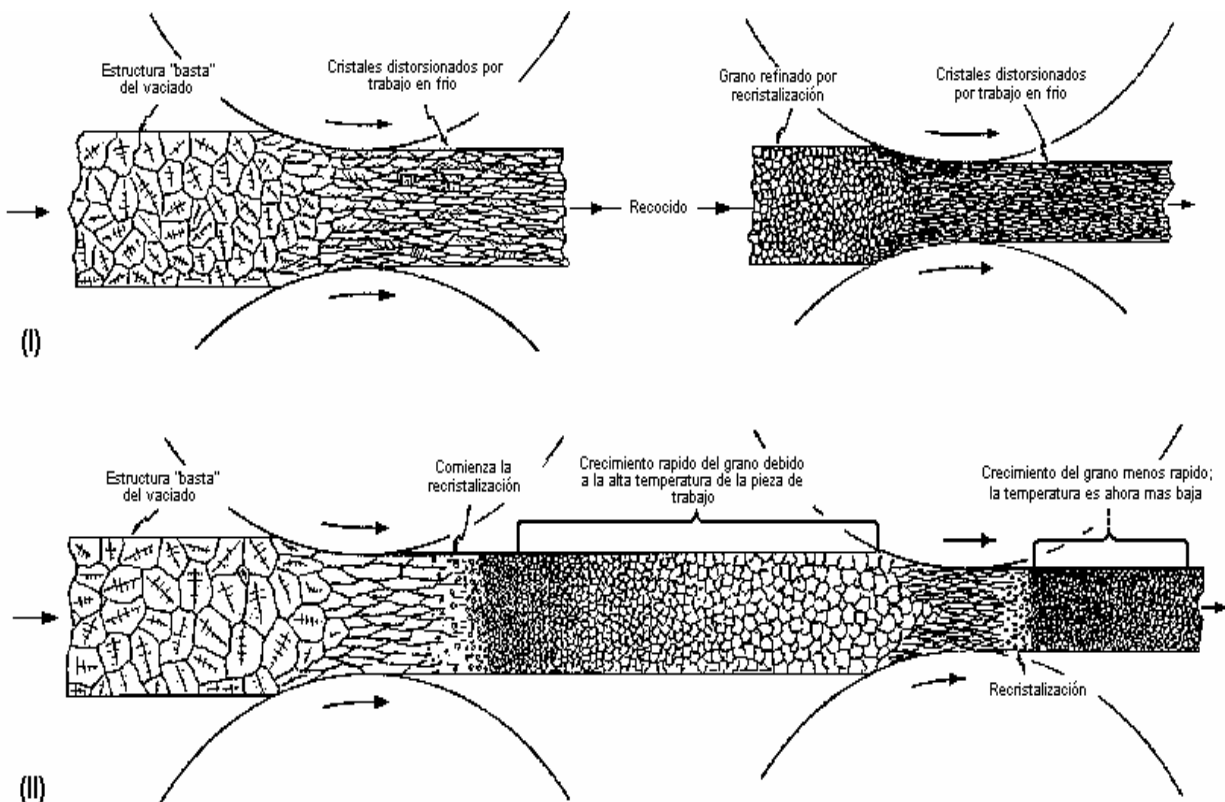


## CAPÍTULO 24: CONFORMADO PLÁSTICO DE METALES

### 24.1. INTRODUCCIÓN

Este concepto engloba a todos los procesos que permiten cambiar la forma de la masa de material metálico en el estado sólido (no como la fundición) por deformación plástica, o sea, sin sacar viruta como en el maquinado mecánico.

Estas operaciones se realizan por lo menos por dos razones. Un objetivo es producir una forma deseada y el segundo es mejorar las propiedades del material a través de la alteración de la distribución de microconstituyentes, afinamiento del tamaño del grano e introducción de endurecimiento por deformación (Figura 1)



**Figura 1:** Cambios microestructurales producidos en distintos procesos de conformado plástico.

Los procesos de elaboración plástica que están destinados a reducir lingotes a una forma simple tal como planchón, tocho, barra o plancha reciben el nombre de procesos de conformado primarios. Métodos de conformado que producen formas finales se llaman procesos secundarios o de fabricación.



Un propósito importante de las operaciones primarias es destruir y refinar la estructura dendrítica de colada presente en aleaciones coladas o de fundición. Frecuentemente la baja resistencia y ductilidad de fundiciones se debe a la presencia de micro constituyentes frágiles en los bordes de grano y espacios interdendríticos. Por deformación en compresión es a veces posible fragmentar un microconstituyente frágil de tal manera que la matriz dúctil fluya entre los espacios de los fragmentos y se suelde para dejar una estructura perfectamente sana. Una vez que el microconstituyente es fragmentado, su efecto sobre las propiedades mecánicas es menor y la ductilidad y resistencia se ve incrementada. La forja y laminación en caliente se usa ordinariamente para estos propósitos.

## **24.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS PROCESOS DE CONFORMADO**

Los procesos de conformado se clasifican en deformación en caliente y en frío. Se define como trabajado en caliente a la deformación que se realiza bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación tales que el material no se endurece por deformación. En el trabajo en caliente el endurecimiento por deformación es eliminado muy rápidamente por la formación de nuevos granos libres de deformación como resultado de la recrystalización. Es posible lograr deformaciones muy grandes debido a que la recrystalización es simultánea a la deformación. También la energía requerida para el trabajo es mucho menor para las operaciones en caliente que para el trabajo en frío.

Como durante el trabajado en frío el endurecimiento por deformación no es aliviado por recrystalización, el esfuerzo de fluencia del material aumenta con la deformación. Luego la deformación total posible de obtener sin producir fractura es mucho menor al trabajar en frío que en caliente, salvo que el efecto del trabajado en frío sea eliminado por recocido intermedio.

Es importante tener presente que la diferencia entre trabajo en frío y en caliente no depende de cualquier temperatura arbitraria. Para la mayoría de las aleaciones comerciales la operación en caliente debe realizarse a temperatura relativamente altas para obtener una velocidad rápida de recrystalización. Sin embargo, el plomo y el estaño recrystalizan rápidamente a temperatura ambiente después de grandes deformaciones, de tal modo que trabajar estos metales a temperatura ambiente constituye deformar en caliente. Similarmente, el rango de temperatura del trabajado en caliente del acero (1000°C) corresponde a un trabajo en frío para el tungsteno, debido a que este metal de alto punto de fusión tiene una temperatura de recrystalización que está por encima de esa temperatura de trabajo.

