

## TEMA 4

### *ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN*

#### **1. DEFORMACIÓN EN METALES POLICRISTALINOS**

La gran mayoría de los metales y aleaciones a utilizar, están formadas como se sabe de muchos granos. La deformación en estos casos es más compleja aunque se rige por los mismos principios que la deformación del monocristal. Cuando en los granos convenientemente orientados se alcanza la tensión tangencial crítica, comienza en ellos la deformación. Conforme aumenta el esfuerzo, entran en deformación nuevos granos cristalinos.

Es indudable que ahora los contornos de grano ejercen una acción marcada sobre el deslizamiento, impidiendo que algunos planos se muevan. Como por otra parte se debe de mantener el contacto entre los límites de grano, puede ser necesario la acción de más de un sistema de deslizamiento. Apareciendo como consecuencia nuevos sistemas de deslizamiento, y produciéndose una rotación de los granos en la dirección del esfuerzo, produciendo algunos efectos importantes e íntimamente ligados.

1. Los esfuerzos necesarios para la deformación son cada vez mayores. Esta es la razón del crecimiento de la curva tensión-alargamiento unitarios.
2. La distorsión en la red es cada vez mayor, el número de dislocaciones aumenta, pero su movimiento queda limitado por las dislocaciones existentes en otros planos cristalográficos.

La rotación de los granos coloca otros que estaban peor orientados con respecto al esfuerzo aplicado, en posiciones con mayor posibilidad de deformación. Cada grano a medida que avanza la deformación y la rotación, se va alargando en la dirección del flujo.

Al deformar el metal plásticamente cambiamos su comportamiento, pero también cambiamos su forma, este método por tanto, se utiliza no solo para cambiar las características del material, sino que desde el punto de vista de la tecnología mecánica es un proceso

fundamental para la obtención de piezas. Estos procesos conocidos como de conformado plástico reciben muchos nombres según sea el proceso operativo. En la figura 1 se muestra un esquema de las principales técnicas de conformado: laminación, forja, trefilado, extrusión, embutido de chapas, curvado o estirado de chapas y plegado, son los procesos representados en la figura.

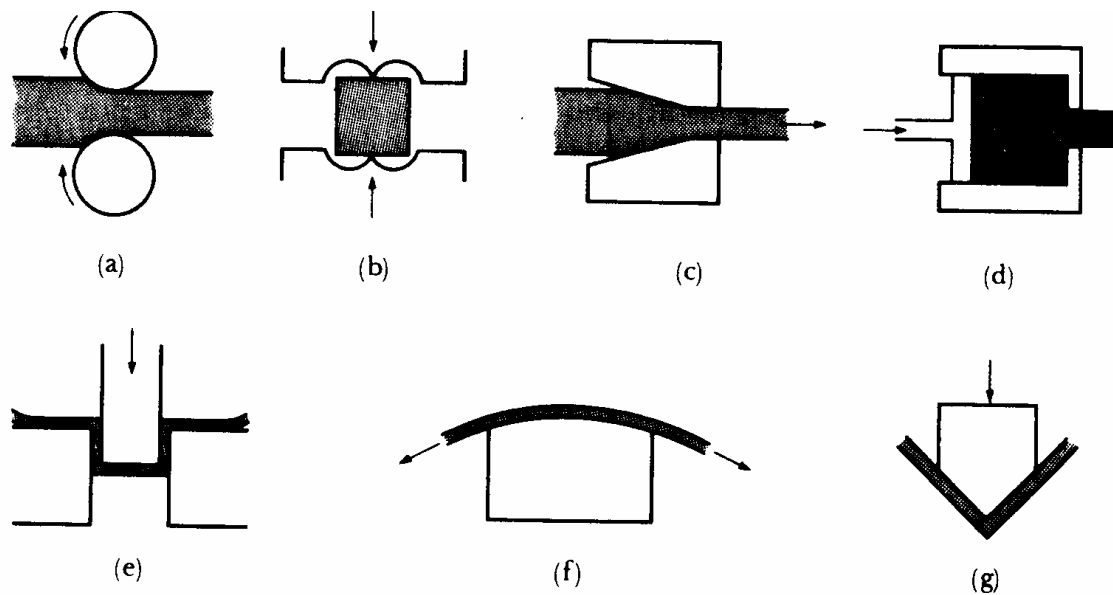


Figura 1

En resumen, además del cambio de forma el material presenta las siguientes características nuevas que afectan a su comportamiento:

Una mayor resistencia a una deformación posterior: Endurecimiento por deformación o **acritud**. Esto es debido a la resistencia al movimiento de las dislocaciones, producido por el aumento de estas que impiden su posterior movimiento bloqueándose entre ellas, o con partículas extrañas o límites de grano. La deformación de la red es una barrera al movimiento de las dislocaciones, el entrecruzamiento de planos de deslizamiento, incrementa la deformación posterior. Según esto una característica de la deformación plástica es que se necesita mayor esfuerzo para continuar deformándose, que el que se ha necesitado para iniciarse.

En los cristales se suelen encontrar redes complejas de dislocaciones interconectadas, así como defectos e impurezas en la red. Como la resistencia del material está ligado a la facilidad de movimiento de sus dislocaciones, un grano fino, que presenta gran cantidad de

límites de grano y más orientaciones de planos de deslizamiento, sería más resistente que otro material igual de grano más basto.

Un estado de **tensiones internas**, al estar muchos átomos desplazados de sus posiciones de equilibrio.

