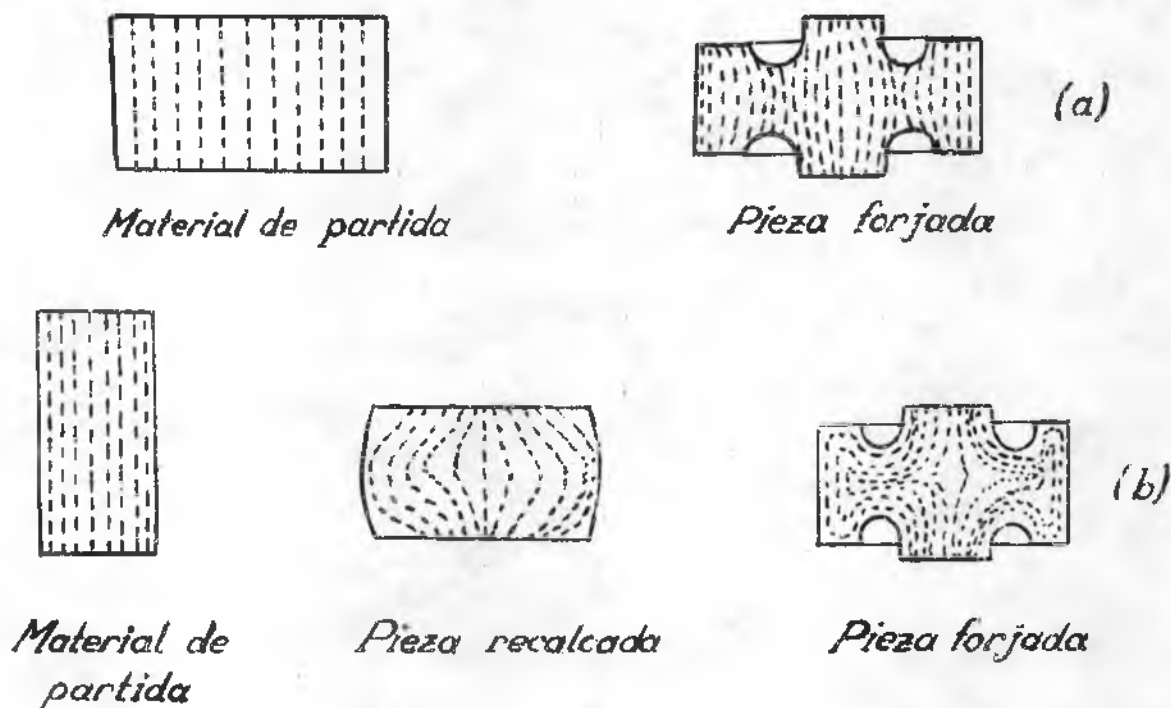


Figura 17

Sin embargo, no es conveniente exagerar la deformación producida en el recalado por cuanto en las operaciones de forja si bien se mejoran las propiedades mecánicas en la dirección del flujo del material, se empeoran en dirección transversal al mismo.

En cuanto a los defectos que pueden aparecer en el forjado de piezas ya se ha tratado este tema al analizar los procesos de conformado en forma general.

2 4 SWAGING Y FORJADO ROTATORIO

Es otro proceso de deformación del tipo de compresión directa (Ver figura 18) Una barra redonda es martillada en dos matrices que contienen canales casi semicirculares y la barra es girada en forma continua para mantener la sección circular mientras se reduce el diámetro. Las forjadoras rotatorias ("istany swagers") consisten en dos y a veces cuatro matrices. Han sido desarrolladas para reducir barras largas y alambre. Las matrices forman un canal cilíndrico y se abren y cierran rápidamente. Las matrices están insertadas en un dispositivo giratorio y mantenidas entre un par de bloques de acero. Una cantidad de rodillos de acero contenidos en un alojamiento circular proveen la presión necesaria para forjar el metal a través de las matrices cuando éstas y los rodillos están en contacto. Este proceso se usa también para afinar tubos y alambres.

El swaging introduce una deformación beneficiosa en el metal y se usa, por lo tanto en caliente o en frío, para el conformado de metales difíciles tales como W, Mo y Ta, y también alambres bimetálicos recubiertos con metales preciosos. La deformación en cada golpe de una forjadora rotatoria es pequeña y por lo tanto en el swaging en frío la superficie es considerablemente más endurecida que el núcleo.

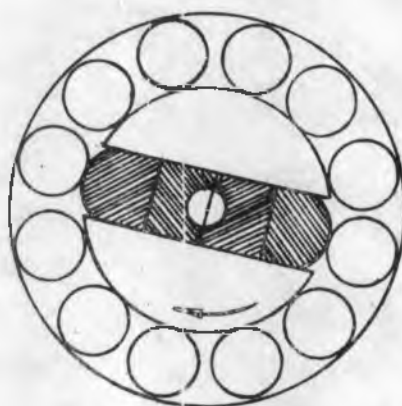


Figura 18

2 5 FORJADO EN FRÍO

El forjado en frío se puede realizar con dos finalidades distintas, que son:

- a) Acuñado Es la operación de acabado y calibrado de piezas previamente forjadas en caliente. Es un método conocido ya desde la antigüedad para la elaboración de monedas y de otros objetos. El avance tecnológico ha hecho posible utilizar esta operación para piezas de acero.

La ventaja del acuíado consiste en el acabado superficial de las piezas y en la precisión dimensional. Para ello es necesario un buen acabado de las matrices con que se realiza la operación.

Las grandes presiones puestas en juego (del orden de 200 kg/mm^2 en los aceros), obligan a elegir cuidadosamente los materiales con que se construyen las matrices. Conviene además, para esta operación, aquellas prensas que desarrollan su máxima fuerza al final de la carrera.

- b) Recalcado. Consiste en forzar al metal frío a fluir en el interior de matrices especiales a los efectos de obtener secciones más gruesas de formas variadas. Es una operación que se realiza en máquinas especiales, casi siempre horizontales.

Se usa para elaborar cabezas de clavos, remaches, tornillos, etc. Cuando la relación entre longitud y diámetro de material a recalcar supera cierto valor, la operación debe realizarse en dos o más etapas, para evitar el pandeo de la parte a recalcar, con lo cual se obtendría una pieza defectuosa.

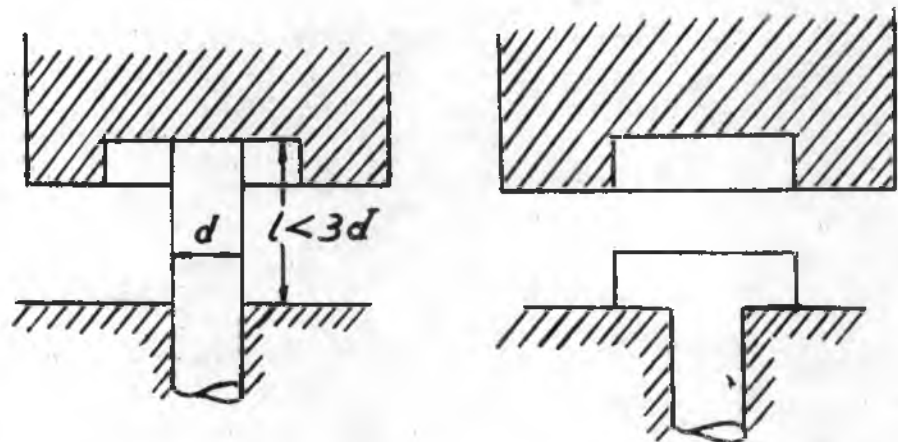


Figura 19

3. EXTRUSION.

Es un proceso de compresión directa en el cual se reduce la sección transversal de un bloque metálico haciéndolo fluir a través del orificio de una matriz mediante una presión elevada.

La extrusión es uno de los métodos de trabajado plástico más recientes cuya importancia va en continuo aumento. Permite obtener barras de secciones simples o complicadas, constantes o variables, macizas o huecas. Se adapta muy bien a grandes producciones. El estado de tensiones inducido en el metal es excelente, como se ha visto en el capítulo de clasificación de proceso. Uno de los inconvenientes más graves que enfrenta este proceso

es la magnitud de las presiones puestas en juego. Ello restringe un poco su campo de aplicabilidad a las aleaciones livianas, tales como las de aluminio aunque es factible actualmente extrudir acero con técnicas especiales.

La extrusión puede usarse como operación primaria o de desbaste, para romper la estructura de colada, o bien como operación secundaria o de acabado.

3.1 EXTRUSION DIRECTA E INVERSA

Existen dos tipos básicos de extrusión: la directa y la inversa, esquematizadas en la figura 20.

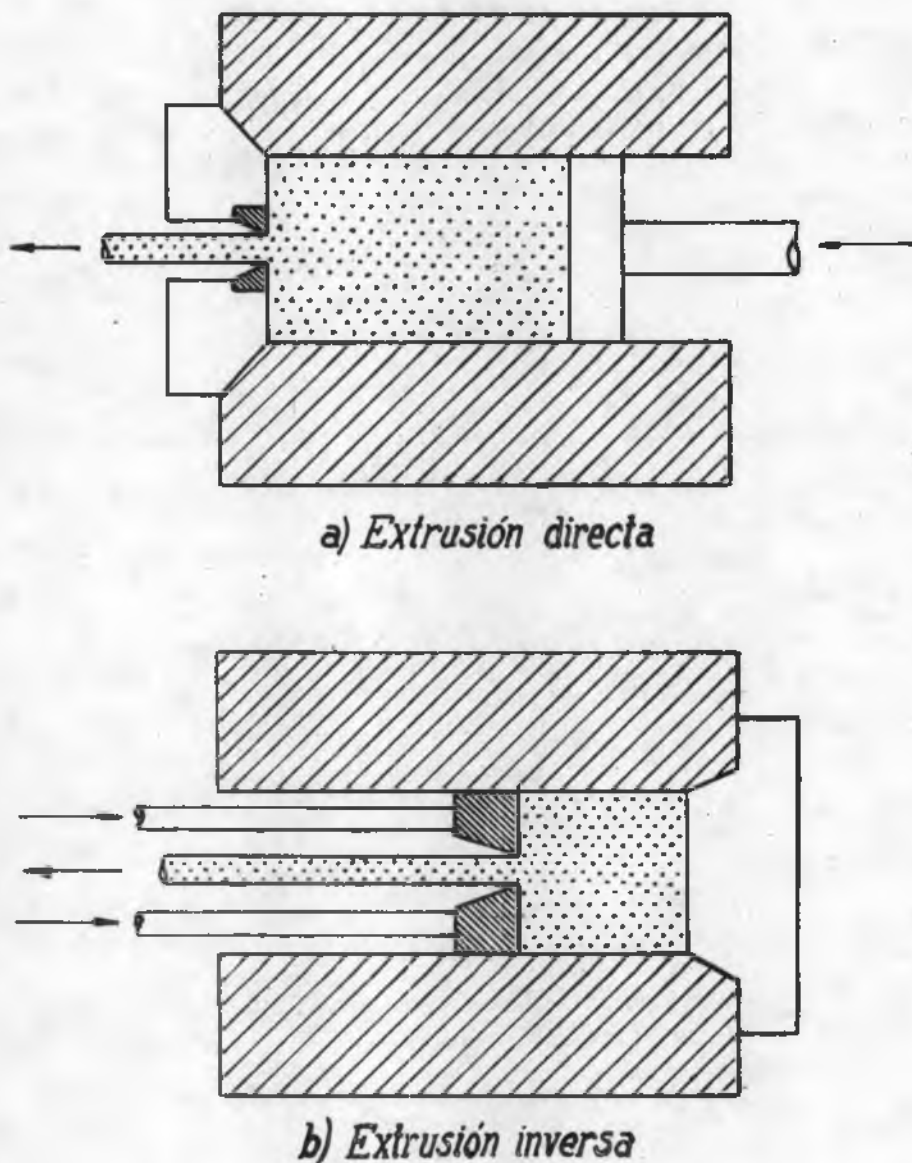


Figura 20

En la extrusión directa, se coloca el tocho, lingote o palanquilla en el cilindro y se empuja contra la matriz por medio de un pistón. Se coloca una placa entre el pistón y el material. Esta placa puede intercambiarse en las sucesivas operaciones, a los efectos de evitar un calentamiento excesivo del pistón. A veces tiene un diámetro ligeramente menor que el del cilindro con lo que la capa externa del tocho que puede estar oxidada, no se extrude. El flujo del material extrudado tiene el mismo sentido que el movimiento del pistón.

En la extrusión inversa, el flujo del material extrudado tiene sentido opuesto al del pistón, como se ilustra en la figura 20 b. Dado que no existe movimiento entre el tocho y el cilindro, se anulan las fuerzas de fricción que por este motivo se desarrollan en la extrusión directa. Con ello se obtienen presiones de extrusión menores pero a costa de una complicación mecánica. Además, este tipo de extrusión no se adapta para piezas de gran longitud, dado que esta dimensión está limitada por la longitud del pistón hueco.

En la figura 21 se puede ver la variación de la presión ejercida por el pistón durante la extrusión, en función de la carrera del mismo.

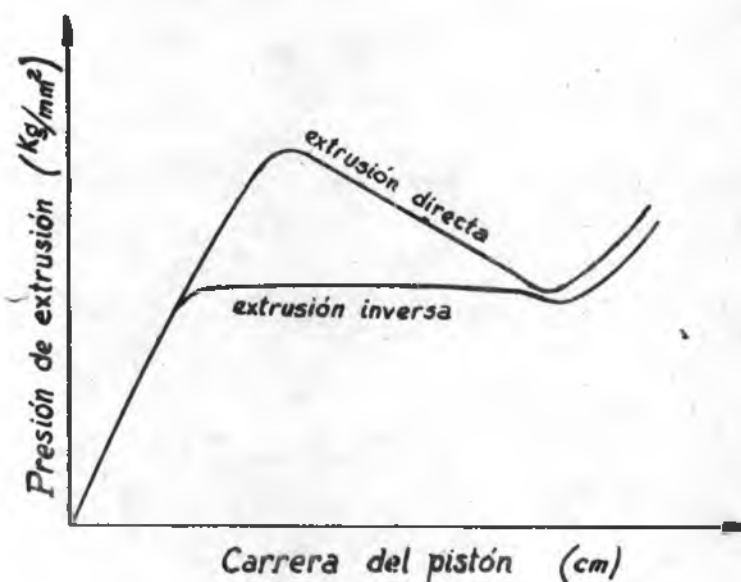


Figura 21

Existe una primera etapa de recalcado en la cual el material llena todo el recipiente y luego se produce el flujo estacionario de metal extrudado. La disminución de presión que se observa en la extrusión directa durante esta etapa se debe a que disminuyen las fuerzas de roce a medida que la superficie de contacto entre tocho y cilindro va siendo cada vez menor. A continuación se produce una caída en la presión, debido a que en el centro del

material se produce una cavidad, con lo que la superficie sobre la que se efectúa la presión es menor. Debe destacarse que la presión que se grafica es la que se obtiene dividiendo la fuerza ejercida por la superficie del pistón). Por último se produce un brusco aumento en la presión, dado que el resto del material que queda en el cilindro no puede fluir a través del orificio de la matriz y es recalcado entre la placa que soporta la matriz y el pistón.

Para perfiles simples se pueden usar matrices cuadradas (figura 22 a.) o cónicas (figura 22 b.). En estas últimas, el flujo del material es más homogéneo, por lo cual el trabajo redundante es menor. Pero aumenta el trabajo disipado por fricción entre el material y las paredes del cilindro o de la matriz. En las matrices cuadradas, se forma una zona de material que no extruda, conocida como metal muerto.

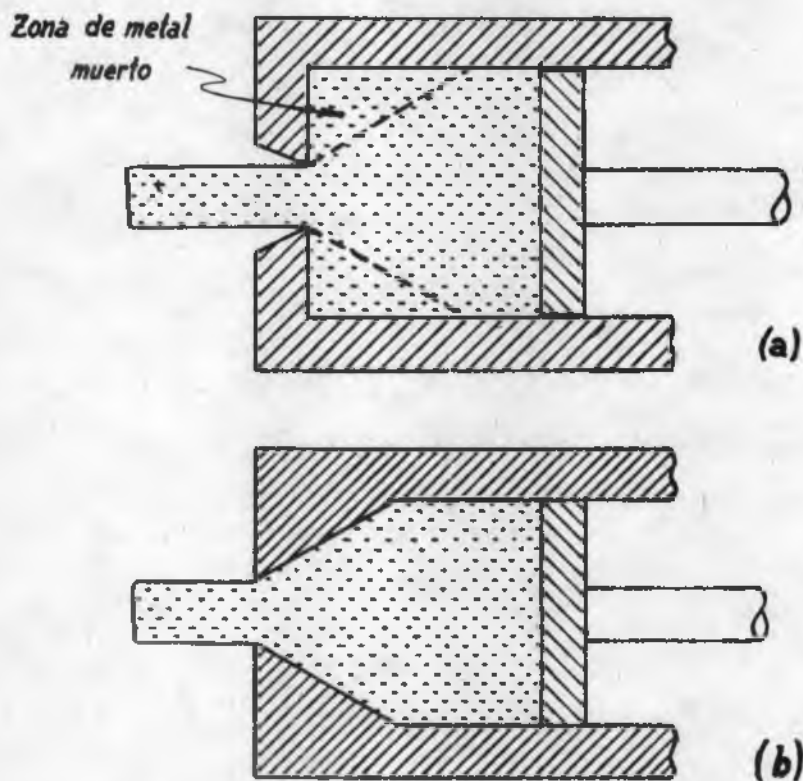


Figura 22.