**Trabajo en Caliente:** La primera etapa de la elaboración mecánica de los metales suele ser el trabajo en caliente. A las temperaturas a que se realiza no sólo es menor la energía necesaria para deformar el metal y mayor la facilidad para que fluya sin agrietarse, sino que, además, la difusión es rápida y facilita la homogeneización química de las estructuras de colada. Las sopladuras y los rechupes internos se eliminan por soldadura al aplastarse estas cavidades y los granos columnares se destruyen y se



afinan al recrystalizar en granos equiáxicos más pequeños. Todas estas modificaciones producidas por el trabajo en caliente mejoran la ductilidad y la tenacidad con respecto al estado bruto de colada.

El trabajo en caliente no deja de presentar desventajas. Como suele realizarse a temperaturas altas, constituyen un grave problema las reacciones de la superficie del metal con la atmósfera. Ordinariamente el trabajo en caliente se realiza al aire y se pierde una considerable cantidad de metal por oxidación. Los metales muy reactivos, como el molibdeno, se fragilizan intensamente por la acción del oxígeno y es necesario trabajar en atmósfera inerte o encamisando el metal para mantenerlo fuera del contacto del aire. La descarburación del acero puede ser un problema importante y es frecuente tener que eliminar las capas descarburadas durante el trabajo en caliente. La incrustación del óxido en el metal durante la operación perjudica a la calidad superficial de los productos laminados en caliente, y como es necesario admitir tolerancias para las dilataciones y contracciones, es inevitable que los productos acabados en caliente tengan dimensiones más variables que los terminados en frío. La deformación es siempre más intensa en la superficie por lo que el metal de las capas superficiales suele tener grano más fino que el del centro. Como el interior permanece más tiempo a temperatura elevada durante el enfriamiento de una pieza, puede producirse en el interior un crecimiento de grano al enfriar hasta la temperatura ambiente desde la temperatura de trabajo.

La temperatura inferior de trabajo en caliente es la más baja a la que aún es suficientemente rápida la recrystalización para que pueda desaparecer el endurecimiento por deformación durante el tiempo a que dicha temperatura se mantiene. La temperatura inferior de trabajo en caliente de un metal o aleación determinados depende de variables tales como la magnitud de la deformación y el tiempo de permanencia a dicha temperatura. Cuanto mayor es la magnitud de la deformación, más baja es la temperatura de recrystalización y, por lo tanto, también será más baja la temperatura inferior de trabajo en caliente. Un metal que se deforma y se enfría rápidamente requerirá temperatura inferior de trabajo en caliente más elevada que si se deformase con lentitud y se dejase enfriar despacio.

El límite superior de trabajo en caliente está determinado por la temperatura a que se produce fusión incipiente o se hace intolerable la oxidación. Suele tomarse como temperatura superior de trabajo en caliente una inferior al punto de fusión en, aproximadamente 100°C. Con este margen se elimina la posibilidad de que se produzca la fusión de regiones segregadas de punto de fusión más bajo. Basta una delgadísima película de un constituyente de bajo punto de fusión en los límites de grano para que el metal se desmorone en trozos al deformarse. Tal condición se llama fragilidad en caliente y se dice que el metal se ha quemado.

La mayoría de las operaciones de trabajo en caliente se llevan a cabo en varias etapas o pasos. La temperatura de trabajo se mantiene en los pasos intermedios claramente por encima de la temperatura mínima de trabajo, para aprovechar la ventaja del valor más pequeño del límite elástico. Es posible que a estas temperaturas se produzca algún engrosamiento de grano.

Como suele preferirse que los productos acabados sean de grano fino, la última etapa de trabajo se realiza a la temperatura inferior de trabajo en caliente para que el crecimiento de grano durante el enfriamiento sea despreciable. Esta temperatura de acabado suele estar justamente por encima de la temperatura mínima de recristalización. Para asegurarse de que el grano del producto terminado será fino se suele dar una elevada deformación en esta última operación.

**Trabajo en Frío:** Como se ha indicado anteriormente, el trabajo en frío acarrea un aumento en la resistencia mecánica y una disminución en la ductilidad. Si se trabaja en frío excesivamente, el metal puede romperse antes de alcanzar la forma y tamaño finales que se desean. Por esta razón, el trabajo en frío suele realizarse en varias etapas intercalando entre ellas recocidos intermedios que ablanden el metal deformado en frío y restauren la ductilidad. La sucesión de trabajo en frío-recocido intermedio se llama ciclo de trabajo. En la figura 2 se muestran esquemáticamente las variaciones de propiedades que se producen en cada uno de estos ciclos.

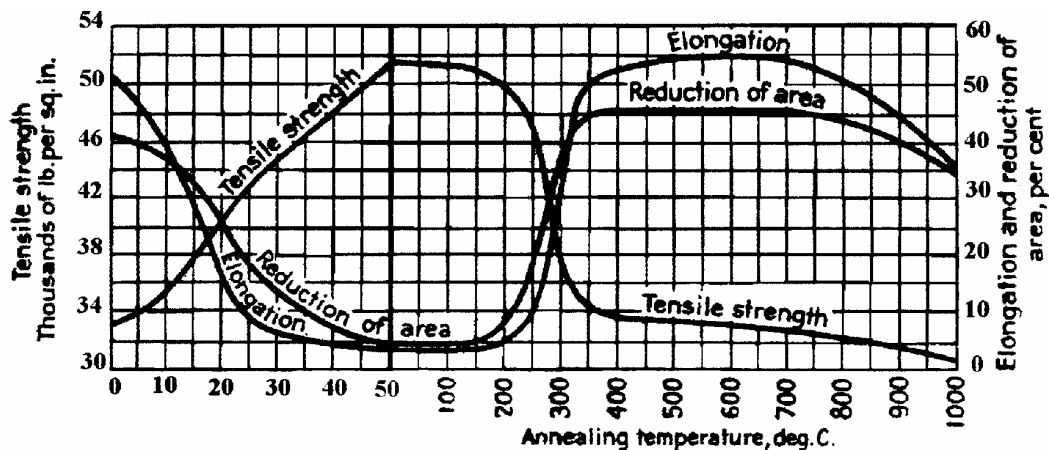


Figura 2: Variaciones de la propiedades con los ciclos de trabajo

Aunque la necesidad de los recocidos intermedios aumenta el costo de la conformación en frío, especialmente cuando se trata de metales reactivos que han de calentarse en atmósferas inertes o en el vacío, el trabajo en frío tiene una flexibilidad de la que carece el trabajo en caliente. Ajustando convenientemente el ciclo de trabajo en frío y recocido se pueden obtener piezas con cualquier grado de endurecimiento por deformación. Si la pieza acabada debe tener una resistencia más alta que la correspondiente al estado de recocido, la etapa final será una operación de trabajo en frío que produzca la cantidad de deformación necesaria para alcanzar la resistencia deseada. Este último trabajo en frío sería posible seguido por un tratamiento de eliminación de tensiones para hacer desaparecer las residuales. Esta forma de conseguir las propiedades mecánicas elegidas en el producto final es de mejor resultado que el inverso, es decir, hacer un recocido parcial del producto endurecido fuertemente por el trabajo en frío, porque la recristalización es relativamente rápida y muy sensible a las pequeñas fluctuaciones de la temperatura del horno. Cuando se desea obtener la pieza acabada en el estado más

blando posible, ha de terminarse con un recocido a fondo después de la última operación de trabajado en frío.