Existe un tercer efecto producido por el giro de los cristales buscando la orientación más favorable para el deslizamiento. Así mismo varía la forma de los cristales alargándose en la dirección de la deformación. En el material se ha originado una orientación preferente o **textura**. Mediante la textura el material ha perdido su isotropía macroscópica, presentando distintas características en una u otra dirección. En procesos como el trefilado (obtención de alambre) aparece una fuerte textura, los cristales se alargan en la dirección del alambre reorientándose. En otros procesos la orientación es en planos, como en el laminado, el grado de textura depende de la cantidad de deformación, ésta se mide generalmente como la reducción de sección en tanto por ciento en la dirección transversal a la fuerza aplicada y se conoce como grado de deformación, y será: 
$$\frac{A_0 - A_f}{A_0} 100$$

Las inclusiones, impurezas o partículas de segunda fase que se encuentran presentan en la estructura, también se deforman y alargan en la dirección de la deformación. Si las inclusiones o impurezas no son plásticas se romperán y colocarán a lo largo de los límites de los granos deformados. Las cavidades gaseosas se aplastan transformándose en grietas lo que disminuye la resistencia mecánica. Todo esto crea un efecto de fibra en el material aumentando su resistencia en la dirección de la misma.

Debe señalarse también que los obstáculos existentes en la red como átomos extraños, límites de grano, soluciones sólidas, crean zonas de acumulación de dislocaciones y contribuyen al endurecimiento del material. Los elementos de aleación que están presentes como una nueva fase (carburos metálicos, por ejemplo) ejercen en particular una gran influencia aunque se encuentren en pequeña proporción, por constituir soluciones de discontinuidad para el deslizamiento y extender su acción de distorsión a las zonas de material próximas.

No todo el trabajo gastado en la deformación se disipa en forma de calor, sino que parte de él es almacenado en el cristal como incremento de energía interna en la estructura de las dislocaciones existentes. Como los cristales están orientados al azar, los planos de deslizamiento cambian de dirección de grano en grano, siendo por tanto en estas zonas donde más trabajo se realiza y por tanto donde más energía se acumula.

## 2. EFECTO DE LA DEFORMACIÓN EN LAS PROPIEDADES

Aunque ya se ha señalado en el párrafo anterior las características que la deformación en frío produce, conviene concretar algunas propiedades de las piezas deformadas en frío. Todas las propiedades que dependen de la estructura reticular se ven afectadas por la deformación plástica. La resistencia a la tracción, el límite de elasticidad y la dureza son más altas que en el material de partida e incluso que en las piezas conformadas en caliente según veremos posteriormente.

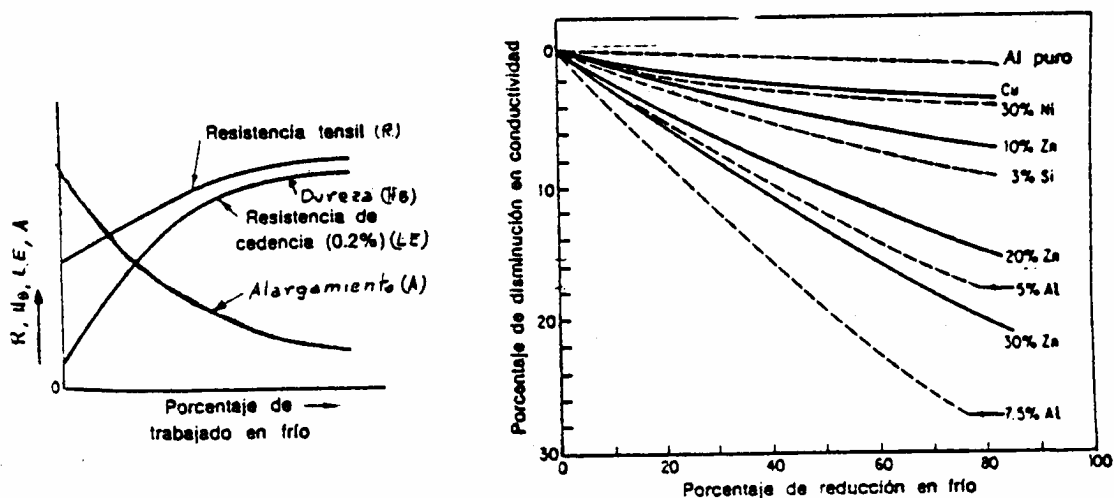


Figura 2

Disminuyen por el contrario, la ductilidad, conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión. El aumento o disminución de estas propiedades no se produce con la misma intensidad Fig. 2. Así por ejemplo, el aumento en el límite elástico obtenido por la deformación en frío es superior al aumento conseguido en la resistencia. La disminución de la conductividad es más acusada en las aleaciones que en los metales puros, en estos últimos la conductividad varía muy poco con el grado de deformación, por lo que es más aconsejable en aplicaciones eléctricas utilizar Cu puro y endurecerlo por deformación, que alearlo para conseguir un aumento de resistencia. En la Fig. 3 se muestra la variación de la resistencia y la conductividad del Cu al deformarlo plásticamente y al alearlo con Zn para obtener latón más resistente mecánicamente que el Cu puro.