En la práctica industrial, se usan matrices cuadradas, sobre todo para perfiles complejos, por la mayor facilidad en el maquinado de las mismas.

Para la elaboración de piezas huecas se usan matrices como la que se esquematiza en la figura 23. A lo largo de la matriz la sección va disminuyendo, lo que permite que el material, debido a la temperatura a que se

encuentra sueldo. El mismo principio se usa para el recubrimiento con plomo de cables para conductores.

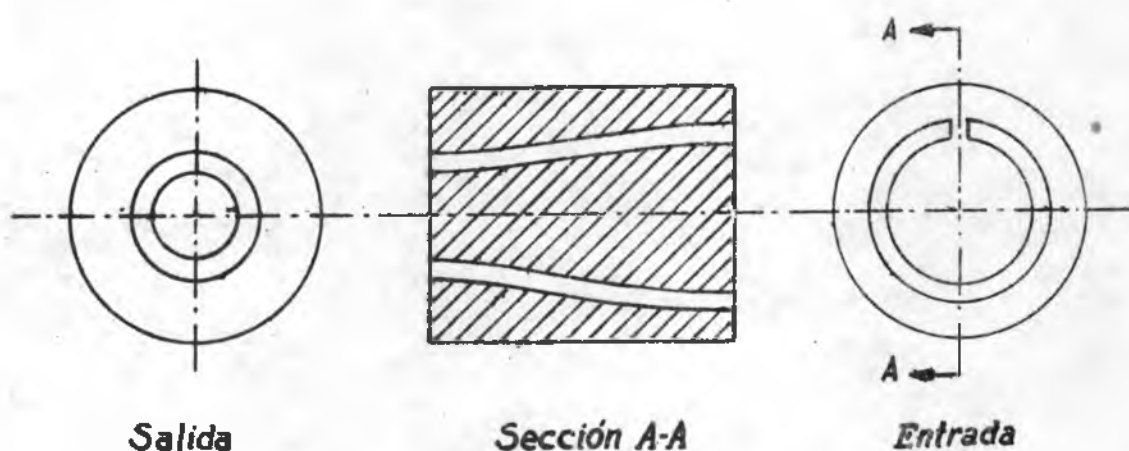


Figura 23

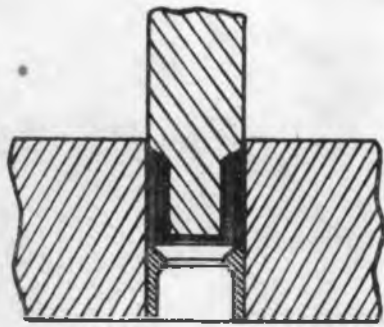
Hace pocos años se hizo factible la extrusión del acero mediante el uso de vidrio molido como lubricante. Esta técnica se conoce como proceso Ugine - Sejournet.

3.2 EXTRUSION POR IMPACTO

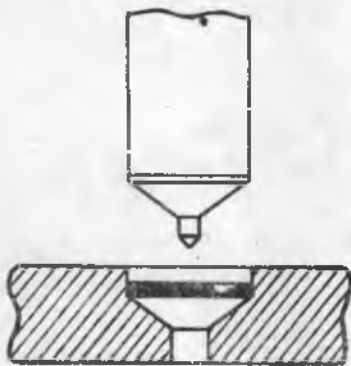
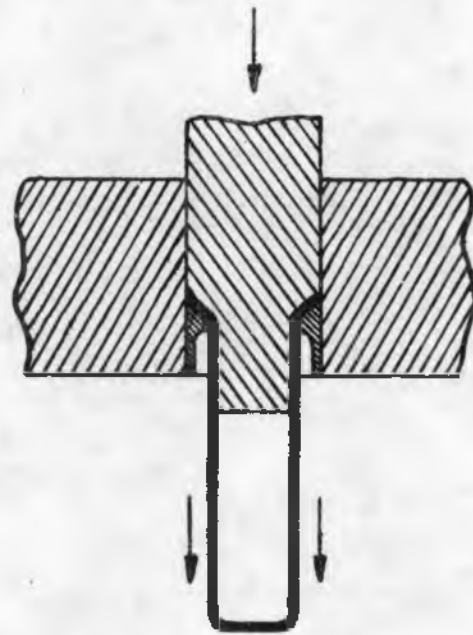
Es un proceso utilizado para la fabricación de piezas huecas de pequeña longitud y de poco espesor de pared. Consiste en colocar en una matriz adecuada un disco de metal (puede ser una pieza de forma) cuyo volumen sea igual al del tubo que se va a obtener. La operación se realiza en un solo golpe de la máquina y a velocidad elevada. Es por ello que si bien se trabaja a temperatura ambiente - que para algunos de los metales empleados en este proceso puede estar por debajo de la de recristalización - es difícil determinar si el trabajo es efectuado realmente en frío, dado que el proceso es prácticamente adiabático.

Existen dos tipos de extrusión por impacto:

Directa (proceso Hooker) e inversa. Se esquematizan en la figura 24.



a) *Extrusión directa*
Proceso Hooker



b) *Extrusión inversa*

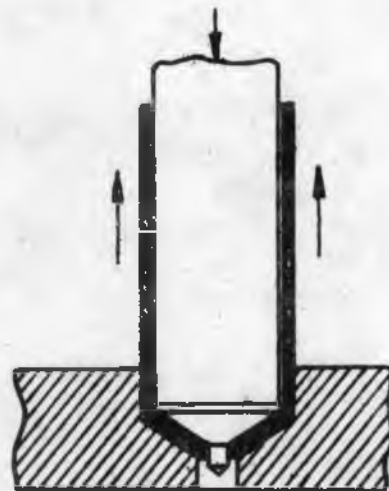


Figura 24.

La extrusión por impacto se usa principalmente para metales blandos tales como plomo, estaño, zinc, aluminio. El proceso Hooker se adapta mejor para metales que poseen un buen grado de ductilidad y que endurecen por deformación. Es muy usado en cobre, latón 70/30 y aluminio.

4. TREFILACION.

Es un proceso de conformado, por compresión indirecta en que el metal es forzado a fluir a través de una matriz cónica mediante una fuerza de tracción aplicada en el lado de salida.

Se usa para estirar y reducir de diámetro barras, alambres y tubos.

4.1. LA TREFILA.

Es la matriz a través de la cual fluye el metal. Una trefila para alambre consta de cuatro zonas, que se esquematizan en la figura 25.

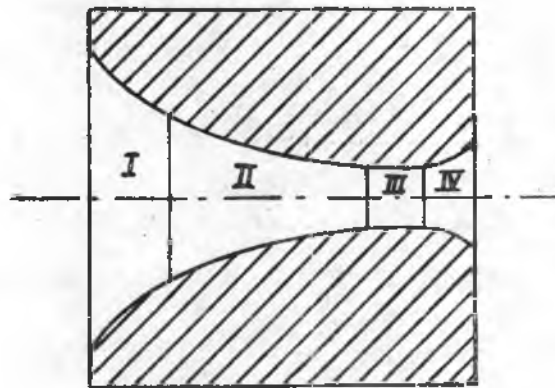


Figura 25.

Zona I: Embudo de entrada. Tiene por objeto evitar la presencia de aristas vivas, en las que podría clavarse el alambre. Puede estar pulido, aunque ello no es importante.

Zona II: Cono de trabajo. Es la zona de la trefila en la que se produce realmente la deformación. Su pulido es muy importante. El ángulo del cono de trabajo es muy importante. Un ángulo muy pequeño disminuye el trabajo redundante, al guiar mejor al material, pero aumenta la longitud de contacto entre matriz y metal, por lo que las fuerzas de roce se incrementan. Se debe llegar entonces a una solución de compromiso. La longitud del cono de trabajo es siempre mayor que la mínima necesaria.

Zona III: Portada o zona cilíndrica. Es para calibrar el diámetro del alambre. No conviene que su longitud sobrepase a la mitad del diámetro de salida.

Zona IV: Cono de salida. Su objeto es evitar tensiones sobre la superficie posterior de la matriz.

Las trefilas se pueden construir con aceros aleados altos en carbono templados y revenidos, con aleaciones sintetizadas de carburos metálicos, o con diamante.

4 2 TREFILACION DE BARRAS Y ALAMBRES.

Las barras tubos y secciones grandes en general, que no pueden enrollarse se trefilan en bancos de trefilado. (ver figura 26). Un banco de trefilado consiste en un cabezal móvil accionado por una cadena, montado en un banco horizontal o ligeramente inclinado, y un soporte para la matriz. Puede tener entre 10 y 25 metros de longitud y alcanza velocidades de desplazamiento del cabezal móvil del orden de los 100 metros por minuto. Debe evitarse la aplicación brusca de la carga lo que limita las velocidades máximas tolerables, a menos que éstas sean variables.

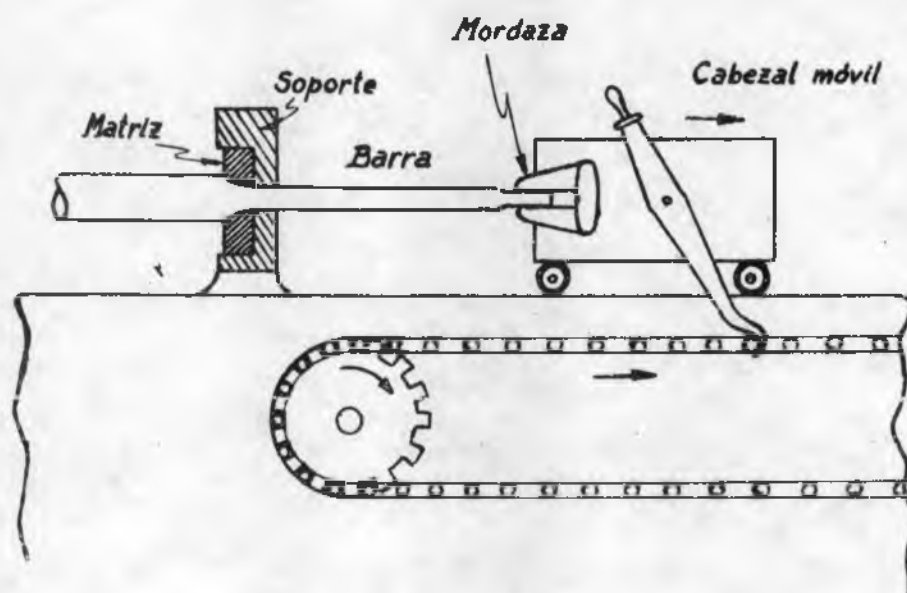


Figura 26

La longitud de la barra final está limitada por la del banco. Dado que durante el trefilado la barra se alarga, son necesarios cortes intermedios. Debe agregarse uno de los extremos para introducirlo a través de la matriz y poder sujetarlo con las mordazas. Esta es una operación general en todos los casos de trefilado. Se puede efectuar mediante forjado rotatorio con eliminación de material con lima o máquina herramienta, con martillado en el caso de alambres, por un proceso electroquímico, o introduciendo el material a presión en la matriz.

El trefilado de alambre es en esencia el mismo proceso que el de barras. El equipo es diferente, debido a que el alambre puede enrollarse con

lo que se obtienen longitudes mucho mayores. Cuanto más larga es la bobina más económico resulta el proceso, dado que se evita la operación de afinado e introducción de la punta, que es bastante laboriosa. Es por ello que el proceso se hace continuo, soldando los extremos de los rollos de alambre antes de pasarlos por la trafiladora.

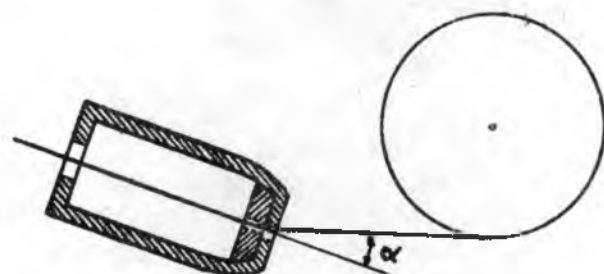


Figura 27

En la figura 27 se esquematiza una disposición típica de un banco de trefilado para alambre. La matriz está montada sobre un portamatriz que al mismo tiempo contiene al lubricante. El ángulo α señalado en la figura entre el eje de la trefila y la dirección del alambre a la salida, se debe a que de esta manera se facilita el enrollamiento del alambre trefilado sobre el tambor.

Un banco de trefilado para alambre puede ser múltiple o en cascada. En este caso, en el mismo se ubican una serie de trefilas sucesivas por las que pasa el alambre hasta enrollarse después de la última pasada. En este caso, entre una trefila y otra se ubica un tambor sobre el cual el alambre se enrolla únicamente lo suficiente para que se pueda efectuar por roce la fuerza de tracción necesaria. La producción de estos bancos múltiples es muy grande. Debe controlarse con precisión la velocidad de los tambores intermedios.

Como lubricantes para el trefilado se suelen usar aceites solubles, soluciones de jabones, jabón en polvo, etc. Para mejorar la adherencia del lubricante a la superficie del alambre, se recurre a diversos procedimientos, consistentes fundamentalmente en evitar una superficie demasiado lisa. Un procedimiento muy usado es el "encalado" del alambre, que consiste en recubrirlo con una capa de óxido de calcio, obtenida por inmersión en un baño adecuado. También se recurre al cobreado, a la oxidación y a la fosfatación.

Las reducciones por pasada que se pueden lograr en un proceso de trefilado están dadas por la resistencia a la tracción del material a la salida de la trefila.

4.3. TREFILACION DE TUBOS

Es por lo general una operación de acabado en frío de tubos previamente elaborados en caliente por alguno de los métodos que se analizan en el próximo capítulo. La trefilación en frío de tubos se efectúa para obtener tolerancias dimensionales más estrechas para aumentar la resistencia mecánica para obtener tubos de paredes más delgadas o de diámetros menores que los obtenibles por trabajado en caliente y para producir tubos de formas irregulares o de secciones variables.

La trefilación de tubos es esencialmente el mismo proceso que la de barras y alambres. Los equipos empleados son semejantes. La diferencia radica en el hecho de que en la mayor parte de los casos se agrega un mandril en el interior de los tubos a los efectos de controlar las dimensiones y el acabado de la parte interna de los mismos.

El mandril puede ser fijo o móvil. En el primer caso puede estar sostenido por una barra larga sujeta al banco de trefilado, o bien ser flotante. En este último caso retiene automáticamente su posición durante la operación de trefilado. Un mandril móvil puede estar formado por una barra larga que es empujada simultáneamente con el tubo a través de la matriz, o bien ser un punzón en una operación análoga al embutido profundo.

El trefilado de tubos se puede efectuar también sin mandril, en una operación que se conoce como 'sinking'. En este caso el espesor de pared, que no está controlado en la parte interna, puede aumentar o disminuir según las condiciones en que se realice el proceso. Este tipo de trefilación se utiliza generalmente en tubos cortos.

En la figura 18 se esquematizan algunas de las operaciones de trefilado de tubos.

6. ESTAMPADO PROFUNDO ("Deep "drawing")

Es una operación mediante la cual se hace adoptar a una chapa metálica una forma tridimensional, sin provocar en la misma un cambio significativo de espesor.