Los productos del trabajo en frío, tales como el fleje y el alambre, se suelen producir con distintos grados de dureza (tempers), que dependen de la magnitud de la reducción en frío posterior al último recocido. Estas condiciones de los productos suelen describirse como blando o recocido (annealed temper, soft temper), cuarto duro (1/4 hard), medio duro (1/2 hard), tres cuartos duro (3/4 hard), duro (full-hard) y dureza de resorte (spring temper). Cada grado de dureza (temper) indica un tanto por ciento diferente de reducción en frío después del tratamiento de recocido.

Temple: en inglés, quench (apagar, extinguir) se emplea para "enfriar bruscamente", y por extensión, en el caso del acero, para endurecer (harden) por enfriamiento brusco"; en castellano traducimos las dos acciones por templar, palabra que aplicamos tanto a enfriar bruscamente cualquier metal como a endurecer el acero por enfriamiento brusco. El ablandamiento del acero templado por calentamiento es en castellano el revenido y en inglés el tempering. Es decir, entendemos temper por "ablandar".

### **24.3. DESCRIPCIÓN DE ALGUNAS OPERACIONES DE CONFORMADO**

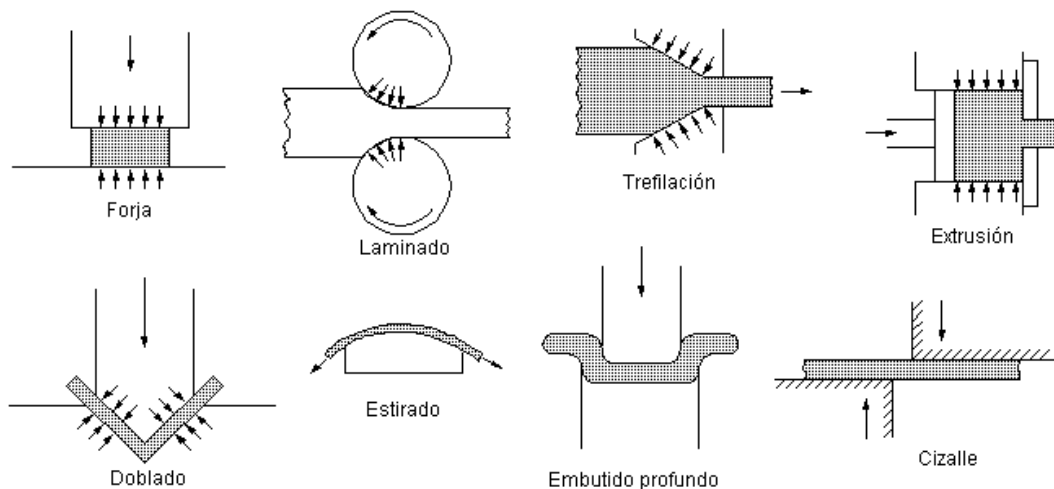
En la figura 3 están representados esquemáticamente las principales operaciones de conformado.

Estas se pueden clasificar según los esfuerzos aplicados sobre el material, como sigue:

Procesos de compresión directa : Forja, laminado

Procesos de composición indirecta : trefilado, extrusión, embutido

Procesos tipo tracción : estirado



**Figura 3:** operaciones típicas de conformado plástico de metales

**Forjado:** En una operación que siempre se realiza en caliente. Los equipos empleados son desde el martillo del herrero pasando por el martinete mecánico e hidráulico hasta las prensas (Figura 4).

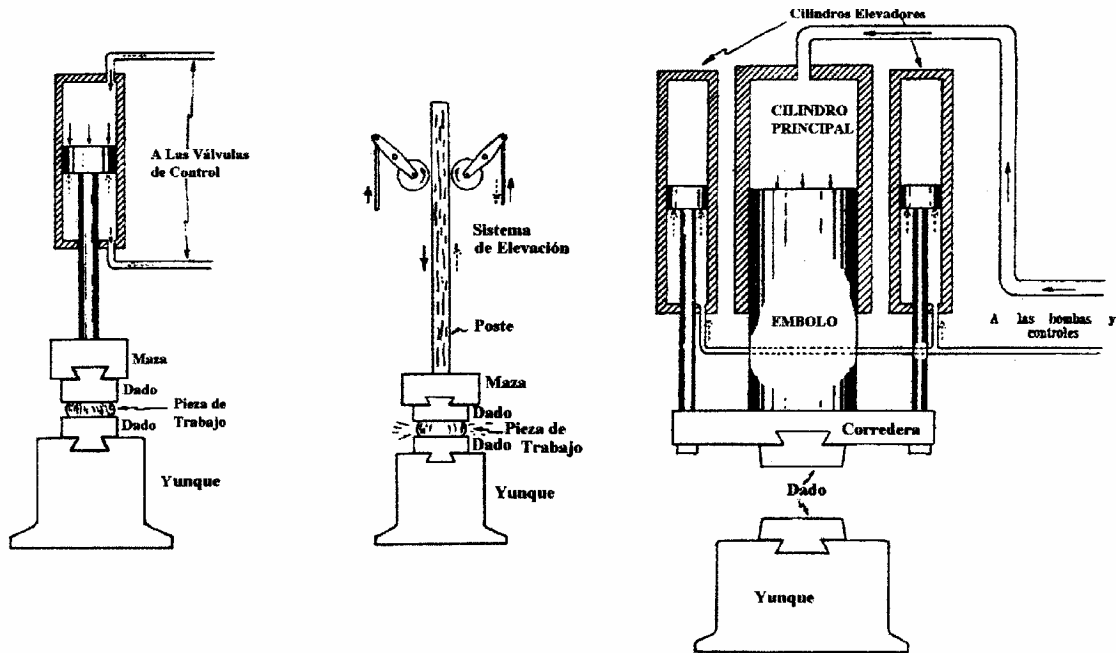


Figura 4: Equipos empleados en la forja

También se puede clasificar en procesos de forja abierta y en dados o matrices. Algunos ejemplos se pueden observar en las figuras 5 y 6.