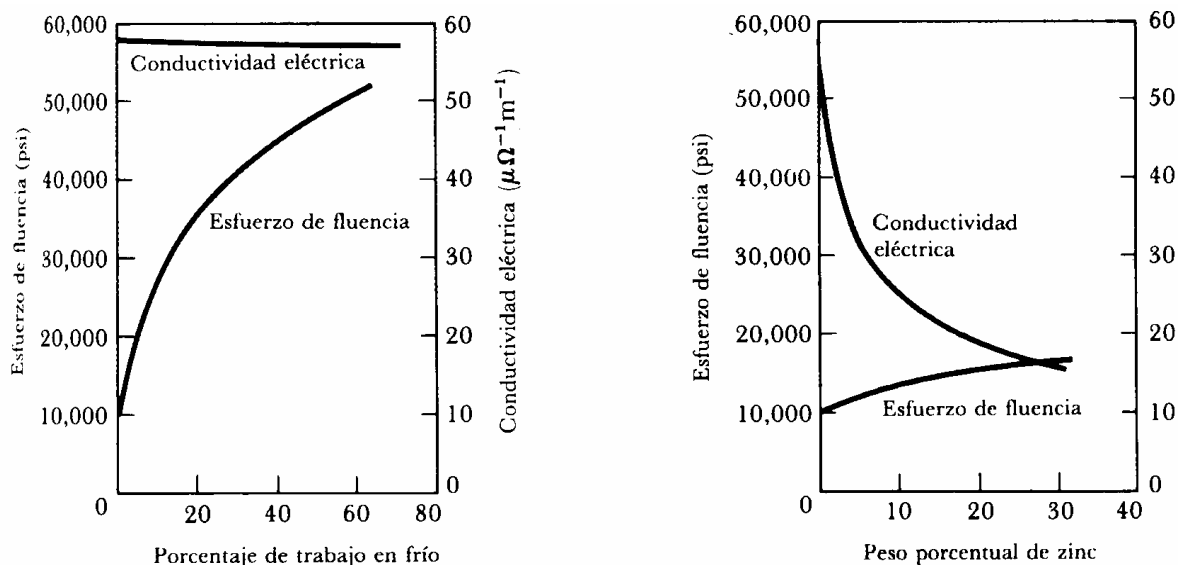


Figura 3

La deformación en frío es el procedimiento de endurecimiento de algunos metales y aleaciones como el cobre y latones, que no son susceptibles de tratamientos térmicos. La dureza obtenida es función del espesor final y del trabajo que haya soportado el material durante el trefilado. Cuando este trabajo y reducción de sección consiguiente sea más fuerte, la gran acritud que presenta el material puede ser superior a la cohesión del material y dar origen a grietas. Conviene en estos casos, antes de algunas pasadas intermedias por las hileras de trefilar o por los rodillos de laminar, someter al material a recocidos de alivio de tensiones o contra acritud.

Desde el punto de vista de la conformación del material, debe decirse que los acabados obtenidos por deformación en frío son mucho mejores que los producidos por la deformación en caliente, y las dimensiones obtenidas están dentro de un margen más estrecho de tolerancias.

Sin embargo, la realización técnica de la deformación en frío es dificultosa, tanto por los esfuerzos tan enormes requeridos en algunos casos, como por su repercusión en los órganos de la maquinaria y la elección de herramientas más duras, como por el desconocimiento aún grande que de la deformación se posee.

### 3. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN UN METAL DEFORMADO EN FRÍO

Al desarrollar un trabajo sobre el material mediante deformación en frío, parte de él se invierte en calor desprendido y otra parte se transforma en un aumento de la energía interna de los átomos. Es evidente que esta situación atómica de más alta energía potencial, no es la de equilibrio, y es posible una transformación hacia el estado más estable que existía antes de la deformación. Este aumento de energía libre puede disminuir con la eliminación y reagrupamiento de las dislocaciones, por otra parte este  $\Delta G$  es la fuerza conductora que tiende a llevar al material a un estado de más equilibrio. Sin embargo, en la realidad no se deshace esta situación metaestable, a no ser que los átomos tengan una movilidad suficiente como para volver al estado estable mediante el mecanismo de difusión. Esto se consigue elevando la temperatura.

Al calentar en metal previamente deformado en frío, tienen lugar sucesivamente tres tipos de variaciones:

- 1.- La recuperación o restauración, que actúa principalmente sobre las tensiones residuales y estructurales existentes en el metal y afecta de una forma imperceptible a su microestructura.
- 2.- La recristalización, que modifica la microestructura por deformación y crecimiento de nuevos granos en los contornos de los originales.
- 3.- Un crecimiento posterior del grano previamente recristalizado.

#### **4. RECUPERACIÓN**

En la recuperación se eliminan pequeñas deformaciones elásticas que no desaparecieron al cesar de actuar el esfuerzo en la deformación, debido a la diferente orientación de los cristales. Se eliminan algunas imperfecciones como el exceso de vacantes e intersticiales y un pequeño número de dislocaciones. Al calentar el material, el efecto de la activación térmica, permite que las dislocaciones que están bloqueadas puedan soltarse de sus barreras reagrupándose a situaciones de menor energía, eliminándose las de signo contrario que están en el mismo plano de deslizamiento por activación de vacantes. También se pueden reagrupar formando un límite de grano de bajo ángulo, Fig. 4, y en general se reagrupan formando lo que se denomina células de dislocaciones, formando una estructura de subgranos. Este mecanismo hace que desaparezcan un número de dislocaciones muy pequeño permitiendo que la resistencia del material prácticamente se vea inalterada, pero disminuye la energía interna relajando las

tensiones internas o energía de deformación. Las características del material más afectadas por la recuperación, son las tensiones internas, que desaparecen en su mayoría y la conductividad eléctrica que resulta mejorada.

