

## Mecanismos de endurecimiento en metales y aleaciones

Se trata de mecanismos mediante los que se logra elevar la resistencia mecánica de estos materiales. Se generan efectos colaterales, algunos deseables y otros no.

En estos materiales, por su estructura cristalina la deformación plástica se produce a través del movimiento de las dislocaciones. Para lograr un aumento en la tensión de fluencia se deben imponer barreras a este movimiento. Esta es el fundamento de un dado mecanismo de endurecimiento.

En general el efecto de estos mecanismos se mide a través de su influencia sobre la tensión de fluencia aunque otras propiedades referidas a la resistencia a la deformación también resultan afectadas.

### Diseño actual: Alta tensión de fluencia

Dado que en la mayoría de casos la tensión de fluencia se usa para el **dimensionamiento** de la sección resistente de una pieza, es necesario que esta propiedad sea elevada por las siguientes razones:

- Disminuye la **cantidad de material** a utilizar y por lo tanto el costo total.
- Disminuye las **secciones resistentes** de la pieza lo que conduce a componentes compactos que son imprescindibles en aplicaciones en estructuras en general.
- Permite obtener **piezas livianas**. Si bien esto depende en rigor de la relación resistencia/densidad del material (llamada **resistencia específica** de material), para un tipo de aleaciones dado (por ejemplo las aleaciones base Al) es muy poco lo que se puede hacer para variar la densidad mientras que la resistencia puede incrementarse sensiblemente. La reducción del peso es imprescindible en el caso de **estructuras móviles** (grúas, automóviles, maquinaria de transporte terrestre, aviones, etc).

Cabe aclarar que en contra de lo expuesto, para lograr una buena **conformabilidad**, la resistencia a la deformación debe ser baja. Para este caso, uno de los mecanismos da la posibilidad de aplicarlo durante el proceso de conformado.

### Resistencia mecánica, la ductilidad y la tenacidad

Además del estudio de cada mecanismo de endurecimiento, su potencialidad, limitaciones y rangos de aplicación, es importante analizar cada uno de dichos mecanismo en función de sus efectos sobre la **ductilidad y tenacidad**, dado que estas propiedades se degradan con el aumento de la resistencia mecánica.

Además del requerimiento de alta ductilidad para facilitar el conformado plástico de la aleación, también existen condiciones de servicio. El **flujo plástico redistribuye la concentración de tensiones que ocurre en entallas, fisuras y otras discontinuidades** de las estructuras. De esta manera disminuye la posibilidad de nucleación de fisuras o de la propagación de las que ya existen. Para lograr esto un gran número de dislocaciones debe poder moverse grandes distancias en las regiones de alta concentración y alta triaxialidad de tensiones si se quiere evitar la sensibilidad o fragilidad ante una entalla u otro tipo de discontinuidad.

En oposición a este requerimiento está el hecho de que para alcanzar alta **resistencia mecánica** en materiales dúctiles, **se debe inhibir el flujo plástico mediante barreras que restrinjan el**

**movimiento de las dislocaciones.** De esto se desprende que la resistencia mecánica por un lado y la ductilidad y tenacidad por el otro, son requerimientos incompatibles. La distancia entre barreras para las dislocaciones debe ser pequeña para lograr alta resistencia, pero para obtener alta tenacidad y ductilidad el número de dislocaciones móviles debe ser grande.

### Mecanismos de endurecimiento

En Inglaterra (Sheffiled, 1960), se plantean los principios relacionados con los mecanismos de endurecimiento. Se formulan los siguientes mecanismos:

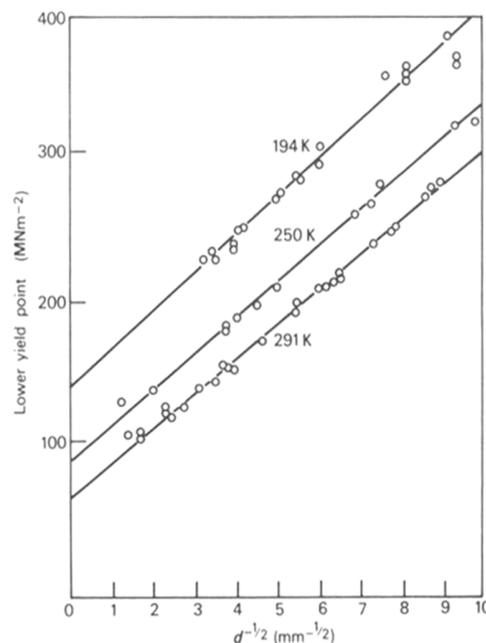
- Reducción de tamaño de grano
  - Solución sólida (sustitucionales e intersticiales).
  - Por deformación en frío (aumento en la densidad de dislocaciones).
  - Transformaciones de fase (temple)
  - Precipitación de segundas fases (pueden ser partículas submicroscópicas o microscópicas).
- Entre los mecanismos existen efectos de interacción que pueden potenciar sus efectos. En general en una aleación real intervienen varios de estos mecanismos en modo combinado.