La última parte de la definición anterior diferencia al estampado profundo del estirado de chapas ('sheet stretching'). Con este último proceso

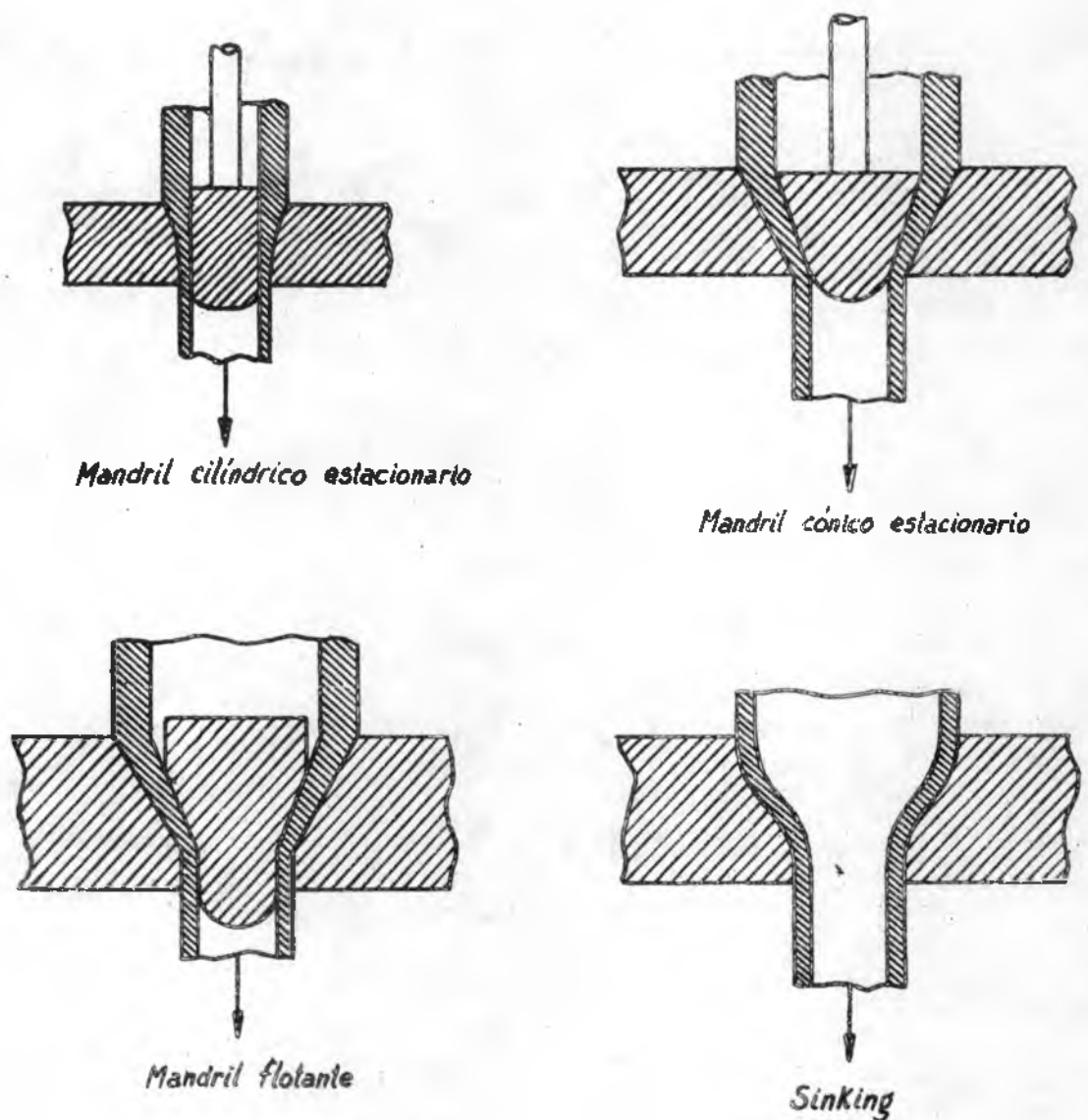


Figura 28

se pueden obtener también formas tridimensionales sometiendo a la chapa a tracción, con una consiguiente disminución de espesor. En última instancia la diferencia entre ambas operaciones está dada por el estado de tensiones actuantes. Mientras que el estirado es una operación de tracción, el estampado profundo o embutido es un proceso de compresión indirecta, como ya se puntualizó en el capítulo referente a la clasificación de los procesos.

En la figura 29 se puede ver esquemáticamente la diferencia entre ambos procesos

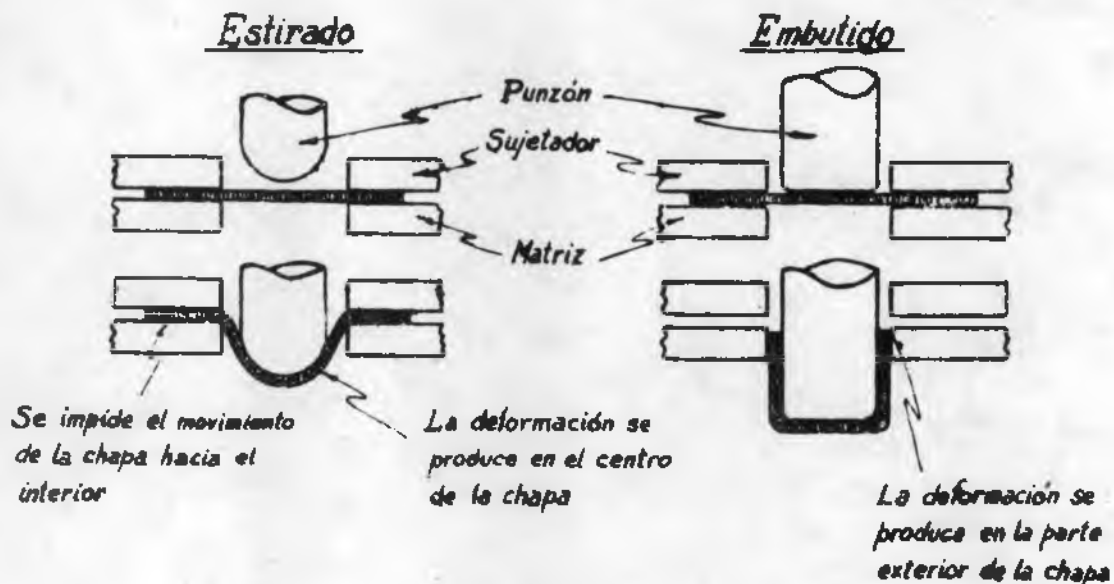


Figura 29

En la práctica industrial resulta difícil controlar las condiciones de trabajo para obtener solamente embutido o estirado. Lo usual es que aparezcan en forma conjunta, predominando uno u otro.

6.1 MATRICES PARA ESTAMPADO.

Constan normalmente de los siguientes elementos:

- a) Punzón
 - b) Matriz o aro de embutir
 - c) Sujetador de la chapa
 - d) Extractor
- a) Punzón. Es el que obliga a la chapa a pasar a través de la matriz. Su forma debe adaptarse a la del recipiente que se desea elaborar. En el caso del estampado de un casquillo, por ejemplo, el punzón es de sección circular con fondo plano o redondeado, según como sea el fondo del casquillo. El diámetro del punzón es el diámetro interno del recipiente. Los punzones para estampado tienen un agujero para posibilitar la evacuación del aire que pueda quedar entre el punzón y la chapa.

- b) Matriz. Es la que guía a la chapa durante su conformado. Es muy importante su acabado superficial. El radio de embutido, que determina la forma de la matriz en la parte en que el metal se introduce en la garganta de la misma, se calcula en función del material de la reducción y del espesor de la chapa.
- c) Sujetador: Tiene por objeto evitar que la parte externa de la chapa se ondule debido al pandeo provocado por las tensiones de compresión circunferenciales inducidas en el material. Puede ser de presión constante o de luz constante. En el primer caso la presión se logra por medio de resortes adosados al cabezal del punzón o por algún sistema neumático o hidráulico. En el segundo caso el sujetador es tal que entre el mismo y la matriz queda una luz que excede en aproximadamente el 5% el espesor de la chapa. Para chapas muy gruesas y reducciones en diámetro poco severas se puede omitir el uso de sujetadores.
- d) Extractor: Tiene por objeto expulsar a la pieza formada del interior de la matriz. Puede ser innecesario cuando la matriz es hueca y la pieza puede recuperarse por debajo de la mesa del balancín. El mismo sujetador puede servir como extractor cuando la pieza tiende a quedar adherida al punzón.

En la figura 30 se pueden ver los elementos señalados anteriormente.

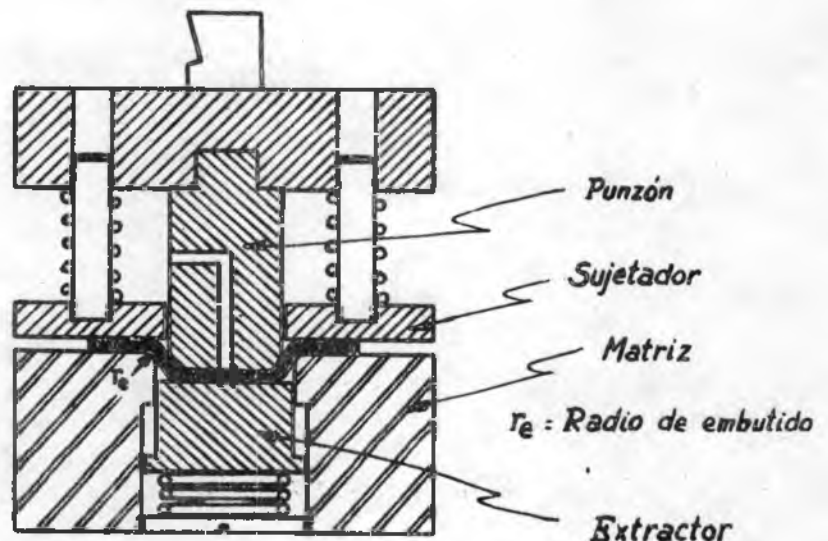


Figura 30

6.2. RELACION DE EMBUTIDO - REEMBUTIDO.

Cuando el recipiente que se desea obtener tiene mucha altura y poco diámetro, resulta imposible de estampar en una sola operación. La máxima reducción obtenible en un paso se define como relación de embutido y es función del material.

Cuando se sobrepasa la relación de embutido, es necesario efectuar varias operaciones sucesivas, conocidas como reembutido. El reembutido puede ser directo o inverso. En el primer caso la pared externa del recipiente permanece como tal durante el reembutido. En el segundo la pared externa de una operación pasa a ser la interna en la siguiente. En la figura 31 se ilustran los dos tipos de reembutido. Existe también una relación de reembutido que es la máxima reducción de diámetro que se puede obtener en un recipiente. Es función del material, y por lo común es distinta de la relación de embutido.

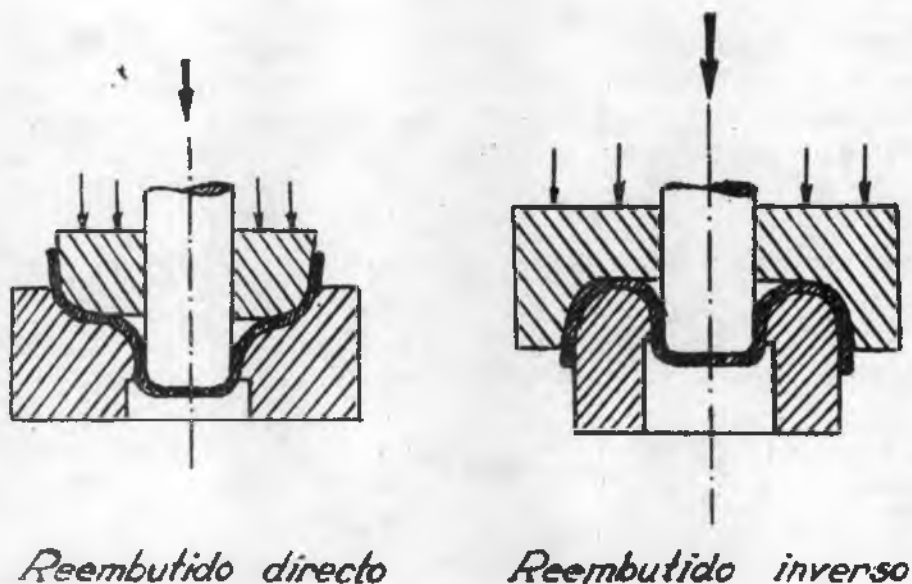


Figura 31

6.3. PROCESOS ESPECIALES DE ESTAMPADO PROFUNDO.

6.3.1. PROCESO GUERIN.

Cuando el recipiente es de forma complicada y se lo fabrica con un metal liviano de poco espesor, es posible reemplazar al punzón rígido por uno de goma. Es lo que se conoce como proceso Guerin. El punzón de goma debe estar colocado en un marco robusto para que, durante la carrera de trabajo la goma no sea desplazada lateralmente. Los punzones de goma no son compresibles, por lo que la máquina debe poseer algún dispositivo para evitar sobrecargas peligrosas. Los sujetadores pueden tener como finali-

dad evitar un estirado excesivo de la chapa en su parte exterior, dado que el punzón podría no dejarla deslizar hacia la garganta de la matriz. En la figura 32 se ve un esquema del proceso Guerín.

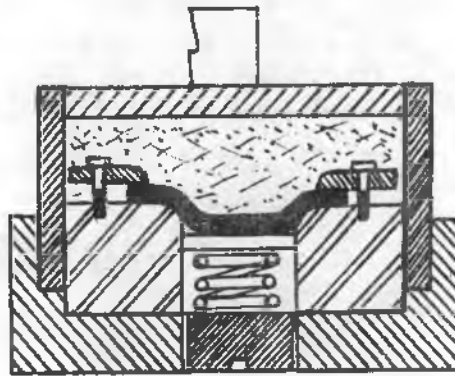


Figura 32

6 3.2. ESTAMPADO POR BOMBEO

Cuando se desea fabricar recipientes que en su parte inferior presenten una sección mayor, no se puede utilizar el proceso simple descrito hasta aquí. En estos casos el procedimiento se divide en dos etapas diferenciadas. En la primera de ellas se estampa un recipiente con el diámetro menor y en la siguiente se procede al bombeado de dicho recipiente, dándole la forma definitiva. Esta segunda operación se conoce como estampado por bombeo ('hydroforming process'). Como punzón se puede usar goma o agua. Existe en este caso también una relación máxima entre diámetros antes y después de la operación. La matriz debe ser partida para posibilitar la extracción de la pieza. Debe calcularse muy bien la carrera y preverse dispositivos de seguridad para evitar sobrecargas en la máquina con que se estampa.

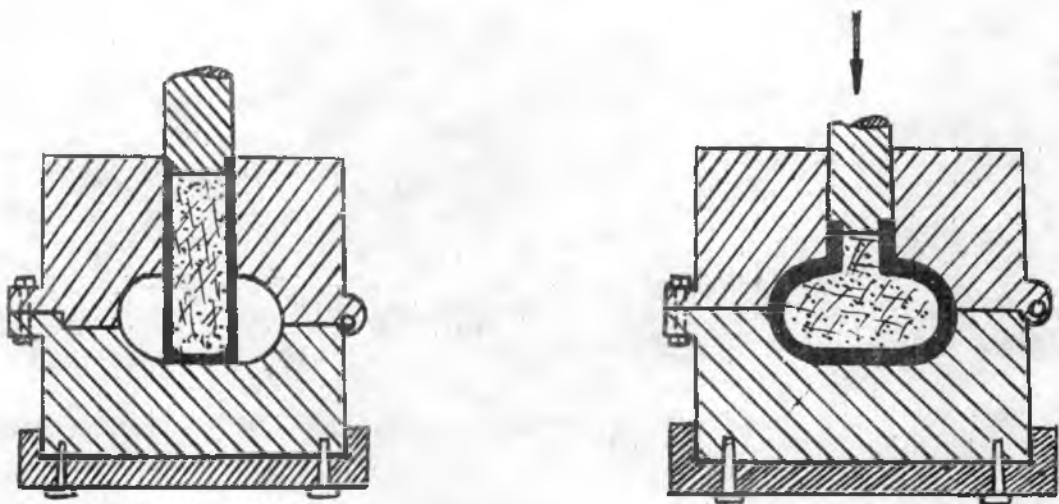


Figura 33

6.3.3. ESTAMPADO AL TORNO (REPUJADO).

Mediante una preparación adecuada, puede emplearse el torno para embutir chapa. Esta operación consiste en hacer girar un sólido de revolución (de madera o de fundición) fijado en el cabezal del torno y adherirle poco a poco un trozo de chapa que ha sido centrada previamente mediante la presión ejercida con una herramienta especial, como se ilustra en la figura 34

Este procedimiento es muy usado para producciones pequeñas por su bajo costo. La chapa debe poseer buena ductilidad.

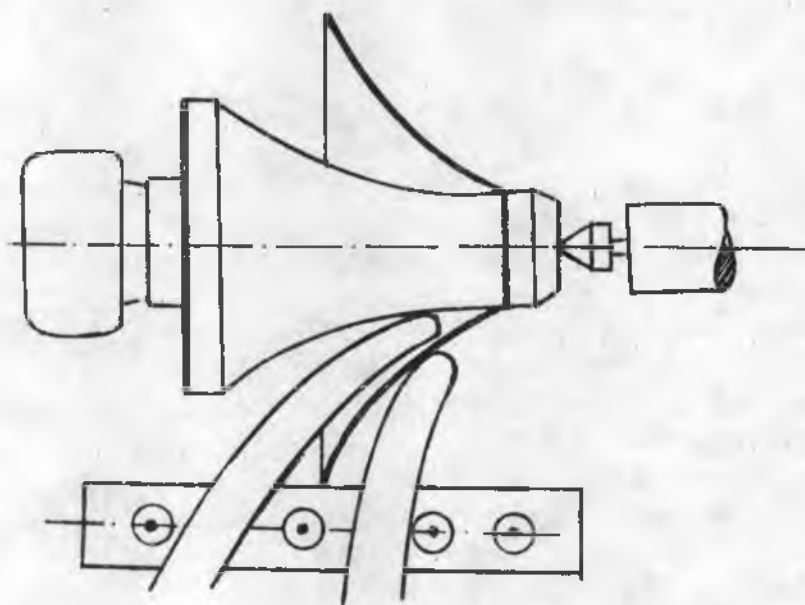


Figura 34

6.4. "IRONING" y "SINKING".

Las operaciones de reembutido pueden también clasificarse en embutido con una disminución apreciable en espesor de pared, llamado "ironing" (planchado) y embutido con poco cambio en espesor de pared, llamado "sinking".