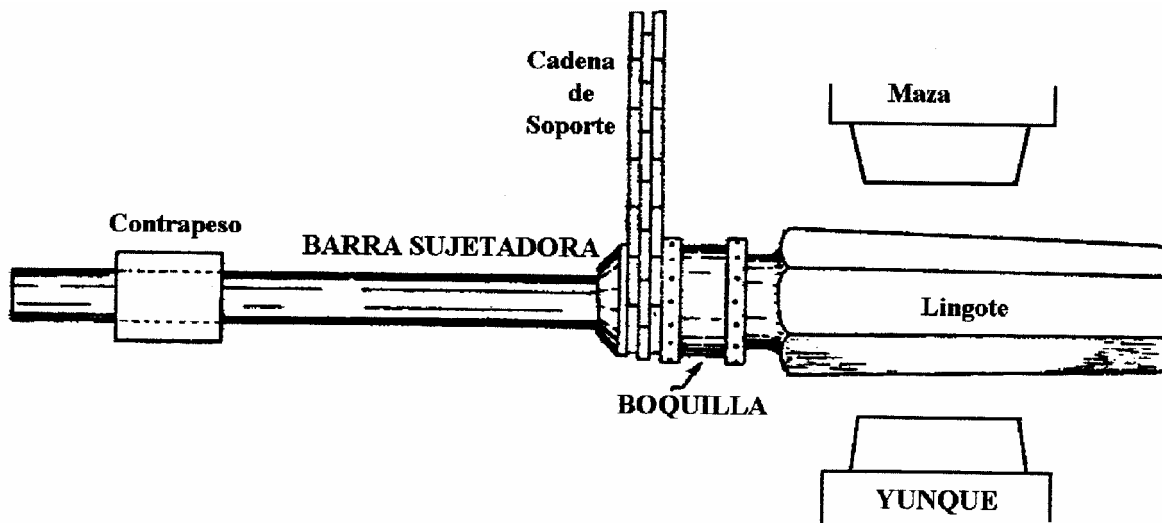
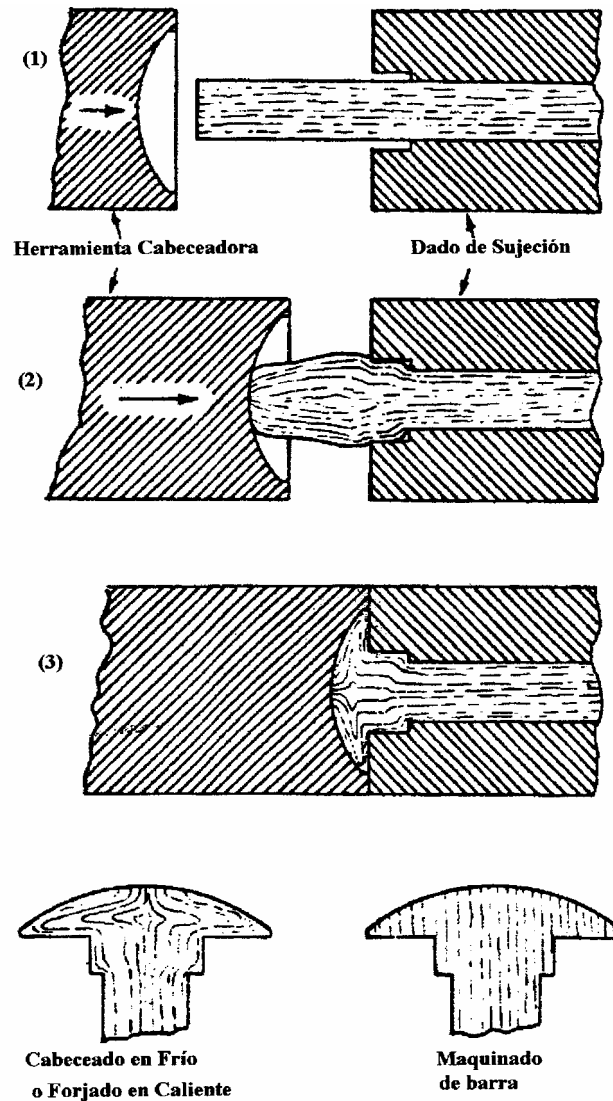
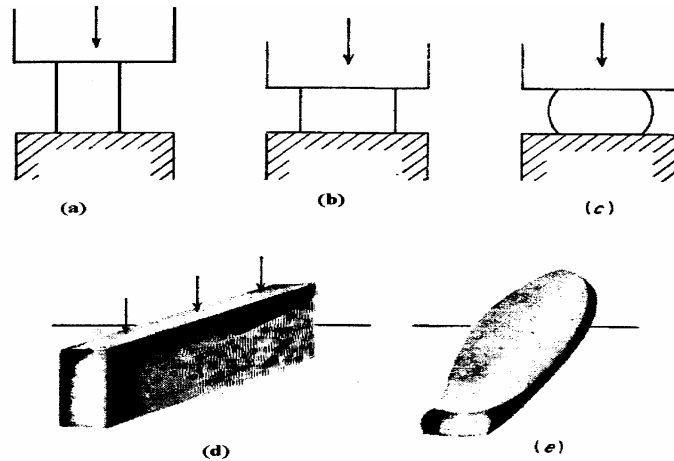


Figura 5: Rebajado de un lingote grande



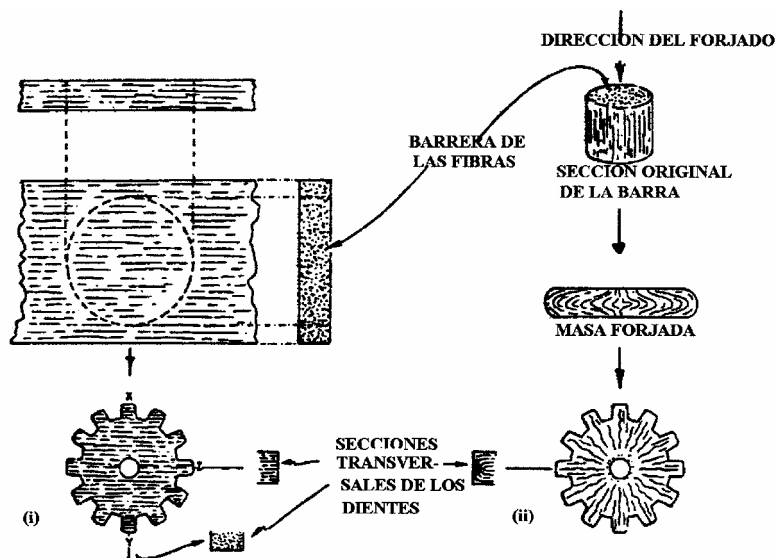
**Figura 6:** Formación de la cabeza de un perno por el proceso de forjado en caliente.

Un problema en la forja abierta o libre es el efecto “barril” que consiste en un ensanchamiento mayor de la pieza en el centro que en la parte adyacente a la superficie de los platos de forja, debido a que el roce interfiere con el libre flujo del material en esa superficie, esto puede apreciarse en la figura 7.