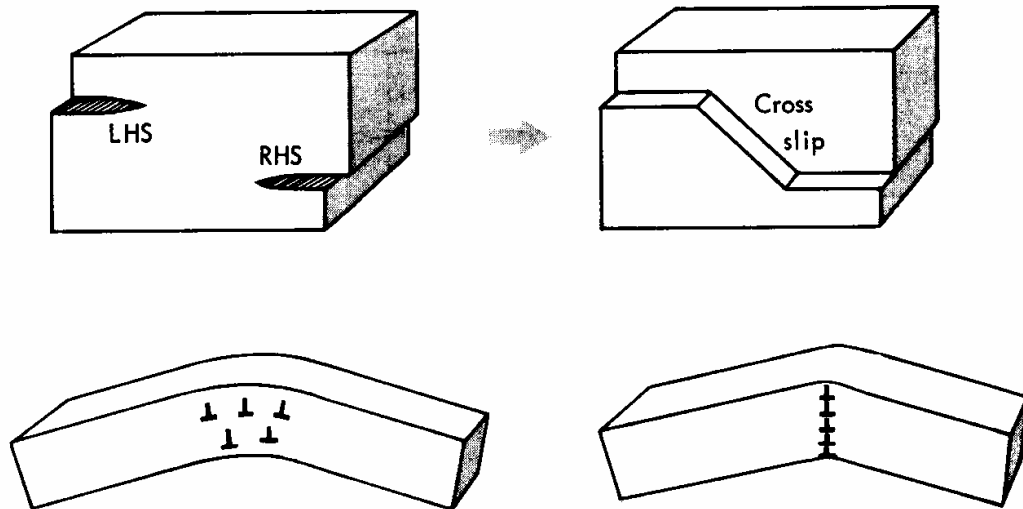


Figura 4

La recuperación de las propiedades del material es mayor cuanto más alta sea la temperatura. A una temperatura dada, la velocidad de recuperación es mayor en los primeros momentos, para decrecer luego con el tiempo. De ahí que la mayor eficacia de un tratamiento de este tipo denominado recocido de alivio de tensiones, se consiga mediante un calentamiento lento hasta la temperatura deseada. En la Fig.5 se muestran las variaciones de la estructura y las características mecánicas.

Si la temperatura de recocido es baja, puede a veces producirse un ligero flujo plástico que produzca un pequeño endurecimiento, pero lo normal es la pérdida pequeña de dureza y mejoría de la ductilidad. También puede existir endurecimiento en aquellas aleaciones susceptibles de envejecimiento.

Al continuar elevando la temperatura, después de la recuperación vendrá la recristalización.

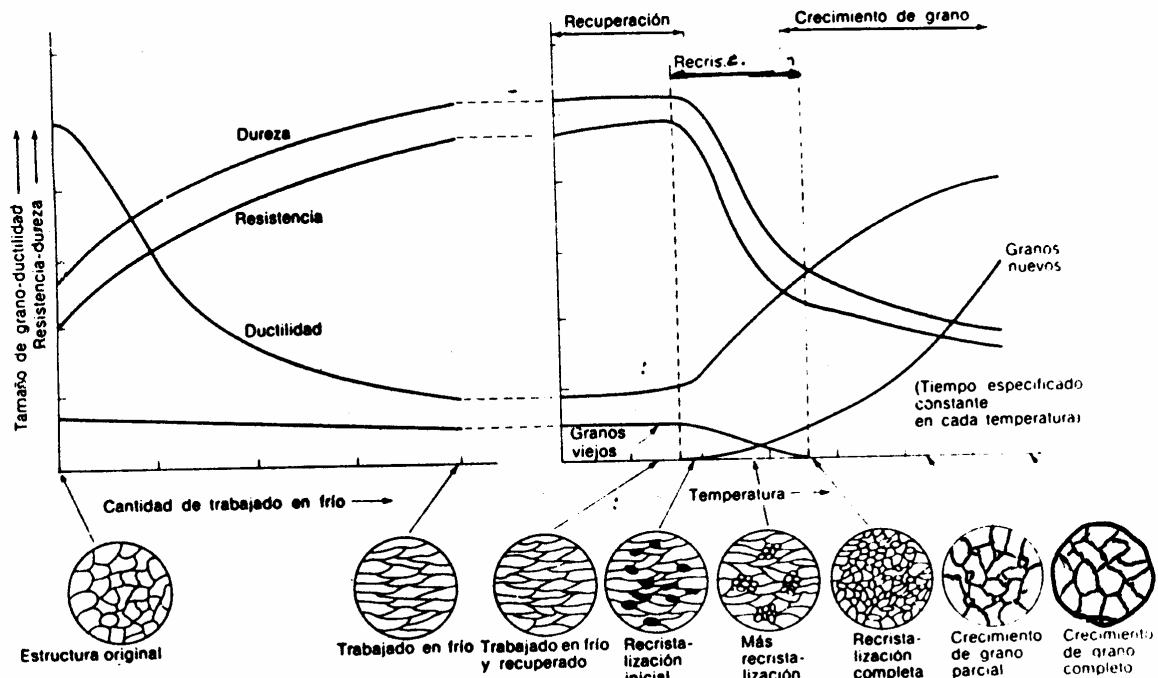


Figura 5

## 5. RECRISTALIZACIÓN

Se denomina así al fenómeno mediante el que se forma granos nuevos en los límites de grano, o en los planos de deslizamiento de un metal o aleación previamente deformadas en frío. Los nuevos cristales que aparecen en la microestructura, tienen la misma composición y estructura que los granos originales no deformados y no están alargados sino que son uniformes en sus dimensiones (equiaxiales). Estos cristales comienzan su formación en las zonas más fuertemente deformadas. En dichas zonas los átomos tienen mayor energía potencial  $E$ , por lo que la cantidad de energía térmica  $E_2 - E_1$  que es preciso añadir hasta alcanzar la energía  $E_2$  necesaria para la formación de un núcleo, es menor. La Fig. 6, ayuda a comprender este concepto. Cuando los átomos han alcanzado la energía  $E_2$ , desprende el exceso de energía  $E_2 - E_1$ , dando lugar a cristales equiaxiales análogos a los del metal antes de que ocurriera la deformación.