### Reducción de tamaño de grano

Según la ley de Hall y Petch, la resistencia mecánica, representada por la tensión de fluencia, es inversamente proporcional al tamaño de grano, que es un parámetro microestructural (Figura 1). También la tenacidad presenta este comportamiento. El mecanismo de endurecimiento por afinamiento de grano es el único que eleva la resistencia mecánica y la tenacidad.

- Tensión de fluencia

$$\text{Ley de Hall y Petch: } \sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$



Recta correspondiente a ensayos a temperatura ambiente (20 °C)  
k = 24.5

Fig. 1 - Dependencia de la tensión de fluencia con el tamaño de grano

Para ensayos a temperatura ambiente (20 °C), k = 24.5.

La norma ASTM E112, clasifica tamaños de grano, de nº 1 a 8. A medida que aumenta el número, el tamaño de grano es más fino (Figura 2).

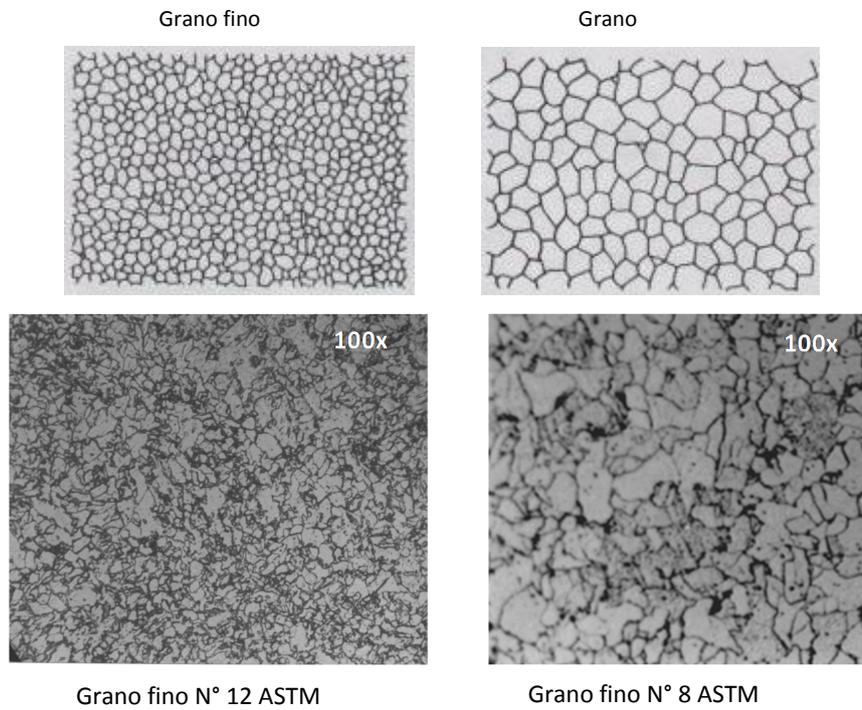


Fig. 2 – Tamaño de grano en aceros estructurales de bajo carbono

- Resistencia al impacto (Figura 3)

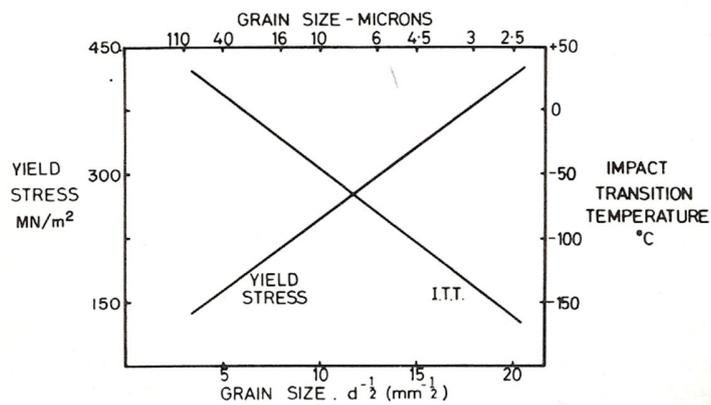


Fig. 3 - Efecto del tamaño de grano sobre la tensión de fluencia y la temperatura de transición al impacto (Acero estructural bajo carbono)

Con la reducción del tamaño de grano, aumenta la tensión de fluencia y disminuye la temperatura de transición al impacto (Figura 4).