**Figura 7:** Efecto barril en un proceso de forja

Otro efecto metalúrgico digno de destacarse es la redistribución de las inclusiones no metálicas (óxido de aluminio, silicato de la escoria, sulfuro de manganeso, etc.) presentes en el lingote. Cualquiera de estas impurezas se alargan con la pieza en la dirección del flujo del material. En esta forma las impurezas adquieren una distribución fibrosa similar al grano de madera, por lo que respecta a la direccionalidad. Igual que en el caso de la madera, las propiedades son mejores en la dirección de las fibras y peores en la dirección transversal de ellas. Por lo tanto, es importante en el diseño de una forja el asegurarse que las fibras fluyan en la dirección en que se requiera máxima resistencia. Las figuras ilustran la ventaja del forjado versus maquinado en varias piezas debido a estas inclusiones fibradas.

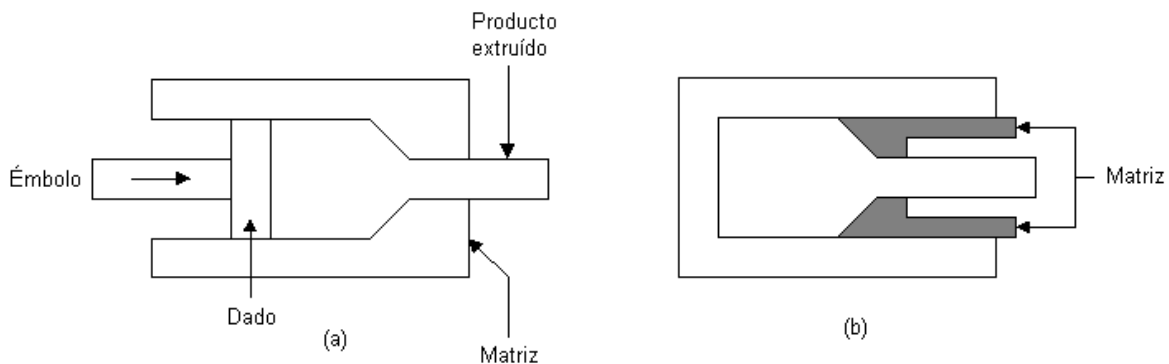


**Figura 8:** (i) Engranaje mecanizado partiendo de una placa laminada, mostrando debilidad de los dientes en la región de X e Y, (ii) Engranaje mecanizado partiendo de una masa forjada, las líneas de flujo dan máxima resistencia a los dientes.



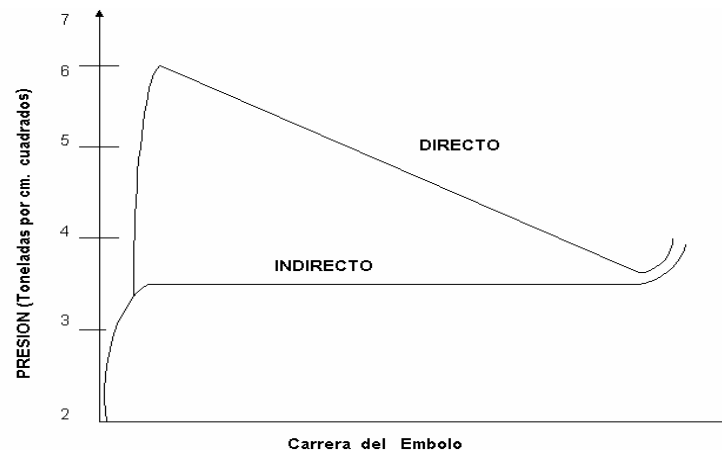
**Extrusión:** Operación que se realiza calentando un lingote a una temperatura adecuada, colocándola en un recipiente y luego forzándolo a través de un orificio por la aplicación de presión de un émbolo movido hidráulicamente para producir una barra o tubo de perfiles. Inicialmente en 1797 se usaba para producir tubos de plomo. Luego en 1894 se extendió a los latones y sólo recientemente se ha podido desarrollar para aceros. En nuestro país MADECO fabrica los tubos de cobre y los perfiles de aluminio para marcos de ventanas y otros usos con esta operación.

La figura 9 muestra esquemáticamente los dos métodos empleados. La extrusión directa y la indirecta. Cada una tiene sus ventajas y desventajas una respecto a la otra.

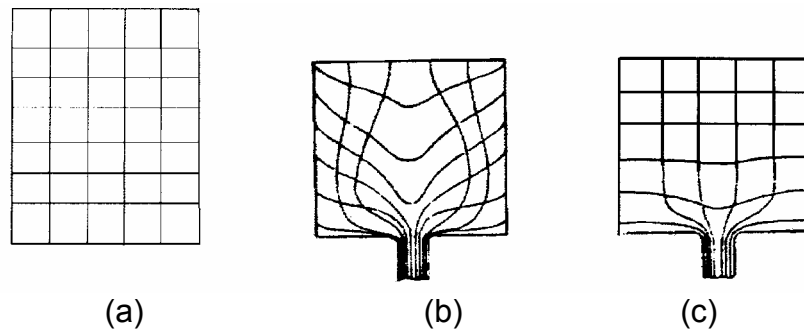


**Figura 9:** Principio de los métodos (a) directo y (b) indirecto de extrusión

En la directa se puede aplicar mayor fuerza pero requiere un esfuerzo más grande debido a que hay que vencer el roce entre el lingote y las paredes del recipiente ya que ambos se desplazan mutuamente, lo que no es el caso en la indirecta (Figura 10).