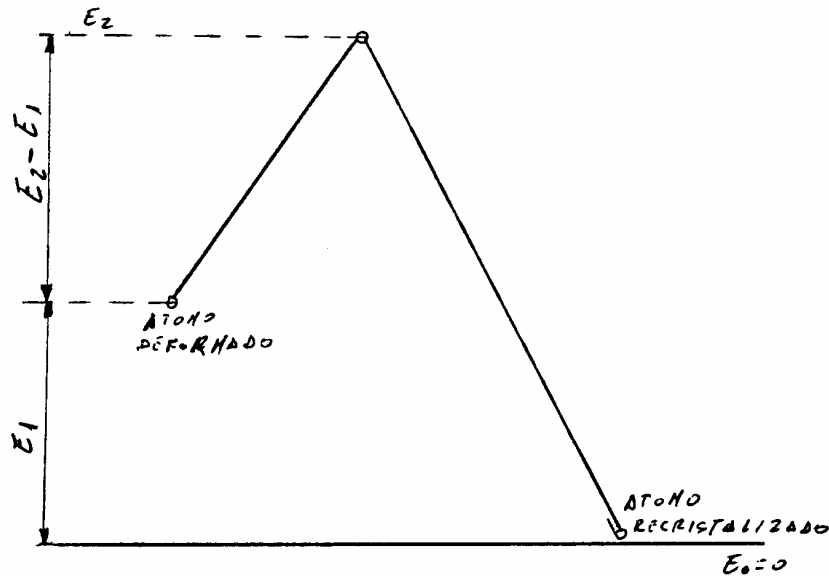


Figura 6

La energía desprendida ayuda a más átomos a superar la barrera energética creciendo los nuevos granos a expensas de los deformados. Se obtiene así una nueva microestructura del material que le confiere unas características análogas a las del metal sin deformar. Fig. 5.

Cuando la temperatura es más alta que en la etapa de recuperación, además de seguir eliminándose dislocaciones como se vio en el apartado anterior, se pueden eliminar por procesos de difusión, produciéndose eliminación de dislocaciones por un fenómeno denominado de salto, Fig. 7, a estas temperaturas las dislocaciones pueden moverse también para acomodarse y eliminarse mutuamente, por efecto de los campos de tensiones formados alrededor de ellas, el proceso lleva a la obtención de una estructura con muy pocas dislocaciones. Como consecuencia comienza a disminuir la resistencia y dureza del material.

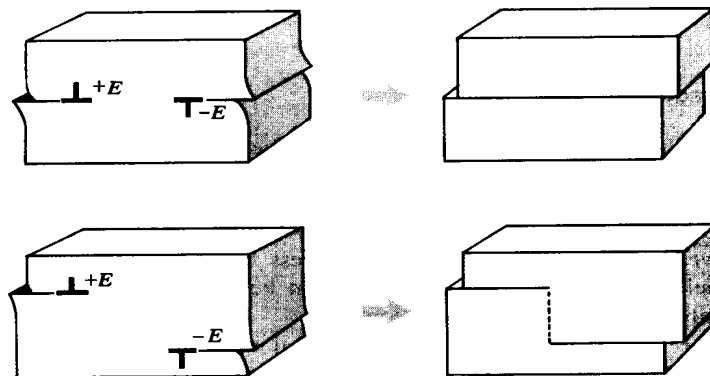


Figura 7

El proceso es el siguiente, pequeños granos libres de deformaciones y por tanto de dislocaciones son nucleados y crecen en la matriz deformada. Cuando estos granos crecen van consumiendo el material deformado eliminando las dislocaciones, principalmente en los límites de los nuevos granos formados. Este proceso es un proceso de nucleación y crecimiento, que sigue las mismas leyes que otros fenómenos análogos que ya vimos en capítulos anteriores. La fuerza conductora es la energía de deformación asociada con las dislocaciones. Siguiendo un razonamiento similar al que vimos en el proceso de solidificación, al formarse un grano nuevo, existe un cambio de energía producido por esa formación, y un aumento de energía superficial entre la zona deformada y la nueva no deformada que se opone al cambio. Al final, la expresión que se obtiene para el número de núcleos que se forman por unidad de tiempo es:

$$n = \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) \quad (1)$$

donde  $\Delta G^*$  es la energía crítica para la formación de un núcleo estable. La variación de la energía libre en un estado y en otro ( $\Delta G$ ), es independiente de la temperatura, como ocurre en el resto de procesos vistos anteriormente, en este caso  $\Delta G$  depende únicamente de la cantidad de deformación producida, es decir de la energía de deformación elástica almacenada. Consecuentemente  $\Delta G^*$  es independiente de la temperatura, y la velocidad de recristalización solamente se incrementa cuando lo hace la temperatura, ecuación (1). También, dado que la fuerza conductora se incrementa con el grado de deformación, la recristalización será más rápida a una misma temperatura con la cantidad de deformación plástica producida. Generalmente lo que se incrementa es la velocidad de nucleación más que la de crecimiento. En la figura 8, se muestra el proceso de recristalización.

El grano recristalizado lo hace siguiendo unas orientaciones creando una textura de recristalización, esto es debido al efecto de la energía superficial de los distintos planos cristalográficos, lo que hace que tiendan a orientarse en direcciones en las que esos planos de mínima energía superficial tiendan a ser paralelos a las superficies libres conformadas, y que los límites de grano tiendan también a formarse sobre superficies con determinados planos cristalográficos. En los metales CCC tienden a formar una textura (100) [001]. Este fenómeno tiene una gran importancia en ciertas aleaciones magnéticas en las que el comportamiento magnético está fuertemente influenciado por la orientación cristalográfica. En las aleaciones hierro-silicio de gran uso como chapas para núcleos de transformadores, es muy importante el efecto de esta orientación desde el punto de vista magnético. Afortunadamente en los metales cúbicos centrados, las superficies de mínima energía, y por tanto la orientación preferente en metales recristalizados es en planos  $\{110\}$ , quedando la dirección [001] en la dirección de la

deformación. La magnetización preferente es en direcciones  $\langle 100 \rangle$ , luego esta textura asegura que paralela a la superficie de la chapa estarán las direcciones  $\langle 100 \rangle$ , Fig 9. La adsorción de impurezas altera la energía superficial, por lo que se pueden utilizar para obtener chapas con estructuras de recristalización controladas.