En el caso de "ironing", la tensión predominante es la de compresión radial desarrollada por la presión ejercida entre el punzón y la matriz debido a que el juego entre ambos es menor que el espesor de pared del recipiente. El punzón debe ejercer así una fuerza de tracción mayor sobre la pared ya reducida, y esta tensión es la crítica, determinando así la máxima reducción conseguible.

METODOS DE ELABORACION

PUNTO No. 20

1. INTRODUCCION

En algunos casos es posible obtener piezas metálicas utilizables directamente por fusión y colada en moldes adecuados. En otros, inconvenientes en el moldeo o bien exigencias de carácter mecánico imponen procesos en que se produzca deformación plástica en caliente, acompañada o no de un acabado final en frío.

Los procesos de elaboración comprenden por lo general las siguientes etapas:

- a) Colada de un lingote de forma y tamaño adecuados.
- b) Desbaste en caliente de ese lingote, a los efectos de adecuar su forma a la elaboración posterior y mejorar la estructura.
- c) Trabajado en caliente del desbaste para obtener semiproductos o bien piezas acabadas.
- d) Acabado en frío de los semiproductos provenientes del trabajado en caliente.

Debe destacarse que, en ciertos procesos o con determinados metales, alguna de las etapas indicadas puede faltar o ser substancialmente diferente.

Es lo que ocurre, por ejemplo, con los modernos sistemas de colada continua, en los cuales en lugar de un lingote se obtiene una barra continua de metal. Una excepción a este esquema lo constituyen las aleaciones que presentan fragilidad en caliente y que deben por ello ser trabajadas en frío con recocidos intermedios.

Ya se han discutido (Capítulo 9) las ventajas y desventajas del trabajado en frío y en caliente, por lo que no se vuelve a insistir en este tema, aunque conviene tenerlo presente en el estudio de este capítulo.

2. GENERALIDADES SOBRE LA FABRICACION DE PIEZAS DE SECCION CONSTANTE

Se entiende por piezas de sección constante a las chapas, cintas, barras, perfiles, etc

Salvo casos especiales, la fabricación de piezas de este tipo se puede

realizar mediante uno de los dos métodos que se indican a continuación:

- 1) Laminación
- 2) Extrusión

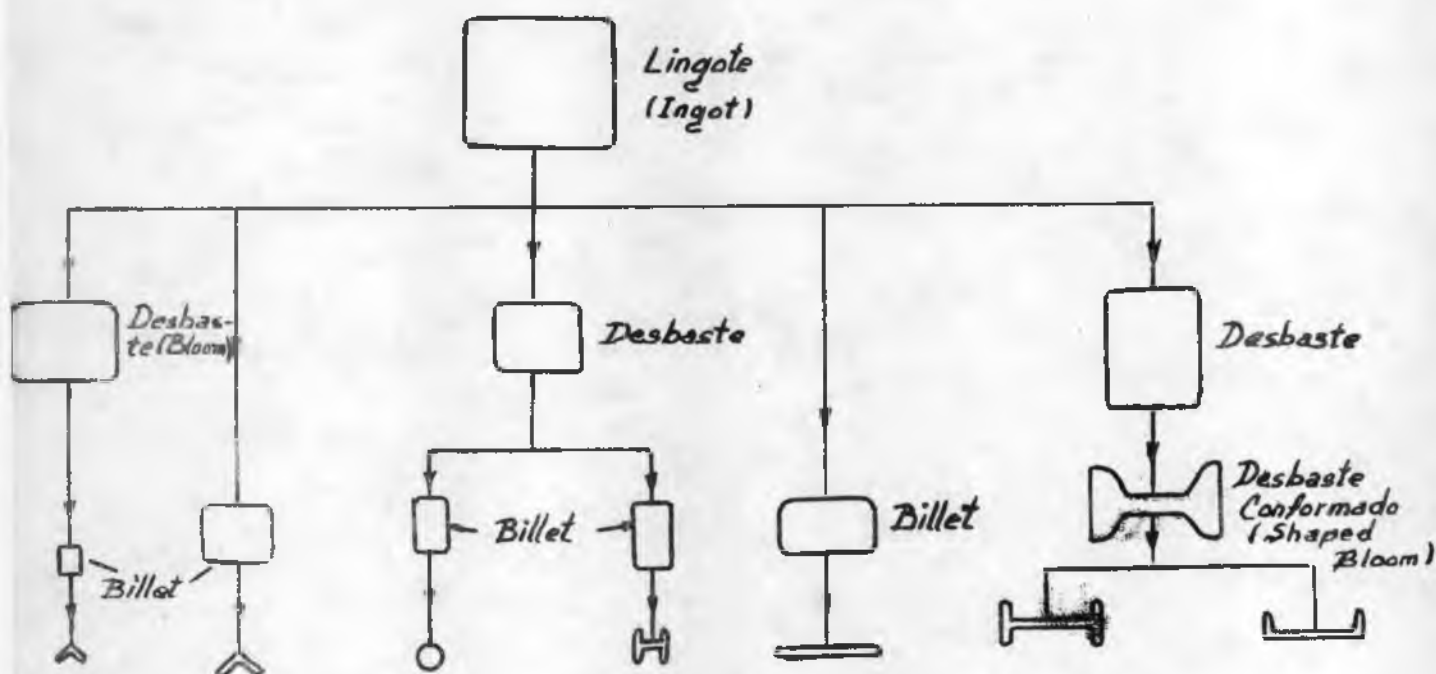
2.1. LAMINACION

Este proceso se aplica fundamentalmente a metales de elevada resistencia, tales como aceros, bronce, latones, etc.

Se parte de un lingote obtenido por colada en moldes o continua. Los lingotes son por lo común de sección cuadrada o rectangular y pueden pesar hasta 40 toneladas en el caso del acero.

Una vez desmoldeados, los lingotes se someten a un calentamiento en hornos de fosa ("soaking pits") para lograr una mayor uniformidad en la temperatura durante el trabajo de desbaste, en que las condiciones son más críticas por la estructura de colada que presenta el metal.

En la figura 1 se ve un esquema de las posibles operaciones de laminado que sufre el lingote hasta llegar a la pieza terminada.



- Fig. 1. -

Excepto para algunos productos planos, el primer desbaste del lingote se efectúa en los trenes de laminación "blooming". Su función consiste en reducir al lingote a un menor tamaño, con lo que se obtiene lo que se conoce como "bloom" o "billet", según las dimensiones. Estos productos del desbaste son utilizados luego para forja o se laminan en trenes acabadores.

Todo el proceso se efectúa en caliente, siendo muy importante la temperatura de acabado en la obtención de determinadas características mecánicas.

Los trenes de laminación utilizados pueden ser dúos o tríos, de cualquiera de los tipos vistos en el capítulo anterior. Los cilindros pueden ser planos o acanalados.

Terminada la laminación, las piezas son cortadas según las longitudes deseadas y pasan a playas de enfriamiento mecanizadas. Salvo casos especiales, el enfriamiento se realiza directamente al aire.

2.2. EXTRUSION

La extrusión constituye el proceso más económico para reducir lingotes y realizar operaciones de acabado en muchos metales no ferrosos, y últimamente está extendiendo su aplicación también a los aceros y metales más resistentes.

Como ya se explicó en el capítulo anterior, este proceso se adapta perfectamente para la fabricación de barras de las secciones más diversas e inclusive de piezas huecas.

Las barras y los perfiles extrudados están sujetos únicamente a una operación de enderezado, y utilizados así como piezas terminadas. Es también práctica común la obtención de piezas relativamente pequeñas, tales como levas y engranajes, cortando secciones de piezas extrudadas.

En las prensas de extensión grandes se pueden trabajar con tochos de hasta 50 cm. de diámetro y una longitud que puede ser cinco veces el diámetro. En los metales que requieran una presión inicial elevada, la longitud del tocho suele ser menor.

3. FABRICACION DE CHAPAS, PLANCHUELAS Y CINTAS

La gran demanda de estos productos hace que deban reunir, en diferentes grados y combinaciones, una serie de cualidades, entre las que se puede enumerar: Facilidad de fabricación, resistencia mecánica adecuada, resistencia a la corrosión, ductilidad, buen aspecto, adaptabilidad a tratamientos superficiales, entre otros.

Las chapas y cintas pueden ser laminadas (por lo común a partir de un lingote rectangular) en caliente directamente hasta el espesor deseado, o bien laminadas en caliente hasta un espesor intermedio y luego terminadas en frío. Rigen para ésto los conceptos vistos al analizar la influencia de la temperatura sobre el trabajado de los metales.

3.1. LAMINACION EN CALIENTE DE PRODUCTOS PLANOS

Existen varios métodos utilizados en la laminación en caliente de chapas y cintas:

- a) Laminación continua o de fleje ancho
(Broad Hot Strip o Continuous Mill Practice)
- b) Laminación de pletinas
(Sheet Bar Practice)
(Sheared Breakdown Practice)

a) Laminación continua o de fleje ancho

La reducción se lleva a cabo en grandes longitudes de metal, que después se corta o se bobina. La laminación es paralela al eje del lingote. El tren de laminación consta de dos partes, una de desbaste y una de acabado. El número de cajas puede variar de acuerdo con el producto que se lamina. Normalmente hay entre 4 y 7 cajas de desbaste y entre 4 y 8 de acabado. En el tren de desbaste, al salir de las cajas, el metal está sometido a un fuerte chorro de agua que elimina la cascarilla formada por oxidación. El tren de acabado es del tipo continuo y las cajas normalmente son cuatro.

Para asegurar el ancho del fleje, algunos trenes poseen rodillos verticales. Estos trenes se conocen como universales.

b) Laminación de barra rectangular

Se lamina un lingote hasta una barra rectangular, que puede ser de aproximadamente 250 mm. de ancho por 10 de espesor. Esta barra se corta en largos un poco mayores que el ancho de la chapa que se desea fabricar y se somete a laminación cruzada en un laminador de dos cajas. La barra se manipulea en forma manual. Para obtener la reducción en espesor deseada se superponen dos barras durante la parte final de la laminación. Luego se separan y se cortan al tamaño adecuado.

Un proceso semejante al anterior, excepto que se elimina la caja de desbaste en el tren, porque se parte de un producto obtenido por corte de un fleje cuyo ancho es un poco mayor que el de la chapa a fabricarse es el llamado "sheared breakdown practice".

3.2. LAMINACION EN FRIO DE PRODUCTOS PLANOS

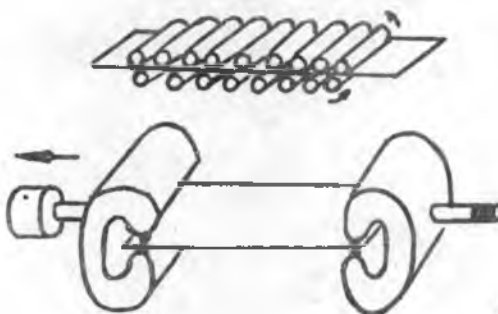
Se efectúa como operación de acabado, a los efectos de obtener las ventajas que ya se discutieron oportunamente.

Se pueden usar trenes dúos, aunque a medida que aumenta el ancho y disminuye el espesor del producto laminado, se impone la necesidad de trenes cuarto.

Es muy importante regular la secuencia de reducciones y recocidos intermedios a fin de obtener las características mecánicas deseadas.

Es común someter a las chapas a un estirado final para eliminar ondulaciones y defectos de planitud. En algunos casos se trata así de hacer desaparecer los defectos que en operaciones posteriores pudieran aparecer por el efecto que acompaña al punto de fluencia.

El estirado puede llevarse a cabo mediante rodillos enderezadores o aplicando tracción a la chapa sujeta por dos mordazas, como se ilustra en la figura 2.



— Fig. 2. —

Una máquina enderezadora de rodillos consiste en dos series de rodillos de pequeño diámetro, horizontales y provistos de desplazamiento

vertical. Al pasar entre ellos, la chapa es sometida a flexiones alternativas decrecientes hacia la salida. De este modo es deformada plásticamente y enderezada.

En la enderezadora por tracción, se estira a la chapa dándole una deformación comprendida entre el 1 y 3%, con lo que se supera el límite elástico. La chapa debe estar bien procesada, para que, al producirse la recuperación, se mantenga la planitud deseada.

4. FABRICACION DE BARRAS Y PERFILES

Como ya se ha dicho, se puede llevar a cabo por laminación o por extrusión. En este último caso, el esquema de la fabricación es sustancialmente el descrito en el capítulo anterior. El problema práctico más importante consiste en equilibrar el flujo del material a través de la matriz, para evitar un curvado excesivo de la barra o del perfil fabricados.

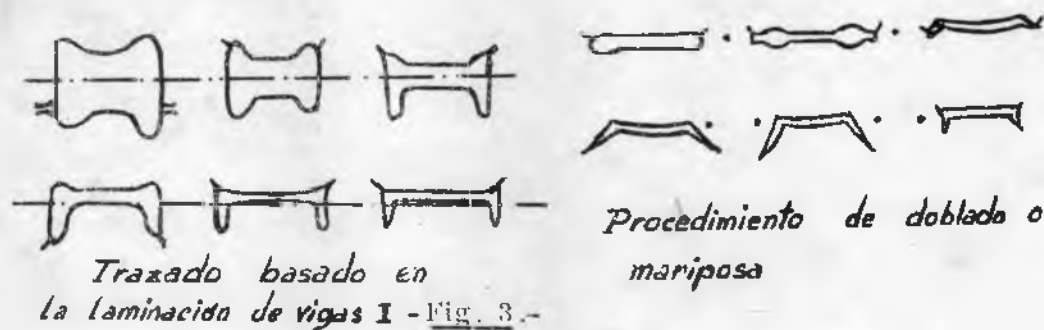
La laminación de estos productos es bastante más compleja y requiere un trazado de canales experimentados. Este es un campo que aún se maneja con cierto empirismo, debido a la complejidad de su formulación teórica.

Debe tenerse en cuenta que, dado que la sección va cambiando de forma entre pasadas de laminación sucesivas, los alargamientos que sufren las distintas partes de la pieza son diferentes, por lo cual pueden originarse curvados peligrosos en la barra o en el perfil, como así también tensiones elevadas que provoquen agrietamientos.

Tan importante como el trazado del canal es a veces que la pieza entre al mismo en la forma correcta. Es por ello que, a la entrada de los canales, existen unas guías - cuyo proyecto y construcción debe ser cuidadoso - que orientan al material en la forma adecuada.

Para la obtención de barras y de perfiles existen diseños muy variados. Las barras se obtienen por lo común con series de canales cuadrado-rumbo, cuadrado-óvalo-redondo, etc.

En la figura 3 se ilustran dos diseños característicos de canales para fabricar perfiles U.



5. FABRICACION DE ALAMBRES

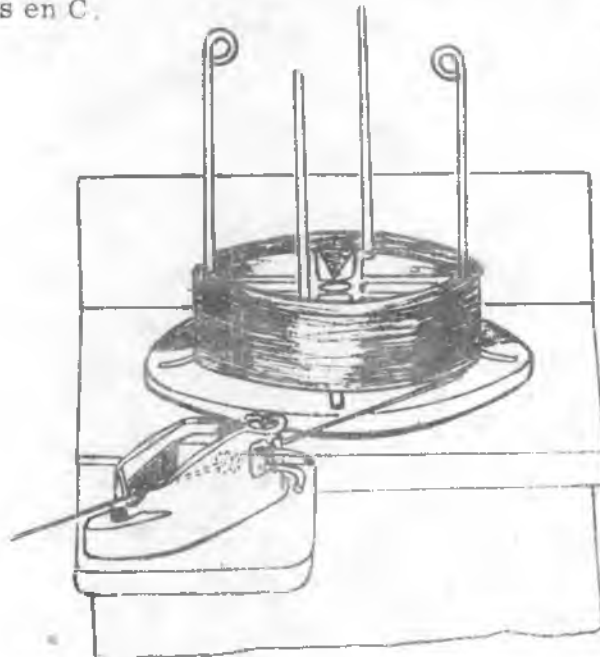
La mayor parte de los alambres se obtienen por trefilado a partir del alambrón. El alambrón es una barra laminada en caliente, en trenes continuos o serpenteantes. Su diámetro suele estar comprendido entre 15 y 6 mm. No conviene laminar en caliente secciones menores, por la disipación térmica debida a la gran relación superficie-volumen.

Después del laminado, el alambrón se somete a un decapado para eliminar el óxido superficial. Esta etapa del proceso es muy importante en la obtención de un buen alambre. Un decapado insuficiente dejaría en la superficie cascarilla de óxido que desgastaría a la matriz y conduciría a defectos en el alambre. Por otro lado, un decapado demasiado intenso provocaría un sobreataque del metal por los ácidos, produciendo así una superficie defectuosa. Para evitar este problema, los baños de decapado suelen contener inhibidores. Una vez decapado, el alambrón es limpiado con agua a presión.

El trefilado puede hacerse:

- a) Por vía seca
- b) Por vía húmeda

Cuando se realiza por vía seca, el alambrón luego del decapado, es recubierto con cal o con alguna otra solución alcalina. La concentración en el baño de "encalado" depende de la cantidad de reducción a sufrir en el trefilado. Oscila entre 3 y 15% para el acero. Luego del baño de encalado, se somete al alambrón a un calentamiento para secar la cal y eliminar el hidrógeno incluido. A continuación, se procede al trefilado a través de una matriz del tipo descrito en el capítulo anterior, cuya caja contiene un lubricante sólido tal como jabón en polvo o talco, o bien grasa. La reducción en área por pasada es del orden del 40% o menos para aceros bajos en C.