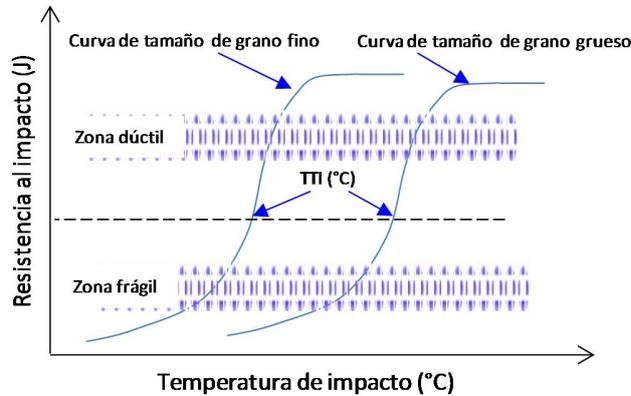


Fig. 4 – Efecto de tamaño de grano en la TTI (Ensayo de impacto)

**Solución sólida (sustitucionales e intersticiales).**

El efecto de elementos sustitucionales e intersticiales sobre la resistencia mecánica se observa en Figura 5.

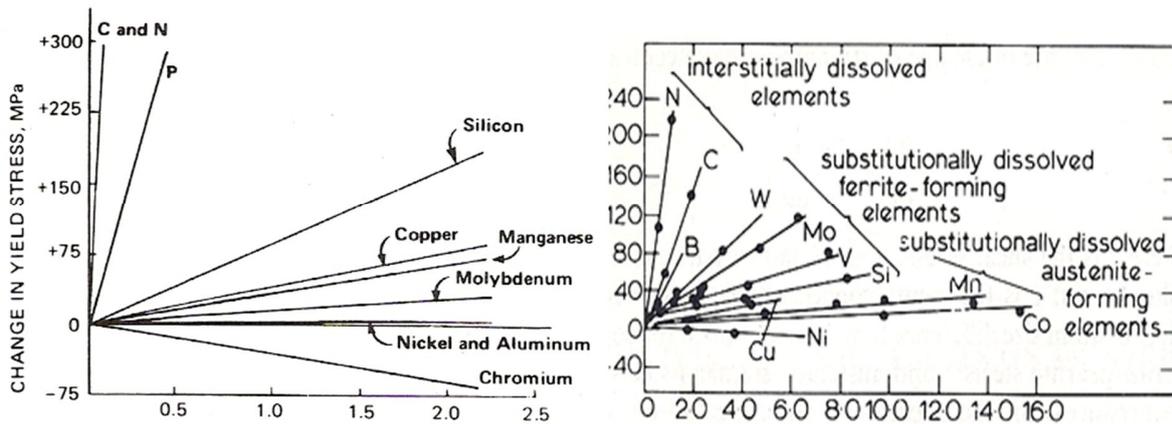


Fig. 5 - Elementos de aleación (% en peso)

Los defectos en soluciones sólidas distorsionan la red cristalina y aumentan la resistencia del material (Figura 6).

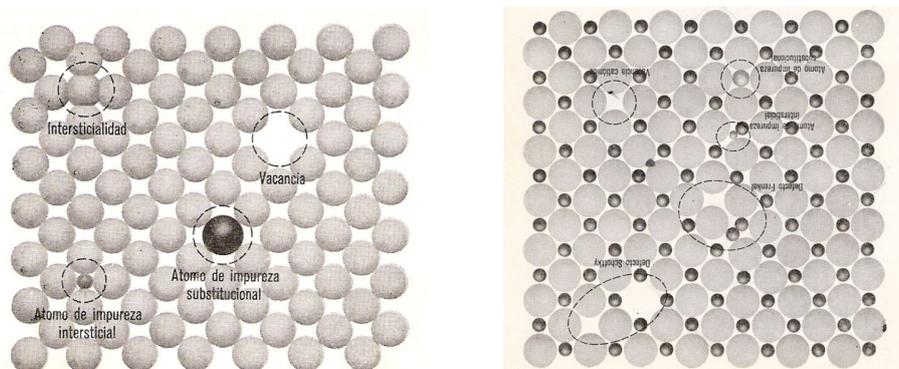


Fig. 6 - Defectos puntuales en soluciones sólidas

**Endurecimiento por deformación en frío** (aumento en la densidad de dislocaciones).

$$\sigma_f = \sigma_0 + k\sqrt{\rho}$$

$\sigma_f$ : Tensión de fluencia

$\rho$ : Densidad de dislocaciones (defectos 2D)

$k$ : Constante que depende del módulo de corte.