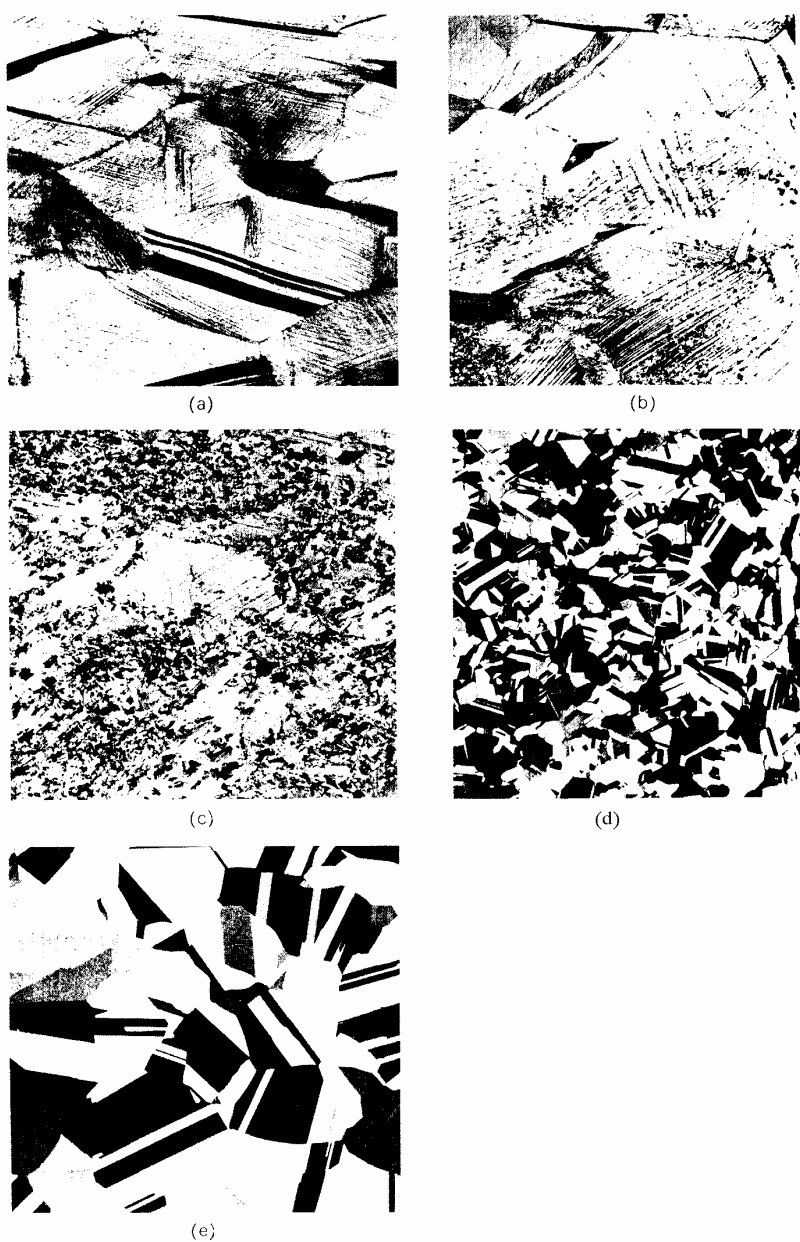


Figura 8

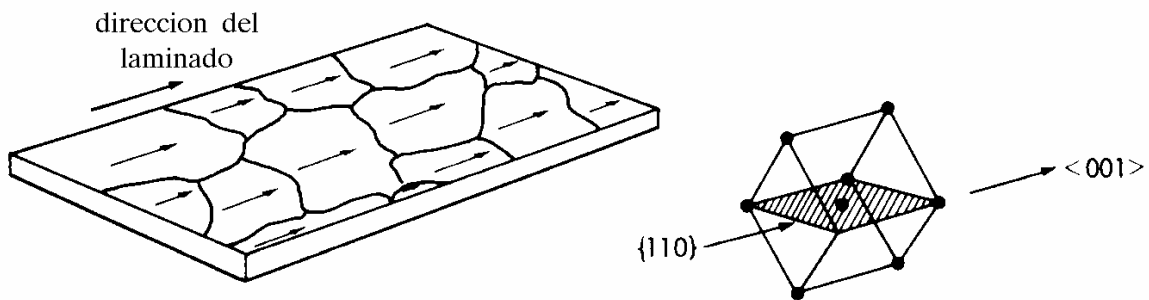


Figura 9

En aleaciones con dos fases se puede producir otro fenómeno como las estructuras de bandas, típicas de los aceros. En estos casos la recrystalización comienza con una de las fases, formándose una banda de esa fase, lo que hace que la composición de las zonas a ambos lados cambien, potenciando la formación de bandas adyacentes de la otra fase dando lugar a una estructura bandeada, Fig. 10.