- Figura 4 -

En el proceso por vía húmeda, el alambrón después de lavado, es recubierto con una capa de cobreado o de fosfatizado, y luego trefilado, con una solución jabonosa o con aceite soluble actuando como lubricante. La reducción por pasada que se obtiene por este proceso es menor que en el trefilado por vía seca. Se usa la vía húmeda para trefilar secciones pequeñas y obtener acabados especiales.

Una vez pasado por la trefila, el alambre se enrolla en un tambor, como se ve en la figura 4. Este tambor, accionado por un motor, ejerce la fuerza de trefilado. En un banco de trefilación continua, el alambre puede pasar del tambor a otra trefila, y así sucesivamente. En este caso, debe regularse la velocidad periférica de los tambores para adecuarse a las reducciones del alambre y consiguientes variaciones en la velocidad del mismo. Esto se logra mediante accionamientos independientes de los tambores, o con cajas reductoras adecuadas, o bien variando el diámetro de los mismos, cuando el accionamiento es único.

Para evitar la enojosa operación de aguzar la punta del alambre al introducirlo en la trefila, se sueldan los extremos de los distintos carretes de alambres, con lo que el proceso se hace continuo. Las velocidades industriales de trefilado de alambres son del orden de los metros por segundo.

Cuando el alambre se ha fragilizado lo suficiente como para que sea imposible proseguir el proceso, debe sometérselo a un recocido adecuado. Esta operación se suele efectuar en baños de sales o de plomo, o bien en hornos de tipo campana, con atmósfera controlada, para evitar la oxidación superficial. En algunos casos es admisible un cierto grado de oxidación, como en el caso del alambre de acero conocido como "alambre negro". Esta oxidación se logra por enfriamiento al aire del alambre caliente.

6. FABRICACION DE TUBOS

Los tubos ocupan un lugar importante en la industria moderna. Pueden utilizarse como conductores de líquidos o de gases, como recipientes de presión, en forma de elementos mecánicos resistentes, etc.

Desde el punto de vista de su construcción, se dividen en dos grandes grupos:

- a) Tubos sin costura
- b) Tubos con costura

A continuación se analizan brevemente los procesos utilizados en la fabricación de tubos.

6.1. FABRICACION DE TUBOS SIN COSTURA

Se puede efectuar de varias maneras. En general, las operaciones necesarias para fabricar tubos sin costura se pueden resumir como sigue:

- a) Calentamiento del producto de partida
- b) Punzonado
- c) Alargamiento de la pieza punzonada hasta darle las dimensiones de un tubo
- d) Eventualmente, reducción del diámetro y/o espesor del tubo.
- e) Operaciones varias, tales como roscado de extremos, recubrimiento, calibrado, etc.

Los aceros para tubos sin costura son casi siempre aceros calmados, obtenidos en convertidores con inyección de oxígeno, o bien en hornos Siemens Martin o eléctricos. Siendo la operación de punzonado y alargamiento relativamente delicada, conviene que los aceros para tubos sean homogéneos y con buenos alargamientos a las temperaturas de trabajo.

El calentamiento se efectúa en hornos de tipo túnel o bien en hornos giratorios. Es importante que la temperatura del material sea uniforme. La adecuada para la fabricación de tubos oscila entre 1200 y 1300°C.

Los distintos métodos de obtener el punzonado y el alargamiento se especifican en la tabla No. 1.

Cabe destacar que, dado que la tabla se refiere a los métodos de obtención de tubos por trabajado en caliente, se omite en la misma el estirado en frío. Este método puede ser por otra parte una operación final en la fabricación de tubos sin costura como con ella. Este estirado en frío se hace mediante los métodos de trefilado de tubos ya vistos en el capítulo anterior.

TABLA No. 1

Procedimientos de fabricación en caliente de tubos sin costura

Procedimiento	Gama de diámetros fabricados (mm)	Producto de partida	Fabricación del desbaste	Transformación en tubos
Paso de peregrino	203 - 419	Lingote	Prensa de punzonar laminador oblicuo	Paso de peregrino-calibrador
	89 - 191	Lingote cuadrado	Prensa de calibrar de punzonar horno laminador oblicuo	Paso de peregrino-calibrador
Laminador automático	168 - 406	Redondo	Punzonador oblicuo No.1 punzonador oblicuo No.2	Laminador automático enderezador calibrador
	34 - 219	Redondo	Punzonador oblicuo	Laminador automático enderezador calibrador o reductor
Laminador continuo	55 - 150	Redondo	Punzonador oblicuo	Laminador continuo calibrador o reductor
Laminador Assel	42 - 168	Redondo	Punzonador oblicuo	Alargador Assel calibrador redondeador
Extrusión	200	Billet	Punzonador en prensa	Extrusión eventualmente reductor

(Tabla extraída de "La Technique Moderne", Dic. 1966, No. 12, pág. 532)

6.1. PROCEDIMIENTO DEL PASO DE PEREGRINO

Si bien es una técnica vieja, está tan perfeccionada que permite fabricar aún una gran gama de tubos a precios competitivos. Los cambios de utilajes son rápidos, lo cual permite una producción variada.

Actualmente, un laminador paso de peregrino consta de tres grupos principales de máquinas:

1. La prensa de punzonar.
2. El laminador Mannesmann, llamado también laminador oblicuo.
3. El laminador paso de peregrino, completado eventualmente con un laminador calibrador.

6.1.1.1. AGUJEREADO DEL PRODUCTO BASE

Para los tubos de 203-450mm de diámetro se parte de lingotes poligonales colados por sifón y luego calentados a 1250°C. En una prensa hidráulica horizontal se los transforma en un bloque agujereado de sección circular.

Para los tubos de 89-219mm se parte de lingotes cuadrados que a la salida del horno se introducen en una prensa de calibrar. Esta les da la forma cilíndrica. Luego se agujerean, aunque no totalmente, quedando el fondo cerrado. A continuación pasan a otro horno que asegura la regularización de la temperatura.

El objeto de estas operaciones con prensa es el de alimentar al laminador Mannesmann con un producto ya agujereado y por lo tanto aliviar su trabajo. De esta forma se disminuye en una primera fase el diámetro del producto de origen.

6.1.1.2. LAMINADORES MANNESMANN Y PASO DE PEREGRINO

Su funcionamiento ya se explicó en el capítulo anterior.

El laminador paso de peregrino está dotado además de un aparejo de presentación que forma una unidad con el laminador propiamente dicho y cuyo funcionamiento conviene aclarar.

Dicho aparejo consta de:

- a) Un sistema hidráulico de avance de todo el conjunto sincronizado con los rodillos del laminador.

- b) Un sistema neumático que acciona al mandril sobre el que se apoya el tubo, de acción rápida.
- c) Un sistema de rosca, llamado cuarto de giro, que gira al tubo 90° después de cada pasada de laminación.

Al funcionamiento del conjunto puede explicarse de la siguiente manera:

El sistema hidráulico mueve hacia adelante al tubo apoyado en el mandril. Cuando aquél entra en contacto con los rodillos, la zona de ataque toma un trozo de metal, que se alarga a medida que se llega a la zona de terminación. Como los rodillos giran hacia atrás, impulsan también al tubo hacia atrás, venciendo la acción del sistema neumático. Mientras tanto, el sistema hidráulico sigue haciendo avanzar al conjunto hacia adelante.

Una vez que los rodillos llegan a la zona de marcha libre, se produce el avance rápido por acción del sistema neumático y simultáneamente se produce el giro. Dado que ahora avanza todo el conjunto, el avance es mayor que el retroceso (de allí el nombre del sistema), y la zona de ataque de los rodillos toma un nuevo trozo de metal. Este proceso se repite hasta que todo el material queda laminado.

6.1.1.3. CALIBRADOR

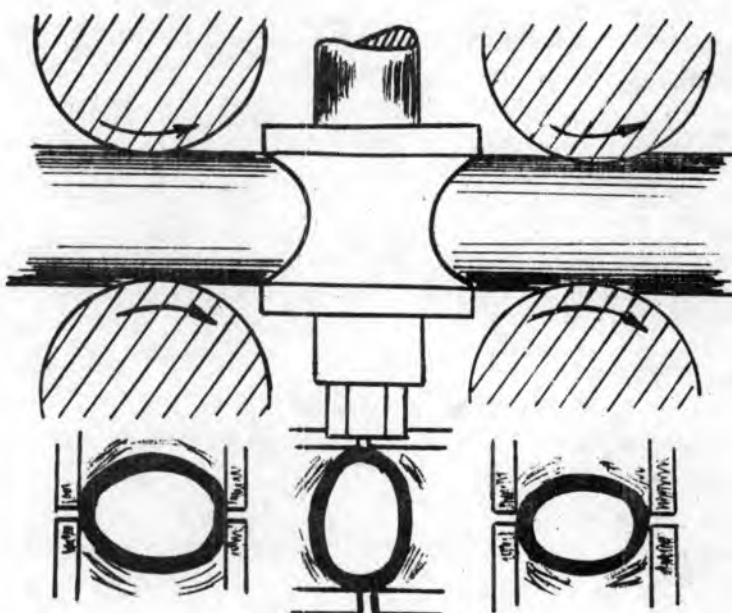
Una vez que el tubo abandona al laminador paso de peregrino, pasa a un laminador calibrador. El objeto de este último es lograr tubos de diámetros exactos.

El calibrador consta de 5 a 7 cajas que contienen 2 cilindros cada una. Las cajas se alternan formando ángulos de 90°. Las gargantas de los cilindros son ovaladas, salvo las dos últimas que son circulares. En estas dos últimas cajas puede efectuarse un ligero ajuste en la separación de los cilindros, lo que permite obtener, después del enfriamiento, los tubos con las tolerancias deseadas.

Mediante el tren calibrador se pueden obtener tubos de diámetros finales distintos, partiendo de un mismo diámetro inicial. Para ello se varía el número de cajas del tren. Las reducciones por caja oscilan entre 1,5 y 3%.

En la Fig. 5. se ve un esquema del tren calibrador.

Los tubos abandonan al calibrador a una temperatura correspondiente entre 850 y 1000°C. y se depositan sobre las grillas de enfriamiento, provistas de cadenas que los arrastran y hacen girar. De esta manera, los tubos se enfrían sin flexionar. Las extremidades, que han quedado irregulares, se cortan, y se pasa a la enderezadora en frío.



- Fig. 5. -

6.1.2. PROCEDIMIENTO DEL TREN AUTOMATICO

Para la fabricación de tubos con el tren automático se parte de redondos laminados.

El largo de los redondos se determina en función del tubo a obtener, teniendo en cuenta el corte de los extremos en el producto terminado y las pérdidas por oxidación en el horno, que son aproximadamente del 2%.

Después de calentado a la temperatura de laminación (1250°C), se punzona al bloque en una prensa horizontal con el objeto de permitir una buena alineación del mandril.

6.1.2.1. AGUJEREO DEL REDONDO

Se efectúa en el laminador oblicuo. El espesor de pared del tubo obtenido en el laminador Mannesmann varía según las dimensiones de los trenes.

Para trenes pequeños, que laminan tubos mayores de 200mm, se usa un solo agujerador y el espesor de pared que se obtiene es igual al doble del que tiene el tubo a obtener.

Para los trenes grandes, que laminan tubos de hasta 406mm de diámetro, se utilizan dos laminadores Mannesmann. El primero sólo perfora, y el segundo continúa la laminación transversal.

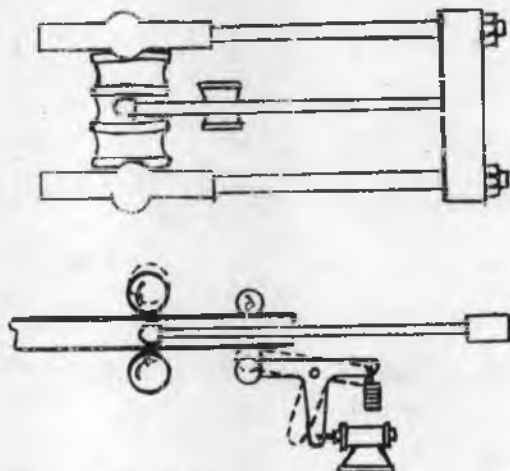
6.2.2. FUNCIONAMIENTO DEL LAMINADOR AUTOMÁTICO

Se trata de un laminador dúo clásico, constituido por un par de cilindros de trabajo y un par de cilindros guías que aseguran el retorno del tubo después de laminado.

El cilindro inferior de trabajo es fijo en altura, mientras que el superior se puede levantar de 40 a 50mm por la acción de un sistema de contrapesos, cuando retrocede el tubo.

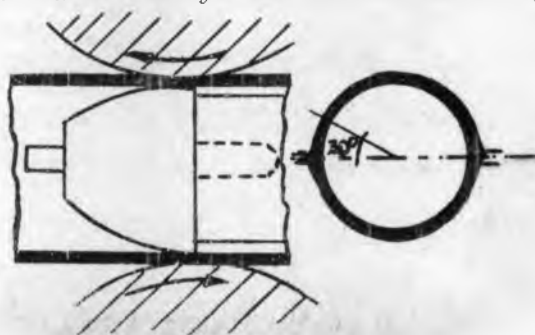
Un mandril, apoyado sobre una barra fija, se coloca en la acanaladura de trabajo.

El cilindro de retorno inferior es fijo en altura, no así el superior que es comandado por un pistón a aire, que lo quita cuando se está laminando. En la fig. 6 se ve un esquema con los elementos constitutivos de dicho laminador.



- Fig. 6. -

Los cilindros de laminación tienen una acanaladura semicircular, con las salidas a 30° para facilitar la entrada y salida del material. (Ver Fig. 7.)



- Fig. N° 7 -

La operación de laminación se hace en dos tiempos:

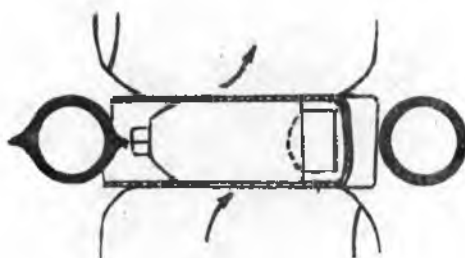
El tubo que viene del Mannesmann pasa por los cilindros de trabajo. Una vez que pasó, estos cilindros se separan y el tubo vuelve hacia atrás por la acción de los cilindros de retorno.

Se gira ahora al tubo 90° para eliminar los sobreespesores dejados en dos generatrices por efecto de las salidas de las acañaladuras. En esta segunda pasada es cuando se obtiene el espesor medio del tubo. Quedan todavía ligeros sobreespesores producidos en la segunda pasada. Para hacerlos desaparecer se pasa al tren alesador.

6.1.2.3. ALESADO DE LOS TUBOS

Los alesadores son laminadores que constan de dos cilindros de fundición, algo bombeados y con los ejes ligeramente inclinados en el plano horizontal.

El tubo gira entre los dos cilindros y sobre un mandril fundido cuya cabeza es ligeramente cónica y alargada. El tubo se termina así externa e internamente, aumentando en forma ligera el diámetro.



— Fig. 8. —

6.1.2.4. CALIBRADO DE LOS TUBOS

Se efectúa en la forma ya descrita.

6.1.3. PROCEDIMIENTO DEL LAMINADOR CONTINUO

Se caracteriza por un ritmo de producción rápido. Se producen con este método tubos de 100 a 150 mm de diámetro. Los tubos así fabricados se someten inmediatamente a una reducción en caliente o bien a un estirado en frío.

El producto de partida es un redondo laminado. El agujereado se produce en un laminador Mannesmann. El tocho agujereado pasa a continuación a un laminador continuo.

6.1.3.1. LAMINADOR CONTINUO

Tiene un número impar de pases de rodillos (7 ó 9) . Los rodillos se disponen alternativamente horizontales (1 ó 5) y verticales (3 ó 1)

Una barra muy larga hace de mandril. El espacio que queda entre la acaudadura y el mandril determina la sección del tubo y este espacio disminuye de una caja a la otra.

Dado que el caudal de metal que pasa por la caja debe ser constante, como las secciones van disminuyendo, la velocidad de los rodillos debe aumentar en cajas sucesivas

Los canales son del tipo óvalo, con excepción del último que es circular.

El mandril acompaña al tubo durante la laminación con velocidad menor, de manera que al terminar la operación, el tubo sobrepasa al mandril.

El conjunto de tubo y mandril se envía a un banco especial de desmandrillar, que saca al mandril por tracción. A veces se usan rodillos alisadores paralelos que producen una pequeña expansión en el tubo, con lo que el mandril puede salir más fácilmente.

6.1.4. PROCEDIMIENTO DEL LAMINADOR ASSEL

Con este método se trata de combinar las funciones del laminador automático y del alesador, para obtener un control estricto del espesor y mejorar la calidad de los tubos. Presenta además la ventaja de poder producir una gama extensa de dimensiones con cambios rápidos de utilajes.