La deformación en frío concentra dislocaciones y produce endurecimiento (Figura 7). Cuando supera un determinado límite, el material se rompe. En materiales dúctiles, el límite de densidad de dislocaciones es muy elevado, a diferencia de lo que ocurre en materiales frágiles.

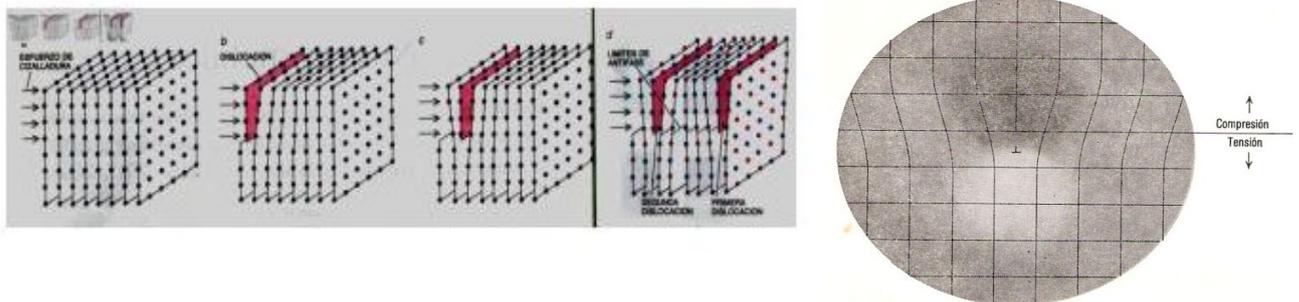


Fig. 7 - Movimiento de dislocaciones y estado de tensiones

**Transformaciones de fase** (Figura 8)

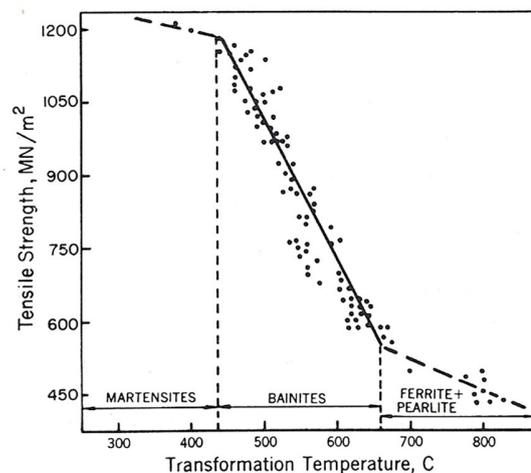


Fig. 8 – Efecto de la temperatura de transformación sobre la resistencia mecánica en aceros

Para bajas temperaturas de transformación se obtienen productos de grano fino (por ej. aceros bainíticos de bajo carbono). En el caso de aceros de alto carbono, con bajas temperaturas de transformación se obtiene martensita.

Factores que inciden en las propiedades, en las transformaciones de fase en estado sólido:

- Composición química
- Velocidad de enfriamiento
- Tamaño de grano
- Dimensiones

**Precipitación de segundas fases (pueden ser partículas submicroscópicas o microscópicas)**

Este mecanismo se utiliza en aleaciones que no tienen posibilidad de aumentar su resistencia mecánica de otra manera (Figuras 9 y 10). Las etapas del proceso se observan en Figura 11.

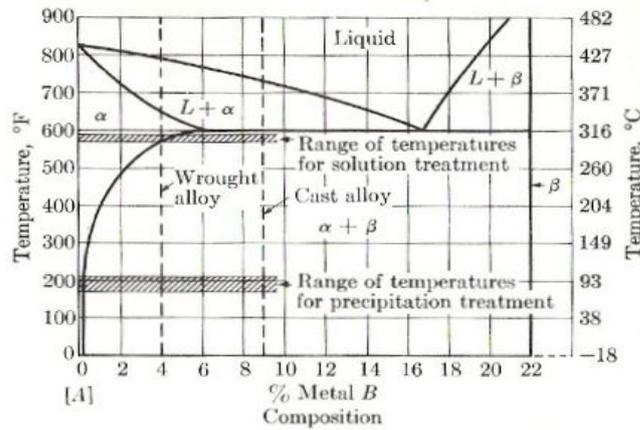


Fig. 9 - Diagrama de fases de equilibrio (Aleación de forja y de moldeo)  
Materiales aptos para endurecimiento por precipitación