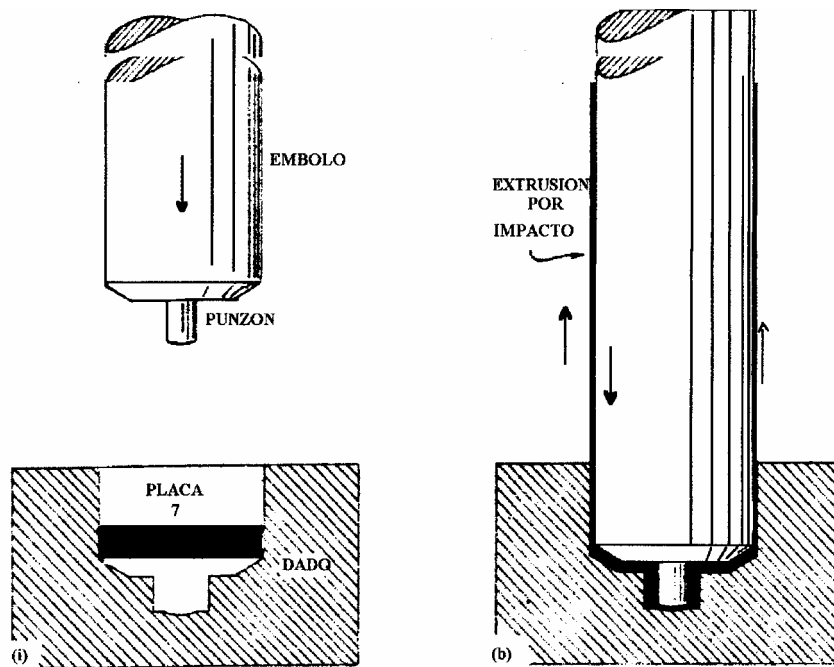


**Figura 10:** Variación de la presión durante la extrusión directa e indirecta.

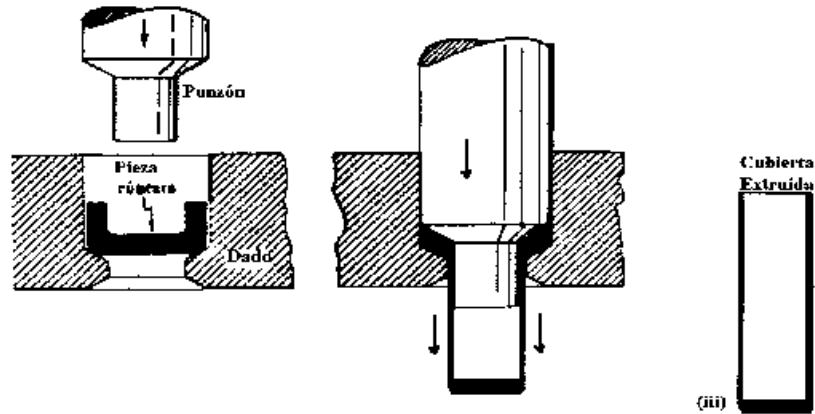


**Figura 11:** (a) El lingote antes de la extrusión, (b) lingote durante la extrusión directa y (c) lingote durante la extrusión indirecta.

Otra aplicación interesante son las operaciones de extrusión por impacto mostradas en las figuras 12 y 13.

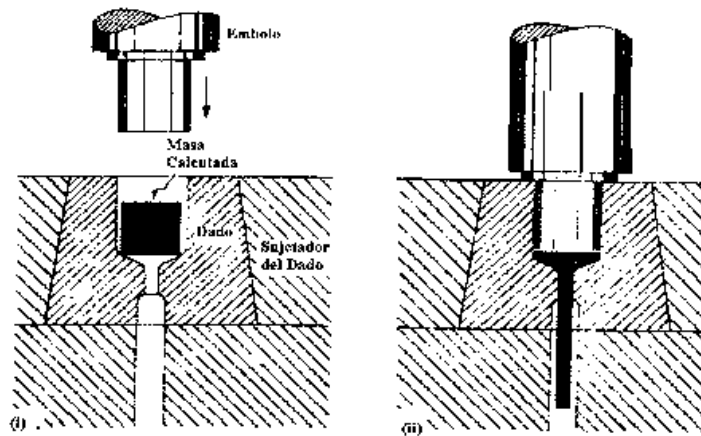


**Figura 12:** Extrusión por impacto



**Figura 13:** Extrusión de impacto por el proceso Hooker.

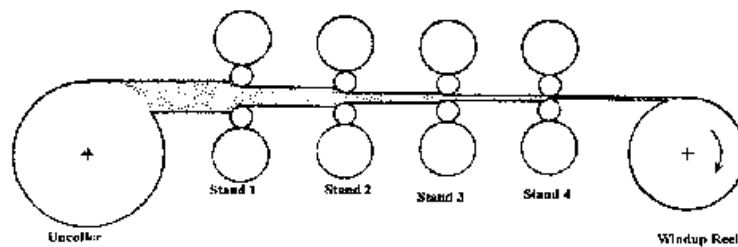
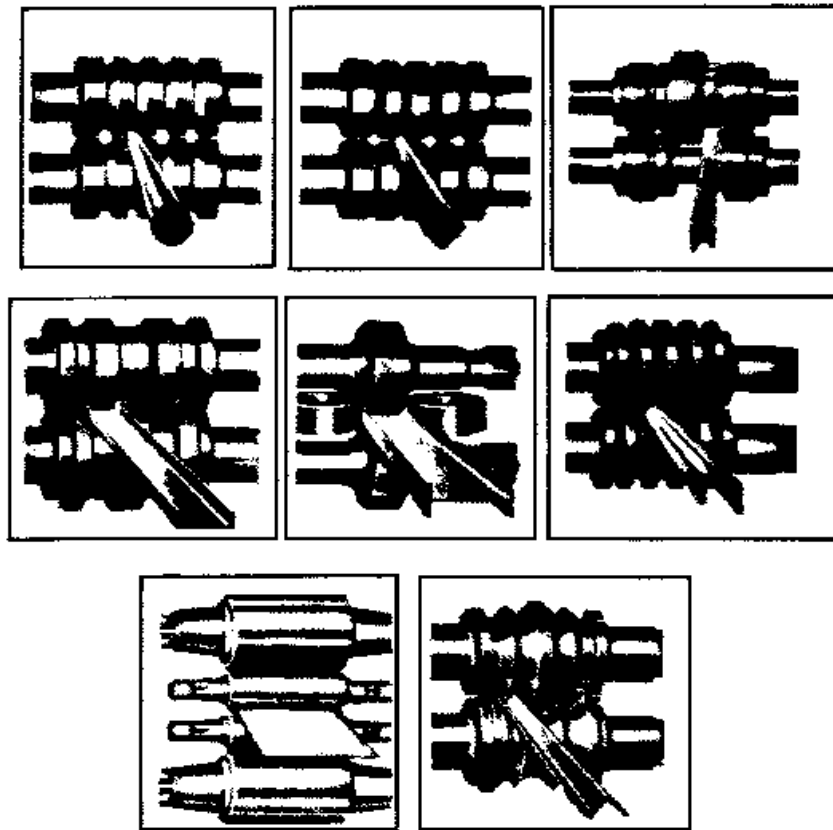
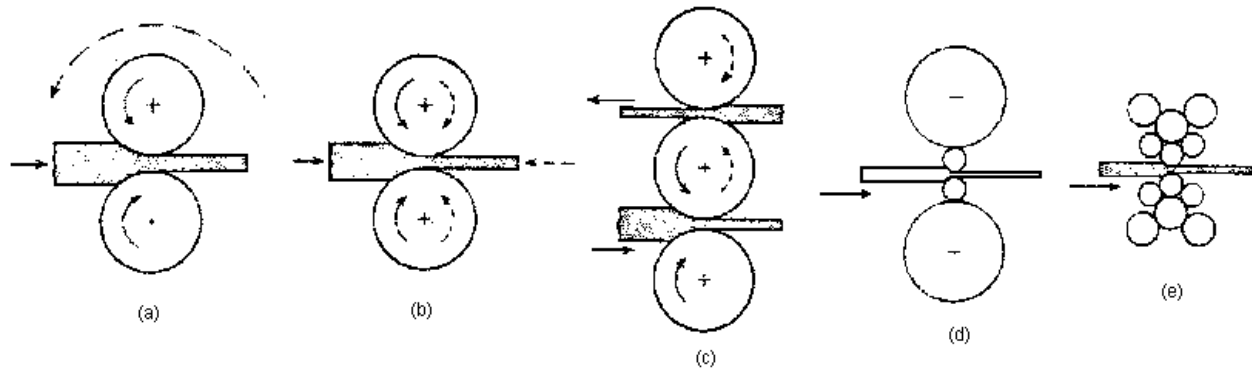
Otra aplicación es la extrusión por forja que se muestra en la figura 14.