Se pueden fabricar tubos con aceros de hasta 1% de C, o débilmente aleados al Ni, Cr, Mo, etc. Los diámetros de tubos laminados con este procedimiento varían entre 42 y 203 mm.

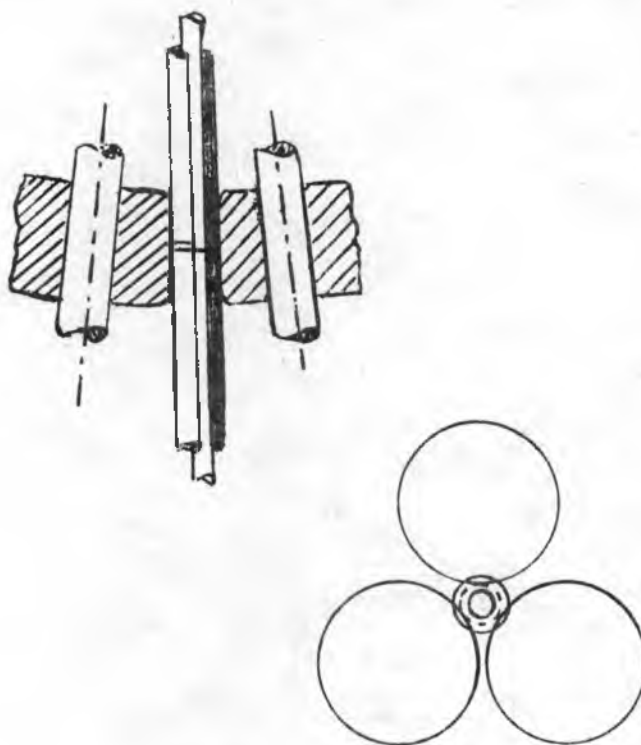
6.1.4.1. FUNCIONAMIENTO DEL LAMINADOR ASSEL

El laminador Assel, o alargador rotativo, tiene tres cilindros oblicuos que alargan al lingote agujereado que viene de un laminador Mannesmann. El alargamiento del tubo se produce por la reducción de espesor entre los cilindros y el mandril, acompañada por una reducción de los diámetros interior y exterior.

Mientras la pieza pasa por el alargador, el eje de ésta y el del laminador coinciden.

Los tres cilindros de trabajo se montan a igual distancia del eje, como se puede ver en la figura 9. Una parte de la caja es fija, mientras que la otra puede girar alrededor del eje del laminador. Esta rotación de la parte móvil

otorga a los cilindros una cierta oblicuidad que provee el ángulo necesario para hacer avanzar al lingote agujereado, montado sobre el mandril, con un movimiento helicoidal. Asimismo, la separación con respecto a los ejes de los rodamientos esféricos que soportan a los cilindros se regula para ajustar el espesor del tubo. La figura formada por los ejes de los cilindros es la de un hiperboloide de revolución, con aro de garganta e inclinación de las generatrices variables.



- Fig. 9. -

Los rodillos giran en el mismo sentido. Su perfil está formado por una superficie convergente de introducción que toma al lingote perforado, lo hace girar y avanzar y reduce su diámetro sobre el mandril puesto en su interior. La entrada es seguida por un resalto que es la característica del laminador Assel. Este resalto reduce el espesor, acuñando al metal entre el cilindro y el mandril. Sigue luego una parte cilíndrica paralela al mandril que alesa al tubo y por último una zona divergente que lo redondea. Debido al perfil de los cilindros, el flujo de metal se hace principalmente en el sentido longitudinal, aunque el sentido general de la laminación sea transversal.

El mandril generalmente es flotante y la velocidad de avance del tubo se obtiene por las componentes longitudinales de las fuerzas de laminado.

Luego de la laminación se procede al desmandrilado y a un calibrado y redondeado. Esta última operación se efectúa en un laminador alesador semejante al descrito en el tren automático, sin mandril.

6.1.5. PROCEDIMIENTO DE EXTRUSION

Los tubos sin costura se pueden fabricar también por el proceso de extrusión visto en el capítulo anterior.

En este caso, se pueden utilizar tochos preagujereados, con un mandril en el centro para guiar al material durante la extrusión, o bien tochos macizos, mediante el uso de matrices con cámara cónica como la descrita en el capítulo mencionado para la extrusión de piezas huecas.

6.2. FABRICACION DE TUBOS CON COSTURA

Los tubos con costura son los que presentan una soldadura longitudinal o en hélice.

Existen diversos procedimientos para fabricar este tipo de tubos. A continuación se detallan los siguientes :

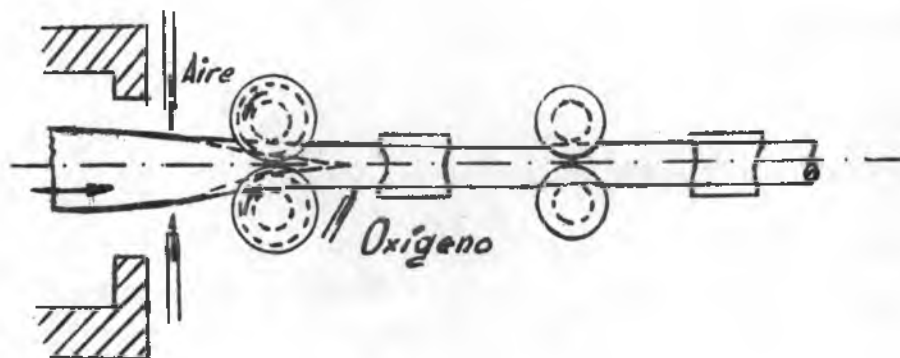
- a) Fabricación continua de tubos de acero soldados en caliente por presión, o procedimiento Fretz - Moon.
- b) Fabricación continua de tubos perfilados en frío y soldados eléctricamente.
- c) Fabricación en serie de tubos soldados de gran diámetro.

6.1. PROCEDIMIENTO FRETZ-MOON

Este método consiste en calentar al blanco en forma continua chapas de acero, laminarlas hasta darles forma de tubo y luego provocar la soldadura de los bordes por presión y temperatura.

Las chapas, soldadas para dar continuidad al proceso, pasan por un horno que calienta al material hasta una temperatura de 1250 a 1300°C. A la salida del horno, un chorro de aire comprimido elimina la cascarilla debida a la oxidación.

Luego el fleje entra a un tren laminador formado por diez cajas dúo alternativamente horizontales y verticales. La primera caja da al fleje la forma de un tubo cortado. Un inyector de oxígeno sobrecalienta localmente los bordes a 1425°C, justamente antes de la entrada a la segunda caja dúo que los aproxima, soldando los mismos bajo el efecto conjugado de presión y temperatura. Las cajas siguientes reducen el diámetro del tubo y forjan la soldadura. Los tubos no necesitan recocido final, debido a que salen del laminador a temperaturas suficientemente elevadas ($>920^{\circ}\text{C}$).



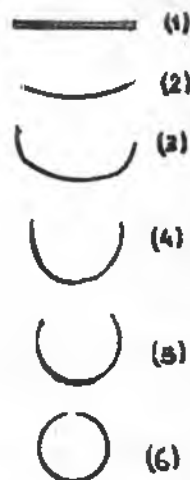
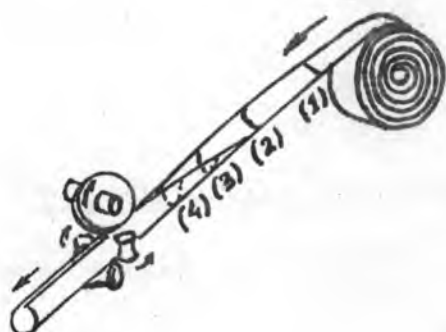
— Figura 10 —

6.2.2. FABRICACION DE TUBOS PERFILADOS EN FRIO Y SOLDADOS ELEC- TRICAMENTE. -

Este procedimiento se puede usar para fabricar tubos de hasta 406 mm. de diámetro.

El proceso se hace continuo mediante la soldadura de chapas o de extremos de bobinas. El fleje así obtenido se recorta en los bordes para garantizar un ancho constante.

A continuación se procede al perfilado del fleje en un tren laminador especial hasta darle la forma de un tubo. Este perfilado se puede realizar ya sea según una línea paralela al eje del tubo, o por enrollamiento en espiral. En este último caso se obtienen los tubos conocidos como helicoidales. La ventaja de este último procedimiento consiste en que se pueden usar flejes menos anchos que el perímetro transversal del tubo, y en que se pueden obtener diversos diámetros con un fleje dado, cambiando la inclinación de la hélice. El inconveniente estriba en que la soldadura es más larga.



— Figura 11 —

La soldadura se obtiene calentando los bordes un poco antes de la entrada a una caja que los comprime logrando la unión.

El calentamiento se puede efectuar :

a) Por resistencia

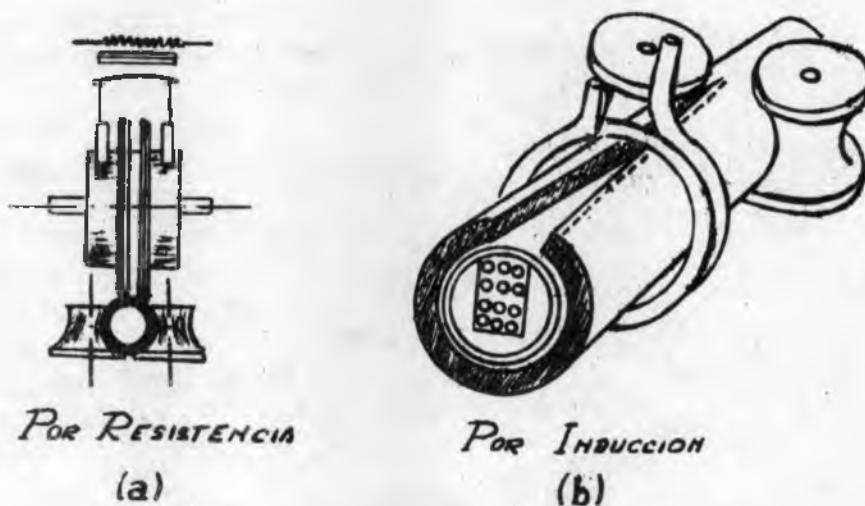
b) Por inducción

En la figura 12 se ilustran ambos procedimientos.

Las características sobresalientes son las siguientes :

Por resistencia : Tensión : 2-4, 5V; frecuencia : 100-400 cps.; intensidad : varios cientos de miles de amperes; Velocidad de trabajo : Hasta 60 m/min. Gama de fabricación : tubos de 8 a 406 mm. de diámetro y de 0,5 a 12,7 mm. de espesor.

Por inducción : Frecuencia : Del orden de 400 KHz, velocidades : De hasta 200 m/min. favorecidas por la falta de contacto mecánico. Posibilidad de fabricar tubos de acero inoxidable, de cobre y de aluminio.



- Figura 12 -

6.2.3. FABRICACION EN SERIE DE TUBOS SOLDADOS DE GRAN DIAMETRO

* Se llaman tubos soldados de gran diámetro a aquéllos cuyo diámetro interior es superior a los 406 mm. (16"). Los diámetros mayores fabricados oscilan alrededor de los 1000 mm. Los espesores suelen variar entre 6 y 20 mm.

El proceso de fabricación de esta clase de tubos comprende los siguientes pasos :

- a) Preparación de las chapas.
- b) Conformado en frío de los tubos.
- c) Soldadura de los bordes.
- d) Expansión hidráulica en frío.

Preparación de las Chapas

Consiste en recortarlas para obtener un ancho constante y asegurar que queden bien escuadradas.

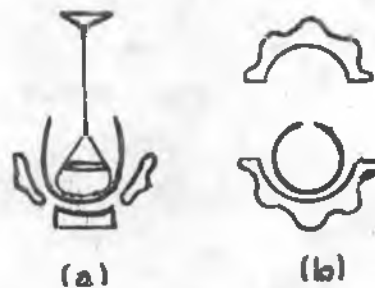
Conformación en frío de los tubos

Las dos técnicas comúnmente empleadas son :

- 1) Conformación en V y luego en O.
- 2) Conformación por pasos sucesivos.

1) Conformación en V y luego en O :

Se introduce la chapa en una prensa, haciéndola descansar sobre dos tablas laterales. A continuación se procede a su doblado a lo largo del eje longitudinal, dándole la forma en V, como se ilustra en la figura 13. La chapa así doblada es introducida en otra prensa de mayor potencia que tiene punzón y matriz semicirculares. Al descender el punzón, la chapa es forzada a adoptar la forma de una O. Es lo que se muestra en la figura 13.



- Figura 13 -

2) Conformación por pasos sucesivos :

El tubo se obtiene doblando la chapa en una prensa especial, por etapas. Presenta la ventaja de una economía en el utillaje.



- Figura 14 -

Soldadura de los bordes :

La soldadura de los tubos de gran diámetro se hace por arco sumergido bajo fundente, con cabezales automáticos. Las velocidades varían de acuerdo con el espesor. Suelen ser de 1 a 2,4 m/min.

Suele haber tres pasos de soldadura :

- 1) Amarre
- 2) Soldadura interior
- 3) Soldadura exterior

Expansión hidráulica en frío :

Se efectúa en una prensa hidráulica, con una mezcla de agua y de aceite soluble. La presión es tal que la tensión provocada en la pared del tubo alcance aproximadamente una vez y media el límite elástico.

De esta manera se consiguen dos propósitos :

- a) Calibrar y redondear al tubo.
- b) Aumentar el límite elástico del metal y permitir, con ello, una disminución en el espesor del tubo.

CONFORMADO DE CHAPAS

Los diversos procesos de conformado de chapas permiten producir una gran variedad de formas a partir de la chapa metálica plana, con velocidades de fabricación muy grandes.

Se han hecho algunos intentos de clasificación de las numerosas formas en que puede lograrse el conformado de chapas, atendiendo a sus características principales. Algunos se basan en la forma de las piezas obtenidas, otros en la severidad de la deformación. Una tercera posibilidad consiste en clasificarlos de acuerdo con el tipo de tensiones actuantes, criterio que se sigue en el presente curso.

De acuerdo con este último enfoque, se tienen los siguientes procesos de conformado de chapas :

Estirado (Stretch forming) - Tensiones de tracción.
Embutido profundo - (Deep drawing) - Tensiones de tracción, compr. y flex.
Doblado (Bending) - Tensiones de flexión.
Corte (Shearing, blanking) - Tensiones de corte.
Planchado (Ironing) - Tensiones de compresión.
Trefilado (Sheet drawing, sinking) - Tensiones de compresión indirecta.

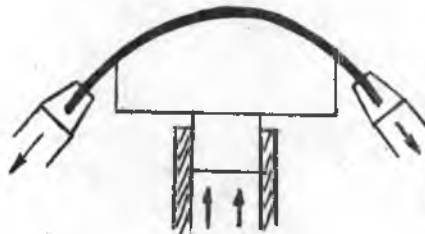
Existen procedimientos industriales en los que coexisten dos o más de los procesos reseñados.

En el capítulo anterior se analizaron con algún detalle el embutido profundo, planchado y trefilado, por lo que a continuación se desarrollan sólo los restantes.

7.1. ESTIRADO DE CHAPAS

Consiste en aplicar fuerzas de tracción al material para estirarlo sobre una herramienta o bloque de forma. Se usa mucho en la industria aeronáutica para fabricar piezas de gran tamaño, con radios de curvatura grandes. Se pueden obtener piezas con una o más curvaturas.

Las máquinas para estirar consisten fundamentalmente en un pistón accionado hidráulicamente que acciona al bloque de forma y dos mordazas que sujetan los extremos de la chapa y la traccionan. La pieza se obtiene por deformación plástica del metal sometido a un estado de tracción uni o biaxial. En la figura 15 se ve un esquema del funcionamiento de la máquina de estirado. Debe destacarse que las mordazas pueden ser fijas o pueden pivotar.

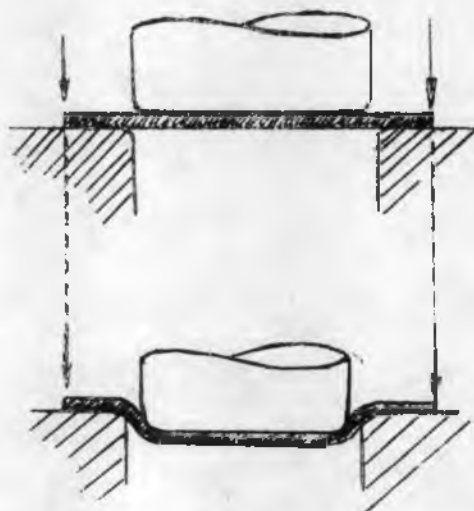


— Figura 15 —

También pueden considerarse operaciones de estirado, entre otras, las siguientes :

a) Conformado de una pieza metálica en prensa mediante punzón y matriz, de modo tal que las sollicitaciones sean predominantemente de tracción. Esto se logra sujetando fuertemente a la chapa en sus extremos. (Ver figura 16)

La diferencia entre esta operación y el embutido profundo resulta del tipo de tensiones actuantes, que provocan un adelgazamiento en el espesor de la chapa estirada, cosa que no ocurre en la embutida.