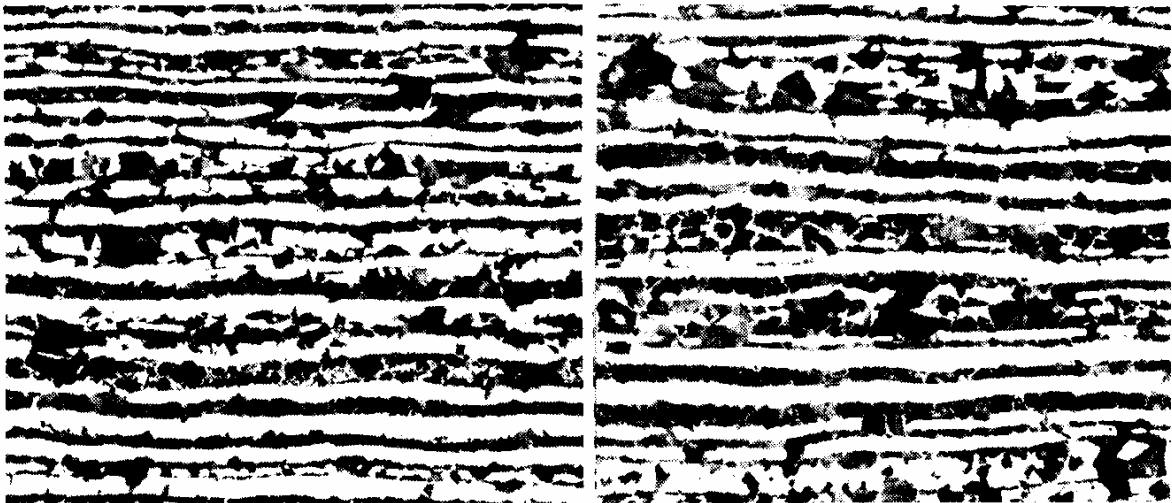


Figura 10

## 6. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RECRISTALIZACIÓN

Para que se produzca la recrystalización es preciso que exista alguna deformación previa en el material. Puede deducirse de la Fig. 6, que cuanto mayor sea dicha deformación y por tanto la energía  $E_1$ , menor será la energía térmica que hay que comunicar. En la Fig. 11, se expresa la relación entre grado de deformación y la temperatura de comienzo de la recrystalización.

En la Fig. 12, se muestra la curva típica de recristalización isotérmica. Es característico de dicha curva el período de incubación que precede al comienzo del proceso. Puede verse en la curva la influencia del tiempo en el grado de recristalización para una temperatura determinada. Es lógica esta influencia, pues la energía térmica depende tanto del tiempo, como de la temperatura, el período de incubación es menor y la velocidad de recristalización mayor a medida que aumenta la temperatura.

A pesar de que el grado de deformación previa y el tiempo de permanencia hacen variable la temperatura a la que un determinado metal o aleación recristaliza, es frecuente el uso del término de "temperatura de recristalización". El hecho de que se hable de esta forma, indica la mayor influencia que ejerce la temperatura respecto del tiempo.

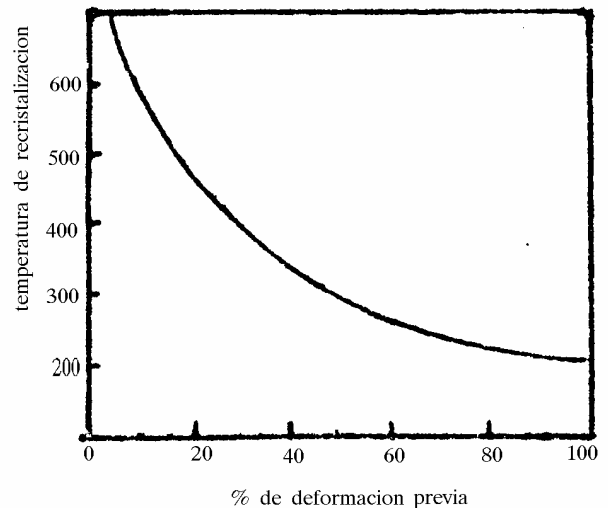


Figura 11

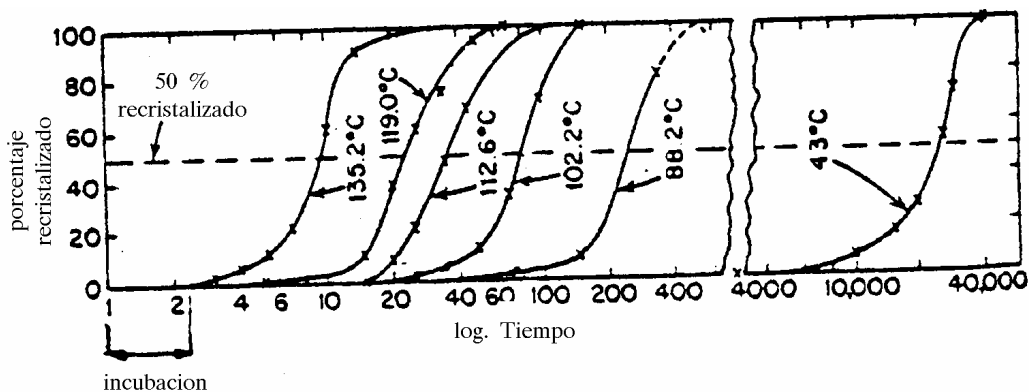


Figura 12

Se entiende por temperatura de recristalización, aquella en la que un metal o aleación intensamente deformado en frío recristalizará totalmente en un tiempo de una hora. Sin embargo, cualquier metal puede recristalizar a temperaturas mucho más bajas, con tal de que el

tiempo de permanencia sea lo suficientemente prolongado. En algunos casos es interesante en Ingeniería calcular el tiempo que pueden durar los efectos de una deformación en frío. Para ello se establece la siguiente relación empírica entre la temperatura y el tiempo que tarda en recrystalizar el 50%.

$$\frac{l}{t} = A e^{-B/T} \quad - \ln t = \ln A - \frac{B}{T} \quad (2)$$

En la tabla I, se indican las temperaturas de recrystalización de algunos metales y aleaciones.