**Figura 14:** Extrusión por forja de una válvula.

**Laminación:** Es el método más barato y más eficiente para reducir el área transversal de una pieza de material de modo que el espesor final sea uniforme a lo largo de todo el producto. Más que área es prácticamente sólo el espesor el que se reduce, pues el ensanchamiento (aprox. 5%) está restringido por la continuidad entre material de la pieza que ya salió de entre los rodillos y el que aún no entra.

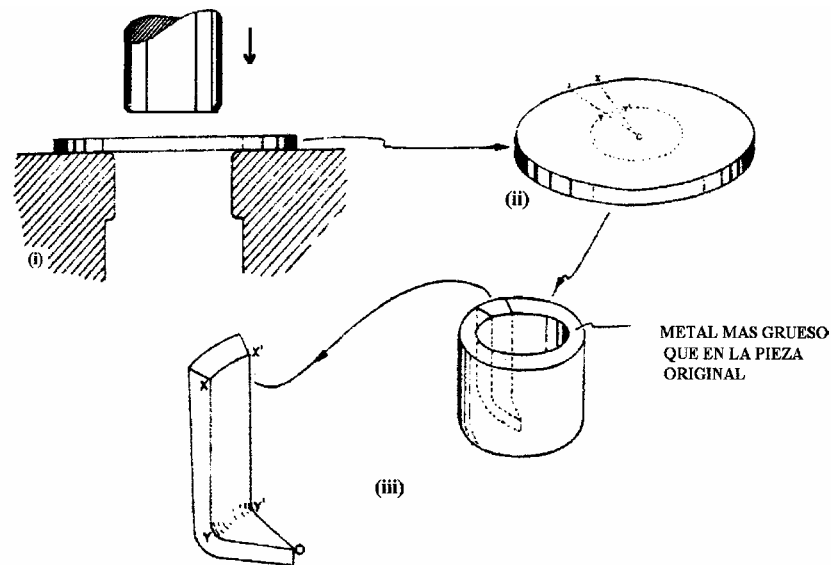
Existen varias disposiciones para aumentar la productividad del laminador, las que se indican en los esquemas más abajo en la figura 15.



**Figura 15:** Disposición de los cilindros en varios tipos de trenes laminadores.

**Operaciones en Frío:** Fuera de la laminación de planchas tenemos en este grupo el trefilado de barras, tubos y alambre y el conformado de chapas delgadas como ser, el punzonado, estirado, doblado y embutido profundo o acoplado.

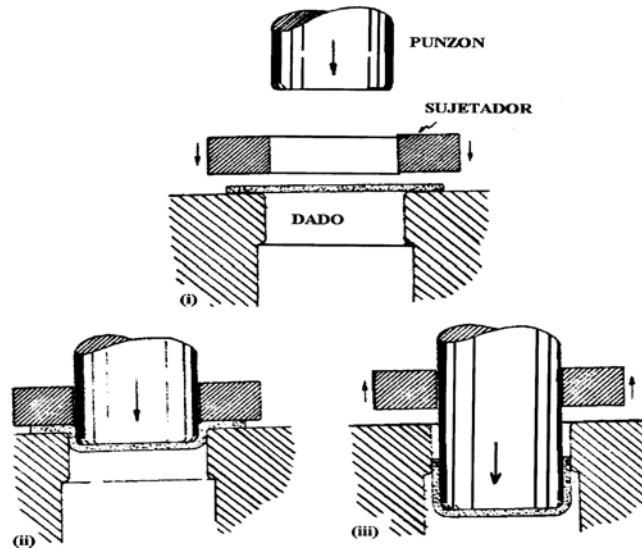
**Embutido Profundo:** Consiste en formar un vaso o copa a partir de una lámina circular que se fuerza por una abertura por medio de un punzón cuyo diámetro es menor que la abertura de la matriz. En la forma original del disco metálico, el círculo de radio OY está en contacto con la cara inferior del punzón durante el embutido y el metal en esta área estará tensionado durante el proceso. Así pues, en el vaso acabado la longitud del arco YY' es la misma que en la forma original (Figura 16).



**Figura 16:** Flujo del metal durante la formación de un vaso.

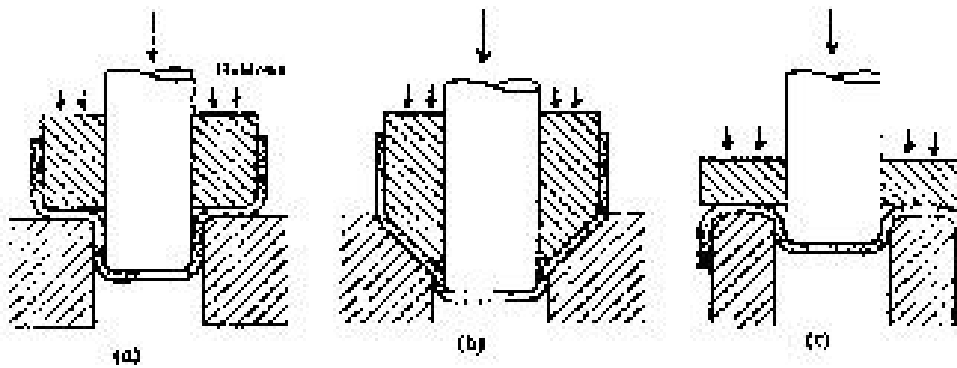
La longitud del arco  $XX'$  del arco original, por otra parte, se ha reducido de manera que es el mismo que  $YY'$ . Por lo tanto, durante el estampado, la parte de la forma entre  $YY'$  y  $XX'$ , especialmente más cerca de  $XX'$  se encontrará en compresión y así presentará tendencia a ondularse si no tuviera soporte llamado sujetador o apretachapas (figura 17).

La profundidad del vaso posible de hacer en una sola operación depende de la resistencia a la tracción y espesor del metal. La presión del sujetador debe mantenerse al mínimo necesario para evitar la ondulación y la fricción debe reducirse al mínimo utilizando matrices y punzones con las superficies lo más suave posible y utilizando la lubricación adecuada.