-- Figura 16 --

b) Enrollado de chapas o de perfiles, en que se aplica una fuerza de tracción, como se muestra en la figura 17, para evitar la aparición de tensiones de compresión producidas por el doblado



Figura 17

Lo que se pretende con las operaciones de conformado por estirado es fundamentalmente evitar que aparezcan tensiones de compresión que puedan hacer pandear al material.

Los límites de conformado están dados por la inestabilidad plástica que se produce en los estados de tracción. Son particularmente adecuados para estos trabajos algunos aceros inoxidables y aleaciones de aluminio.

Al no existir tensiones de compresión, o mejor dicho, dado que no se produce un gradiente de tensiones pronunciado en el espesor de la chapa, la recuperación elástica es menor que en las piezas fabricadas por el proceso de doblado.

7.2. DOBLADO DE CHAPAS

Es una de las operaciones más comunes. Mediante este proceso se transforma a una chapa metálica recta en curva, con radio de curvatura constante o bien variable. El radio de curvatura es lo que define la severidad de la operación en una pieza dada.

Se ha desarrollado una amplia variedad de métodos para doblar o dar forma contorneada a secciones rectas. A continuación se detallan algunos de ellos:

Se pueden hacer doblados largos y rectos en piezas tales como canales y chapas onduladas, mediante una dobladora, que es una prensa de simple efecto, de mesa larga y estrecha.

El perfilado con rodillos es un procedimiento corriente para obtener perfiles largos por doblados sucesivos de la chapa. Ya se vió su aplicación en la fabricación de tubos con costura. Se trata de trenes de laminación, cuyo número de cajas aumenta con la severidad del doblado. La diferencia entre esta operación y la efectuada por los trenes comunes estriba en que en los perfiladores con rodillos no se produce alargamiento en la chapa.

Se pueden fabricar piezas de forma cilíndrica o cónica empleando cilindros curvadores, como los que se observan en la figura 18. Cuando la chapa es muy fina, una curvadora de tres cilindros no es adecuada para evitar la aparición del pandeo que, como se viera oportunamente, constituye uno de los límites de conformabilidad en el doblado. Por ello se suele colocar un cuarto rodillo a la salida.



- Figura 18 -

Con un equipo del tipo de escurridor se consigue una deformación más uniforme. En su forma más sencilla, dicho equipo consiste en agarrar la chapa con una mordaza, en un extremo, sujetándola a un bloque de forma. El contorno se conforma progresivamente por golpes sucesivos de martillo, desde la mordaza al extremo libre de la chapa. En la figura 18 se ve un esquema de una curvadora de escurridor.

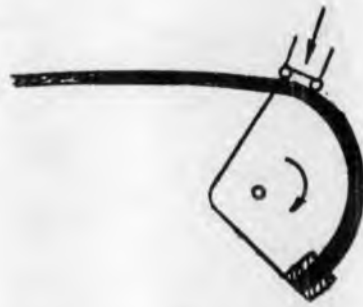


Figura 19

Un problema que se presenta en la operación de doblado es el cálculo de la longitud de la pieza. Dicha longitud se determina en base a la línea neutra en la que no se produce deformación durante el doblado. En flexión elástica, la línea neutra pasa por el centro de una sección constante. Cuando se alcanzan deformaciones plásticas, dicha línea se corre hacia el radio interno de doblado.

Por otra parte, la gran inhomogeneidad en el estado de tensiones y de deformaciones, es causa de que las tensiones residuales sean elevadas después de un doblado. Es por ello que la recuperación elástica es relativamente importante. Por esta razón siempre se dobla a la chapa un ángulo mayor que el necesario, a los efectos de compensar la recuperación elástica.

Los límites de conformabilidad en el proceso de doblado ya se discutieron en el capítulo II.2.

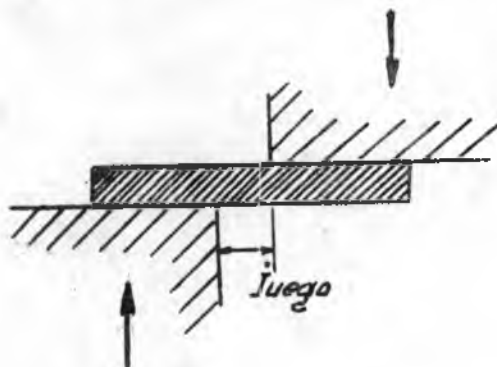
7.3. CORTE DE CHAPAS

La fabricación de piezas metálicas incluye una variedad de operaciones preparatorias y de acabado. Las más importantes de estas son el corte de piezas o de chapas (para un conformado subsiguiente), y el corte de piezas terminadas.

Los métodos de corte considerados aquí difieren de los de maquinado en que no hay formación de viruta.

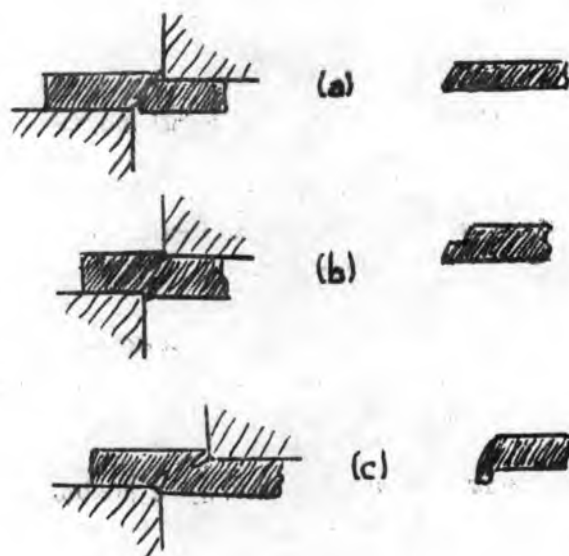
Así las operaciones de corte consisten en la subdivisión de una pieza metálica grande en piezas menores (que pueden permanecer parcialmente conectadas entre sí) por medio de dos cuchillas provistas de bordes cortantes. Un volumen de material muy pequeño es deformado plásticamente hasta el punto en que se produce la fractura, creando superficies nuevas. Los dos bordes cortantes son paralelos o casi y actúan separados por una pequeña distancia, sobre superficies metálicas opuestas. Esta distancia se denomina "juego". Las dos cu-

chillas son forzadas a desplazarse una respecto de la otra en forma perpendicular a la superficie metálica, hasta obtener la separación de las piezas. La carrera de la máquina (prensa o guillotina) puede variar desde una fracción del espesor de la chapa, para metales frágiles, hasta una cantidad un poco mayor que dicho espesor, para metales dúctiles.



— Figura 20 —

El juego entre las cuchillas es una variable importante en las operaciones de corte. Cuando tiene el valor adecuado, las grietas iniciadas se propagan a través del metal para unirse en el centro del espesor y producir una superficie de fractura limpia. (Ver figura 21 a). De todas maneras, aunque el juego sea el debido, hay distorsión del borde de corte. Si el juego es insuficiente, la fractura es rasgada (figura 21 b) y la energía necesaria para efectuar el corte es mayor que cuando el juego es el correcto. Si el juego es excesivo, hay más distorsión en el borde, y también la energía necesaria será mayor, dado que el volumen deformado plásticamente es mayor. Además, cuando el juego es demasiado grande, se producen con más facilidad rebabas en el borde del corte, y eventualmente doblado de la pieza (figura 21 c). El juego debe ser mayor en los metales frágiles que en los dúctiles.



La fuerza necesaria para el corte depende de la resistencia al corte del metal, de la longitud de corte y del espesor de la chapa. La longitud de corte se puede disminuir biselando el punzón o la matriz, para que el corte no sea simultáneo en toda la longitud. La inclinación del filo provoca una cierta distorsión en la chapa. Por ello conviene que la inclinación de la herramienta se haga en el lado en el cual queda el recorte inútil.



— Figura 22 —

Existe un amplio grupo de operaciones de prensa que se basan en el proceso de corte. El corte de discos o de piezas de chapas suele llamarse troquelado o punzonado. La chapa se recorta mediante la acción de un punzón o troquel y una matriz. Esta operación, en inglés recibe diversas denominaciones. Así, se llama :

"Punching" o "piercing" a la operación de hacer agujeros en la chapa desechando el metal interior. Cuando se trata de muchos agujeros se denomina "perforating".

"Notching" es punzonar muescas o entallas en el borde de la chapa.

"Parting" es el corte simultáneo sobre, al menos dos líneas de corte.

"Slitting" es la operación de hacer ranuras, sin desprendimiento del metal intermedio entre los cortes efectuados.

"Trimming", es una operación secundaria de acabado para eliminar rebabas, o recortar a las dimensiones finales el contorno de una pieza conformada.

"Shaving" es la operación de cepillado para acabar el canto cortado.

"Broaching" es el escariado de un agujero punzonado.

BIBLIOGRAFIA :

- "Metalurgia Mecánica", G.E. Dieter - Ed. Aguilar
- "Fundamentals of the Working of Metals", G. Sachs - Ed. Pergamon Press
- "Practical Metallurgy", G. Sachs, K. Van Horn - Ed. A.S.M.
- "Metals Handbook", 1948, Ed. A.S.M.
- "Laminación", H. Hoff y T. Dahl - Ed. Dossat.
- "Techniques of Pressworking Sheet Metal", D.F. Eary, E.A. Reed - Ed. Prentice-Hall
- "Pressworking of Metals", C.W. Hinman - Ed. McGraw-Hill
- "Le tréfilage de l'acier", M. Bonzel - Ed. Dunod
- "La Technique Moderne", Dic. 1966 - No. 12
- "Casting and Forming Processes in Manufacturing", I. Campbell - Ed. McGraw-Hill
- "ASME Handbook Metals Engineering", 1958

PUNTO 21. -

TENDENCIAS ACTUALES EN LOS PROCESOS DE TRABAJO

INTRODUCCION

El estudio de los procesos de conformado convencionales analizados hasta aquí no está agotado. Existen actualmente muchas investigaciones para mejorar sus posibilidades y sus rendimientos. Esta tarea se lleva a cabo mediante la unión de los enfoques plasticista y metalúrgico que se han desarrollado en los tópicos precedentes.

Sin embargo, en los últimos años han aparecido exigencias técnicas muy severas cuyo logro depende del desarrollo de nuevos metales y aleaciones con propiedades cada vez más específicas. Así, por ejemplo, en aviación se necesitan aleaciones más livianas y resistentes. Por otro lado, son necesarios metales y aleaciones más refractarios y resistentes al creep para soportar las cada vez mayores temperaturas de trabajo de algunos motores o turbinas.

Los materiales con estas propiedades son difíciles de trabajar. Se ha visto que a medida que aumenta la dureza o la resistencia, la ductilidad disminuye. Por otro lado, las aleaciones refractarias son difíciles de trabajar en caliente..

Para superar estas dificultades, se han desarrollado en los últimos años nuevos métodos de conformado de materiales, algunos de los cuales se verán a continuación.

ALTAS PRESIONES HIDROSTATICAS

Ya desde principios de siglo (1911) existen algunos trabajos que señalan la influencia de la presión hidrostática sobre la ductilidad de las rocas. La contribución más importante en este campo se debe a Bridgman, quien trabajó fundamentalmente en las décadas de 1940 y 1950.

Cuando se ensaya un metal a la tracción, sometiénolo simultáneamente a un estado de compresión hidrostática, se observa lo siguiente :

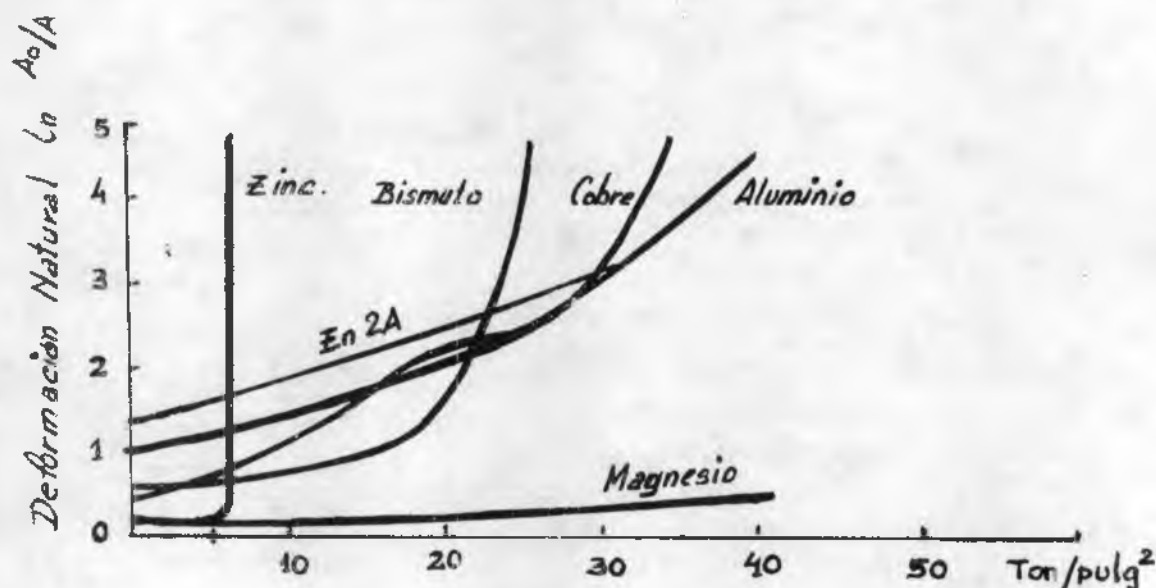
a) Variación del punto de fluencia con la presión :

Parece que esta variación es muy pequeña en metales tales como los aceros, el aluminio y el cobre, en el rango de 0 a 30 Kbars. Es importante en cambio para el magnesio, en el que aumenta del orden

del 300% y para el bismuto, en que aumenta un 1900% y se produce además un cambio de fase.

b) Reducción en área :

Bridgman halló que la deformación natural en el momento de la rotura aumenta en forma casi lineal con el aumento de la presión hidrostática, en el ensayo de tracción de los aceros. En otros metales, el efecto se pueda ver en la figura 1.



— Figura 1 —

c) Transición dúctil-frágil :

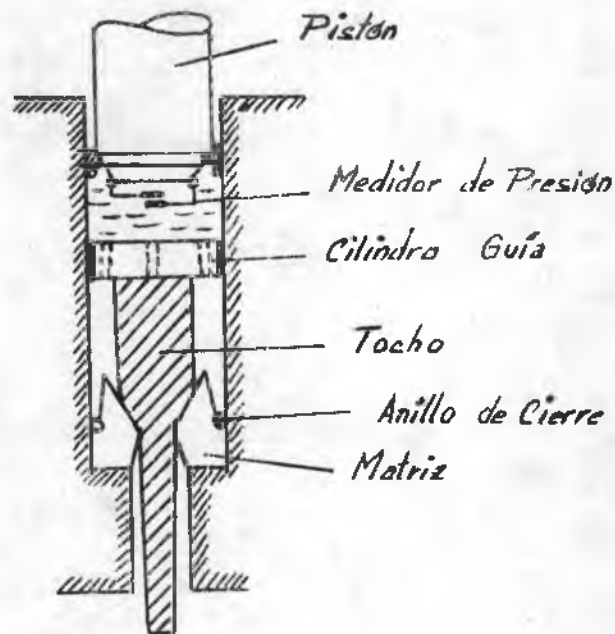
Los materiales cristalinos frágiles pueden experimentar una transición a dúctiles cuando la presión hidrostática alcanza un cierto valor. Es un fenómeno semejante al que se produce con la temperatura. La presión hidrostática de transición es más elevada en tracción que en compresión.

d) Resistencia a la Tracción :

Pugh halló que este valor no es seriamente afectado por cambios importantes en la presión hidrostática. Estos hechos ayudan a explicar el comportamiento de los metales en los distintos procesos en que se ha aplicado una presión simultánea.

Extrusión :

En la figura 2 se ve un esquema de un dispositivo de extrusión de laboratorio.



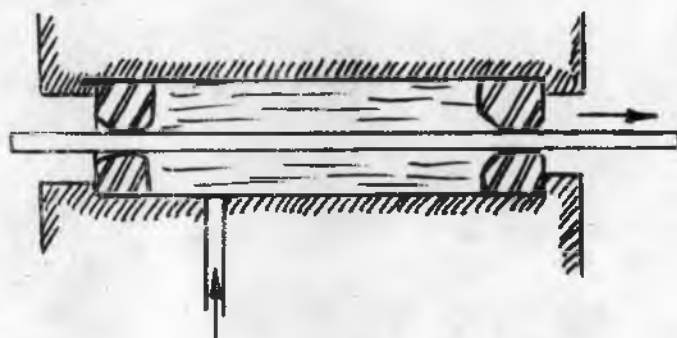
— Figura 2 —

Mediante dispositivos de este tipo se consigue que el fluido transmita la presión que se ejerce con el pistón. De este modo se han logrado reducciones en fuerzas de hasta el 40%. Dada la limitada resistencia de la cámara y del pistón no es todavía posible trabajar secciones demasiado grandes. Puede notarse además que se podría prescindir de la prensa de extrusión, y obtener la presión mediante algún tipo de bomba.

Las mayores reducciones y menores fuerzas necesarias para conseguir las secciones se deben fundamentalmente a que con el fluido se mejoran las características de lubricación entre tocho y matriz. Por lo demás, en materiales dúctiles, la superposición de compresión hidrostática no influye demasiado. Sus mayores ventajas se observan cuando se extruden materiales frágiles en situaciones en que el método convencional falla.