TABLA I

MATERIAL	Tª de recrystalización °C
Cobre (99,999%)	21
Cobre (5% de Zn)	316
Cobre (5% de Al)	288
Cobre (2% de Be)	371
Aluminio (99,0%)	288
Aluminio (99,999%)	79
Aleaciones de Aluminio	316
Níquel (99,99%)	371
Metal Monel	593
Hierro Electrolítico	399
Aceros bajos en C.	538
Magnesio	65
Aleaciones de Magnesio	232
Cinc	10
Estaño	-4
Plomo	-4

Veamos la influencia de otros dos factores importantes: el tamaño del grano y los elementos aleantes. Cuanto mayor es el tamaño de grano del material antes de la deformación, menor es la acritud introducida para un mismo grado de deformación, debido a la existencia de menos barreras de límites de grano que impiden la propia deformación, por consiguiente más

alta será la temperatura de recristalización.

La influencia de los elementos de aleación es palpable en la tabla I. Normalmente basta con una pequeña proporción de impureza para que la elevación de la temperatura de recristalización sea considerable. Existe un porcentaje óptimo, generalmente pequeño, para el cual la temperatura de recristalización es un máximo relativo.

El efecto de los elementos de aleación es útil para poder ampliar el intervalo de endurecimiento por deformación, así como para estabilizar las características mecánicas del material a temperaturas elevadas. No todos los aleantes producen sin embargo el mismo efecto estabilizador.

### 7. TAMAÑO DE GRANO DE RECRISTALIZACIÓN

Cuanto mayor es el grado de deformación previa de un material, menor es el tamaño del grano recristalizado. Esto es debido a que entonces son más los átomos que poseen energía suficiente para saltar en el calentamiento la barrera energética, siendo mayor el número de núcleos de recristalización y por tanto el grano más pequeño.

El tamaño de grano de recristalización depende de la cantidad de deformación sufrida por el material, Fig. 13. A medida que disminuye el grado de deformación aumenta rápidamente el tamaño de grano. Una deformación muy pequeña, hará imposible la recristalización en un tiempo razonable. Esto nos lleva al concepto de cantidad crítica de deformación, y será la cantidad mínima de deformación que permita a un metal recristalizar, este valor no es una propiedad del material. Por otra parte, es importante notar que el tamaño de grano de recristalización no depende de la temperatura a que se produce esta.

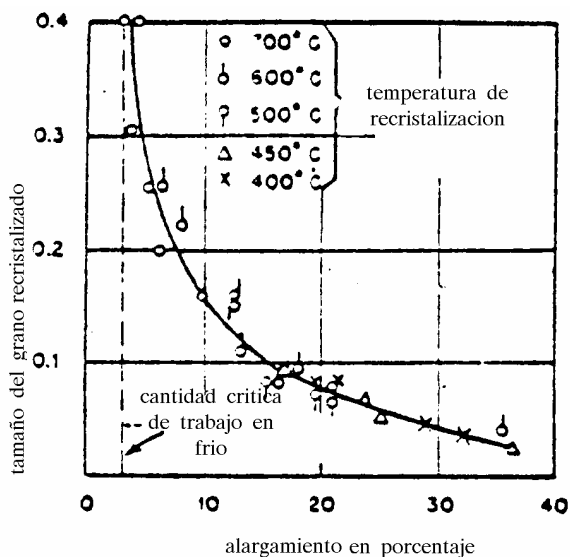


Figura 13

Otro factor que influye en el tamaño del grano final, es la presencia de impurezas y de elementos de aleación, que actúan produciendo una obstrucción al crecimiento. El efecto de los

elementos de aleación será mayor, cuando como en los aceros de grano fino, formen una segunda fase finamente dispersa. Esta es una de las razones de la utilización de elementos de aleación.

También depende del tamaño inicial del grano antes de deformar, como ya se ha visto a mayor tamaño de grano menor es la acritud introducida, y por tanto el grano de recristalización será mayor.

### **8. CRECIMIENTO DEL GRANO**

Una vez terminada la recristalización, el grano tiene tendencia a continuar creciendo disminuyendo el número de estos. Se han propuestos varios mecanismos que explican este fenómeno, pero la razón de todos ellos, es la tendencia de la materia a minimizar la energía, eliminando límites de granos cuando los átomos poseen la movilidad suficiente para ello.

Para cada temperatura existe un tamaño de grano característico que guarda relación con la solidificación, y que se alcanza mediante la permanencia prolongada a dicha temperatura. Una vez alcanzado dicho tamaño, el tiempo ejerce una influencia inapreciable y es preciso elevar la temperatura para que continúe el crecimiento.

Teóricamente se puede conseguir un tamaño de grano muy grande mediante calentamiento lento hasta temperaturas próximas a las de fusión, sin embargo, en la realidad existe el peligro de que los granos se oxiden en el proceso (material quemado). El procedimiento seguido para la obtención de monocristales es el calentamiento y enfriamiento cíclico.

Las impurezas insolubles, dan lugar en la deformación a una textura, que aunque amortiguada, persiste en la estructura recristalizada. La textura limita el crecimiento de grano a una sola dirección, pero a altas temperaturas la textura desaparece también y con ella esta restricción.

Puede pensarse de todo lo dicho, que el grano va creciendo en los sucesivos tratamientos térmicos que sufre el material hasta la plasmación en la pieza final. Esto no es cierto. Hay que tener presente que existen dos tendencias contrarias: La recristalización que origina inicialmente un grano pequeño y el crecimiento posterior. Normalmente en los tratamientos térmicos se calienta hasta dentro de un intervalo de temperaturas ligeramente superior a la de cristalización. Si bien es verdad, que el tamaño de grano varía y puede controlarse en cada proceso, también es cierto que el tamaño final guarda siempre relación con el de solidificación.



Un ejemplo de operaciones en las cuales es importante el control del tamaño del grano, es la embutición de chapas en frío. Cuando el grano es pequeño la embutición se hace más difícilmente y el peligro de grietas es mayor. Cuando es más basto, este riesgo es menor, pero el conformado de las piezas es más difícil y es frecuente que la superficie embutida quede rugosa, con aspecto de "piel de naranja".