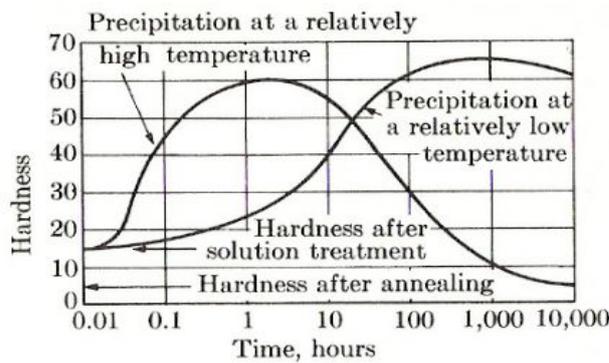


Fig. 10 - Evolución del endurecimiento por precipitación durante el tratamiento térmico a dos temperaturas diferentes

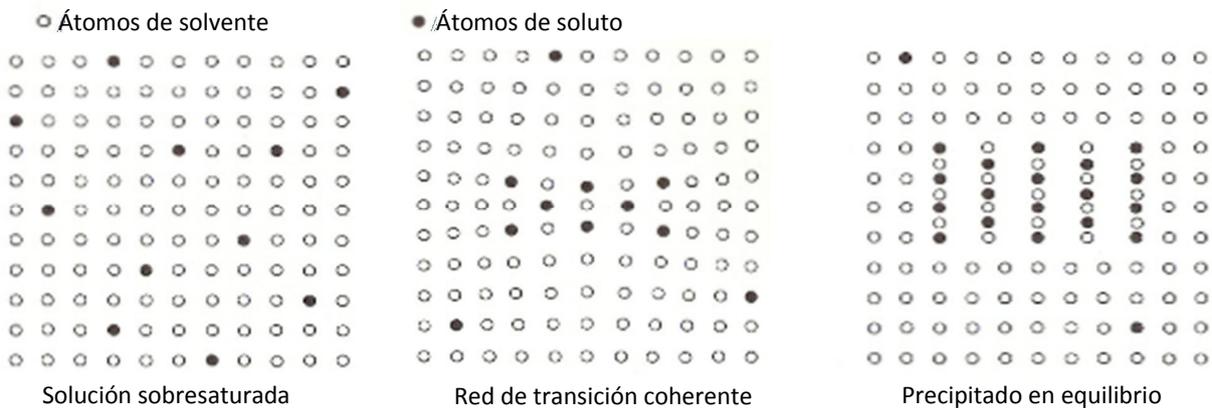


Fig. 11 - Etapas de formación de un precipitado (defectos 3D)

**Efectos aditivos de los mecanismos de endurecimiento**

La resistencia mecánica de un acero, es la resultante de la suma de los efectos de los distintos mecanismos actuantes (Figura 12).

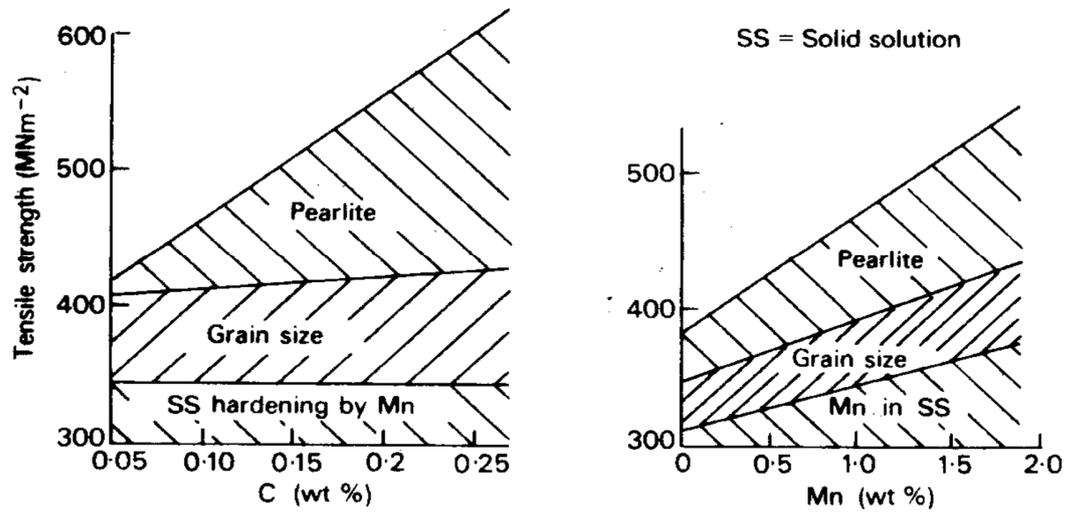


Fig. 12 - Factores que contribuye a la resistencia mecánica de los aceros C-Mn