Trefilado de alambres :

La presión se aplica en la forma esquematizada en la figura



— Figura 3 —

En este caso, la primera trefila sólo efectúa una pequeña reducción, a los efectos de garantizar el cierre. Dado que la resistencia a la tracción no varía con el agregado de presión hidrostática, en los metales dúctiles la única mejora introducida está en el efecto de la lubricación. En los materiales frágiles es, sin embargo, la única forma de lograr reducciones de importancia por el aumento de ductilidad que experimentan debido a la presión.

Aquí, como en el caso anterior, el fluido sirve como medio para obtener una compresión hidrostática y como lubricante. No puede por lo tanto ser demasiado viscoso - se perdería hidrostaticidad -, ni demasiado fluído - escaparía por las matrices.

Existen además de éstos, otros procesos, tales como el recalado en los cuales está en plena etapa de desarrollo la aplicación de compresión hidrostática al proceso.

2- ALTAS VELOCIDADES DE DEFORMACION

Lo que se pretende con estos métodos es efectuar trabajo con liberación rápida de energía. De este modo se consigue una potencia muy elevada, como se puede apreciar en la siguiente tabla :

TABLA

Velocidades comparativas de liberación de energía

Proceso	Característica del Equipo	Tiempo (seg)	Potencia Kg m/seg)
Conformado con explosivo RDX	0,118 Kg	$2,5 \times 10^{-5}$	$6,1 \times 10^{11}$
Conformado electrosark	150.000 Joules	4×10^{-4}	39×10^6
Dynapak	15.000 Kgm 3050 cm/seg. Carrera 25 mm	8×10^{-4}	$19,5 \times 10^6$
Forja con Martinete	450 cm/seg. Carrera 25 mm	$5,6 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^6$
Forja con Prensa		0,75	21×10^3

* F.W. Boulger, "Mech. Engineering" Abril 1962 p. 39

El uso de estos métodos de conformado no está aún muy difundido. No existe todavía un trabajo sistemático que establezca con precisión todas las ventajas y las limitaciones de estos métodos.

Según los elementos que se usan para obtener altas velocidades de deformación, se pueden clasificar estos procesos de la siguiente manera :

1. Deformación con explosivos.
2. Métodos mecánico-neumáticos.
3. Métodos eléctricos.

2.1. DEFORMACION CON EXPLOSIVOS

Si bien existen patentes que datan de 1900 en que se auspicia el uso de explosivos en el conformado de piezas metálicas, recién después de la Segunda Guerra Mundial toma impulso este proceso de fabricación. En el mismo, se utiliza el fenómeno de una presión instantánea elevada para producir ondas de tensiones cuyas características dan lugar al efecto deseado.

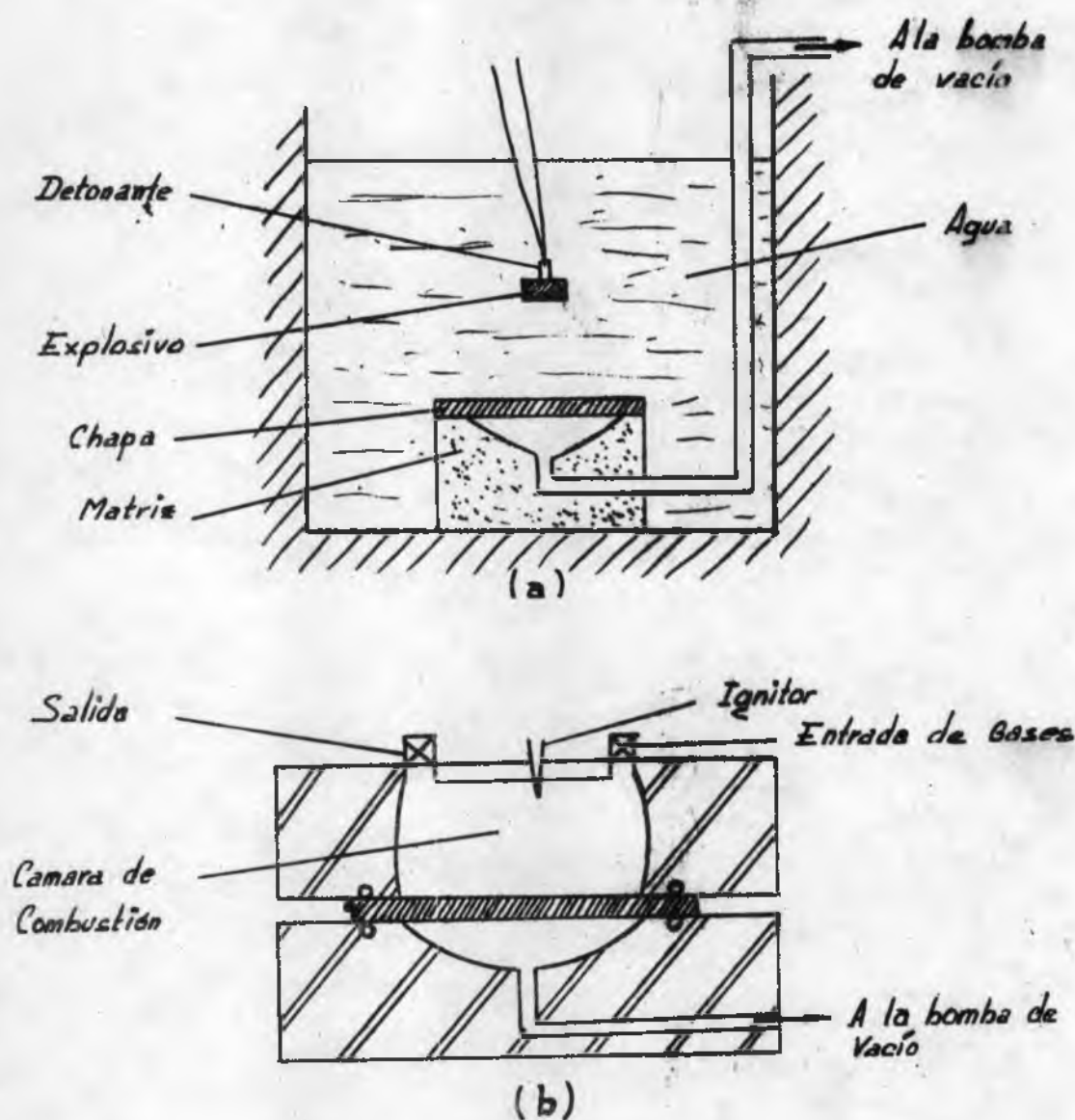
En la deformación con explosivos se pueden usar :

- a) Compuestos altamente explosivos : Son los que dan lugar a una detonación química. La energía se libera en forma rapidísima, del orden de los microsegundos.
- b) Explosivos impulsores : El efecto lo producen por una combustión química sin llegar a detonar. Son los que se usan para fusiles, cañones, etc., en que la presión desarrollada por el explosivo no

debe superar la resistencia del recipiente que lo contiene. La energía se libera en milisegundos.

c) Mezclas gaseosas : La presión se obtiene también mediante una combustión química. Es el caso de una mezcla de H_2 y de O_2 . La energía es liberada en milisegundos.

En la figura 4 se ilustra una operación de estampado. En (a) se usa un compuesto altamente explosivo, mientras que en (b) se puede usar cualquiera de los otros dos tipos.



— Figura 4 —

Cuando se usan explosivos detonantes, se interpone entre éstos y la pieza un medio transmisor de la energía, que puede ser agua, aire, o arena. Es muy importante la distancia entre pieza y explosivo, como así también la geometría de éste. La matriz puede ser de fundición, de hormigón y aún de hielo.

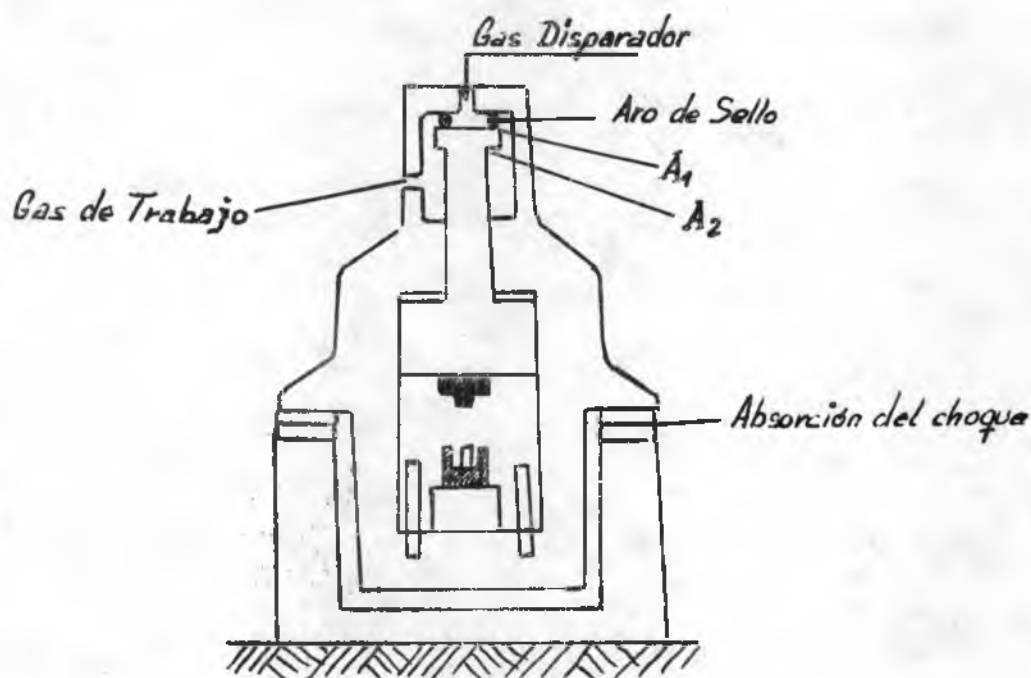
En el caso (b) de la figura 4, debe preverse una cámara de combustión de la suficiente estanqueidad.

La ventaja del conformado con estos métodos reside en los bajos costos que se obtienen cuando se trata de construir piezas de grandes dimensiones en series pequeñas. Esto no excluye su utilización en piezas pequeñas. Debe pensarse que en estos procesos se evita la fabricación del punzón, que puede ser de una complejidad y de un costo considerables.

Se usan explosivos también para soldar piezas y para endurecer algunos aceros por el efecto de las ondas de tensión en los materiales con un gran endurecimiento por deformación.

2.2. MÉTODOS MECANICO-NEUMATICOS ("dynapak")

Consisten en la liberación de una potencia elevada por la expansión rápida de un gas comprimido. En la figura 5 se puede ver un esquema de una prensa rápida que trabaja de este modo



— Figura 5 —

La presión del gas de trabajo (puede ser N_2 a 140 atm) mantiene a la maza en la parte superior mientras se introduce la pieza. El gas está actuando sobre el área inferior del pistón, A_2 . Por la acción del gas disparador, el gas de trabajo puede actuar también sobre la cara superior, A_1 , cuya área es mayor que A_2 , por lo cual el pistón desciende rápidamente. De esta manera se pueden alcanzar velocidades del orden de 60 m/seg. La energía adquirida por la velocidad permite reducir el peso del equipo. Así, por ejemplo, una maza de aproximadamente 300 Kg. operando a 80 m/seg, efectúa el mismo trabajo que un martinete de 8000 Kg.

Este principio se ha aplicado industrialmente a la forja en matrices cerradas, a la extrusión y al conformado de chapas.

2.3. MÉTODOS ELÉCTRICOS

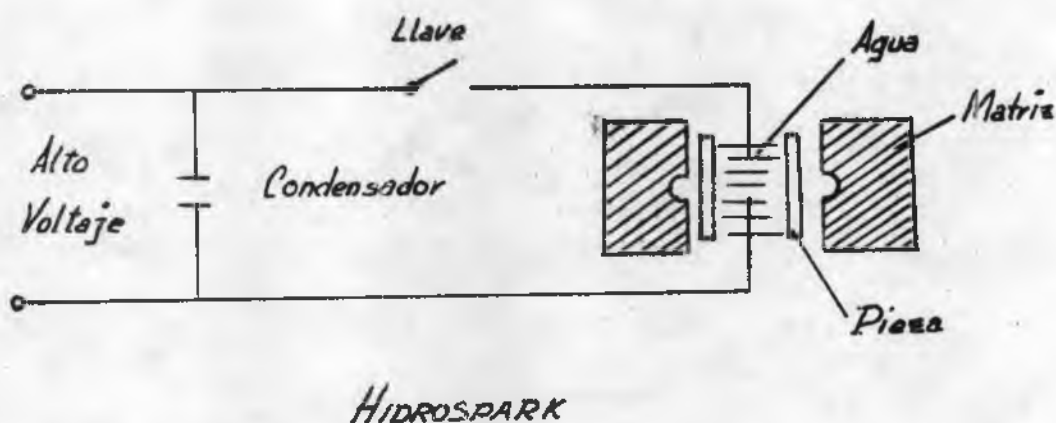
En estos procesos una descarga eléctrica convierte a la energía almacenada en condensadores de alto voltaje, en energía mecánica. Esta se produce en la forma de un pulso de alta presión.

La conversión de energía se puede hacer de la siguiente manera :

- Descarga de una chispa en un arco sumergido.
- Explosión de un filamento sumergido.
- Pulsando la corriente de un condensador a través de una bobina para producir un cambio brusco en el campo magnético que a su vez está acoplado inductivamente con la pieza.

Los dos primeros procesos se suelen denominar también "hydrosark", y el tercero, conformado electromagnético.

En la figura 6 se representa el principio de funcionamiento de estos sistemas



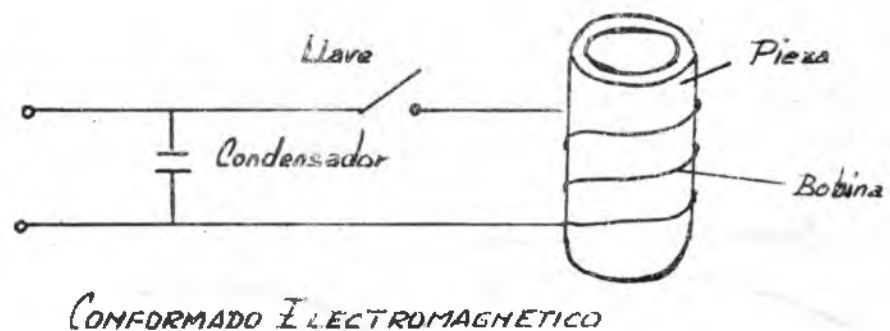


Figura 6

La energía que se almacena en un condensador es $E = C V^2/2$. Los voltajes no suelen ser demasiado elevados. Generalmente oscilan en el rango comprendido entre 5 y 15 Kv. La energía se libera en alrededor de un microsegundo.

En la descarga de chispa, la elevada energía convierte al agua en plasma. El gran pulso de presión realiza el trabajo.

En el conformado por métodos magnéticos se hace uso de la inductancia mutua de dos bobinas eléctricas cuyos campos se superponen. Un cambio rápido en la inductancia de una de ellas puede dar origen a fuerzas elevadas en la otra. Normalmente, la pieza a trabajar es la segunda bobina que entra en juego. Este método se aplica fundamentalmente a piezas tubulares, por la facilidad de diseño de la bobina primaria.

APLICACION DEL ULTRASONIDO A LOS PROCESOS DE CONFORMADO

En 1955, Blaha y Langenecker hallaron que la influencia de ondas ultrasónicas en la estructura cristalina de los metales produce un efecto de ablandamiento. En efecto, comprobaron que una serie de monocristales de Zn expuesto a ondas ultrasónicas de baja amplitud, perdían hasta el 30% de su resistencia a la deformación.

Ello motivó una intensificación del estudio de la influencia de las ondas de ultrasonido en las propiedades elásticas y plásticas de los materiales. Se llegaron a obtener de este modo resultados como los que se ilustran en la figura 7.

FE DE ERRATAS - FASCICULO III

Pág.	Renglón	Donde dice:	Debe decir:
2 3	11 36	<u>PUNTO 15</u> proceso extrusión (punzonado)	procesos extrusión o punzonado
2 3 6 12 13 18 20 20 26 33 36 37 45	23 4 9 1 5 11 6 15 2 2 10 26 27	<u>PUNTO 16</u> monocristal grano figura 2a. casqueta mostrando $\mu = A_R \bar{\epsilon}_r / A_R H = \bar{\epsilon}_r / H$ menos superficial VALORES DE PARA ángulo máquinas absorbente desgastadas encogida	monocristal grano (figura 2a.) casquete. mostrado $\mu = A_R \bar{\epsilon}_r / A_R H = \bar{\epsilon}_r / H$ menor superficial VALORES DE μ PARA ángulo α máquinas absorbente desgasadas escogida
3 4 7 9 12 13 13 14	38 31 8 10 31 10 14 12	<u>PUNTO 18</u> lo 0,3 mm formar material una mayor corte a pasar a pasar mayores tenezas	los 0,3 mm deformar material un mayor corta a pasar mayor tenazas