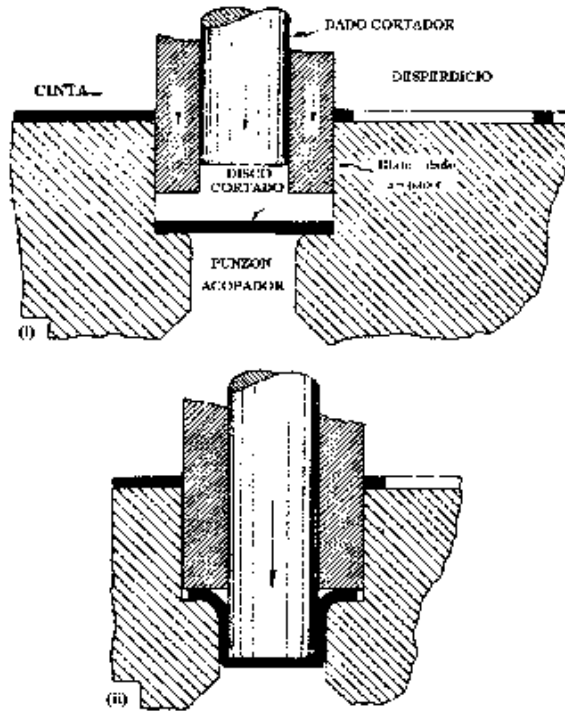


**Figura 17:** Proceso simple para la formación de una copa con sujetador

Generalmente cuando la profundidad del estampado excede al radio del punzón, será necesario una o más operaciones de reestampado (figura 18). Antes de ser reestampado el vaso se debe recocer, luego decapar para eliminar el óxido y finalmente lavarse, secarse y lubricarse.



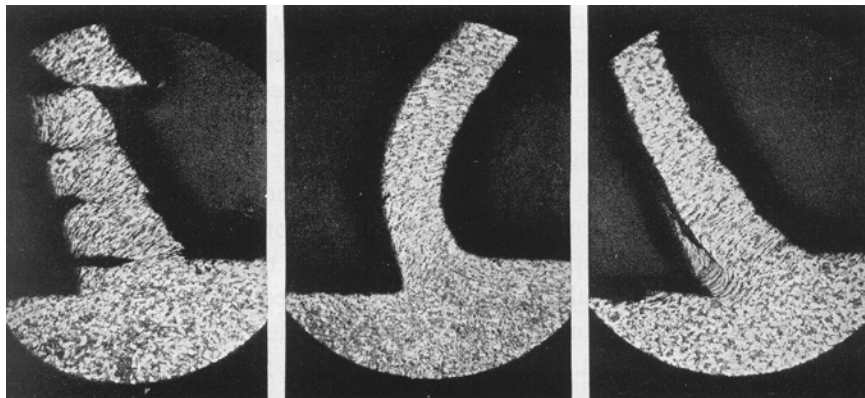
**Figura 18:** Operaciones de reestampado.



**Figura 19:** Prensa de doble acción con herramienta de combinación

#### 24.4. MAQUINABILIDAD DE LOS METALES Y SUS ALEACIONES

A pesar que el maquinado es una operación eminentemente mecánica la maquinabilidad es una propiedad del material. En el maquinado, una punta o arista dura y filuda deforma el metal removiéndolo en forma de viruta. Esta viruta puede ser larga y deformada y corta, tal como en las fotos de la figura 20.



**Figura 20:** Distintos tipos de virutas

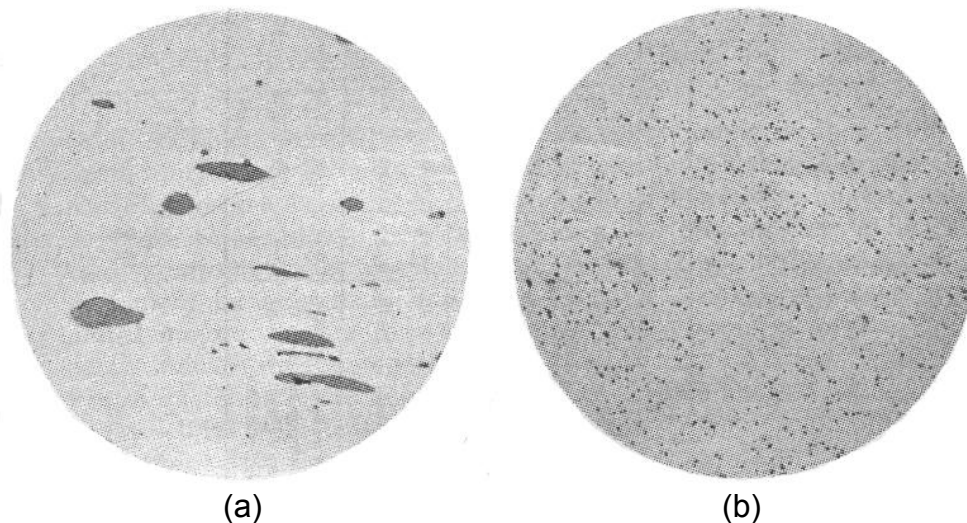
La temperatura en la punta de la herramienta sube rápidamente durante el maquinado, pudiendo alcanzar 600°C en algunos casos.

La maquinabilidad se mide como la cantidad de viruta que puede ser removida en un cierto tiempo.

Una aleación frágil será más adecuada para el maquinado que otra dúctil. Pero un material frágil generalmente es inadecuado para el servicio. Sin embargo, se puede lograr que la aleación tenga una fragilidad local, produciendo al mismo tiempo poco deterioro en la tenacidad del material en conjunto. Esto se logra de tres maneras:

- presencia de microconstituyentes que existen en forma de partículas aisladas en la estructura.
- tratamiento térmico adecuado del material
- deformación previa en frío del material

Las partículas pueden ser de material duro o blando. Muchas aleaciones que tienen estructuras dobles (dos fases) se encuentran naturalmente en la categoría de viruta corta o corte fácil. Las fibras de escoria en el hierro pudelado, el grafito en la fundición y las partículas de compuesto de  $Cu_4Sn$  en el bronce de alto estaño son ejemplos en que la presencia de inclusiones mejoran la maquinabilidad. En muchos casos, sin embargo, debe efectuarse una adición deliberada con objeto de introducir estas partículas aisladas. A los aceros de muy bajo carbono se agrega azufre (desde 0.06 a 0.20% S), pero asegurando suficiente cantidad de manganeso (0.9-1.2% Mn) para combinarse y formar sulfuro de manganeso (figura 21a).



**Figura 21:** (a) Acero al azufre de corte fácil y (b) Varilla de latón extruido de corte fácil.

El plomo que es insoluble se usa para mejorar la maquinabilidad de aleaciones no-ferrosas, latones y bronce (Figura 21b).

Los aceros se maquinan más fácilmente en la condición de normalizado, donde la perlita interrumpe la continuidad de la viruta. Los aceros de alto carbono se maquinan con más facilidad si su estructura contiene los carburos esferoidizados.