

**ASIGNATURA: CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**AÑO: 3ero CURSO DIURNO INGENIERÍA MECÁNICA.**

**PLAN DE ESTUDIO: E**  
**CONTENIDOS BÁSICOS**



---

**TEMA II: Materiales empleados en la industria metal - mecánica moderna.**

---

**TEMÁTICA 2. 2. Fundamento del tratamiento térmico. Transformaciones de fase en los aceros durante el calentamiento y el enfriamiento en el acero. Tipos de tratamiento térmico del acero.**

**OBJETIVOS:**

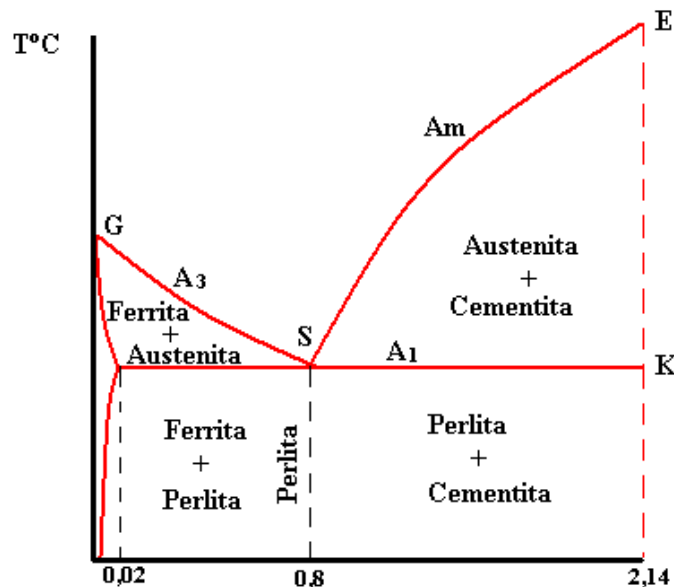
1. Describir las características de las principales transformaciones que ocurren durante el tratamiento térmico de los aceros.
2. Describir los procesos tecnológicos de temple, revenido, recocido y normalizado en el acero.

## DESARROLLO

- **Transformaciones durante el calentamiento del acero.**

Para el análisis de las transformaciones durante el calentamiento de los aceros, se tomará la parte del diagrama Fe-C correspondiente a las aleaciones por debajo de 1147°C de temperatura y por debajo de 2,14% de Carbono. A las curvas de transformaciones de fase se le asignarán las siguientes nomenclaturas:

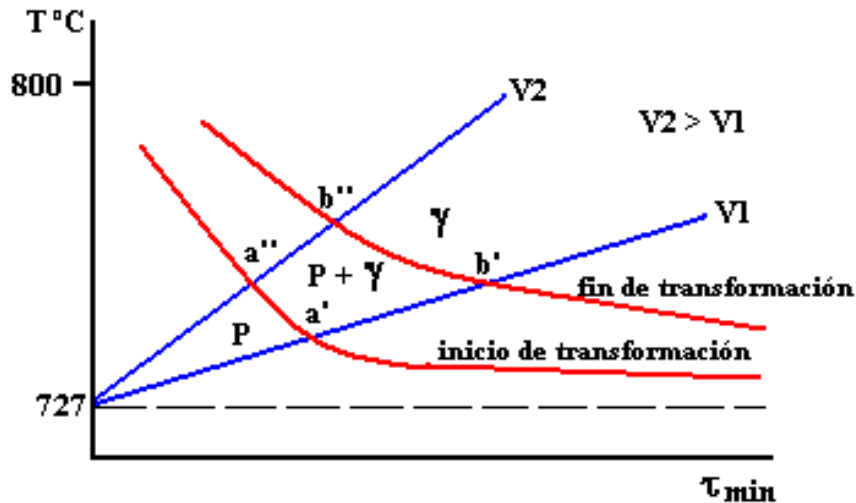
- ❖ A1 (Ac1 ó Ar1): Línea de la reacción eutectoide.
- ❖ A3 (Ac3 o Ar3): Línea de transformación alotrópica de austenita en ferrita.
- ❖ Am (Acm o Arm): Curva de pérdida de solubilidad de la austenita.



Para el estudio de las transformaciones de fase del acero se utilizará el acero eutectoide es decir, aquel que tiene 0,8%C y 100% de perlita. Durante las transformaciones de fase del resto de los aceros, habrá que tener en cuenta la presencia de otros constituyentes estructurales como lo son la ferrita y la cementita.

El comienzo de la transformación de Perlita en Austenita solo puede efectuarse, si el calentamiento es muy lento. En las condiciones normales de calentamiento la transformación se retrasa y se obtiene un sobrecalentamiento.

La perlita sobrecalentada por encima del punto crítico se transforma, a velocidad distinta en dependencia del grado de sobrecalentamiento en la austenita.



La posición de las curvas muestra que mientras más altas son las temperaturas la transformación ocurre en un intervalo menor de tiempo y tanto más elevada es la temperatura de transformación. El tiempo entre el inicio y final de la transformación se denomina de incubación.

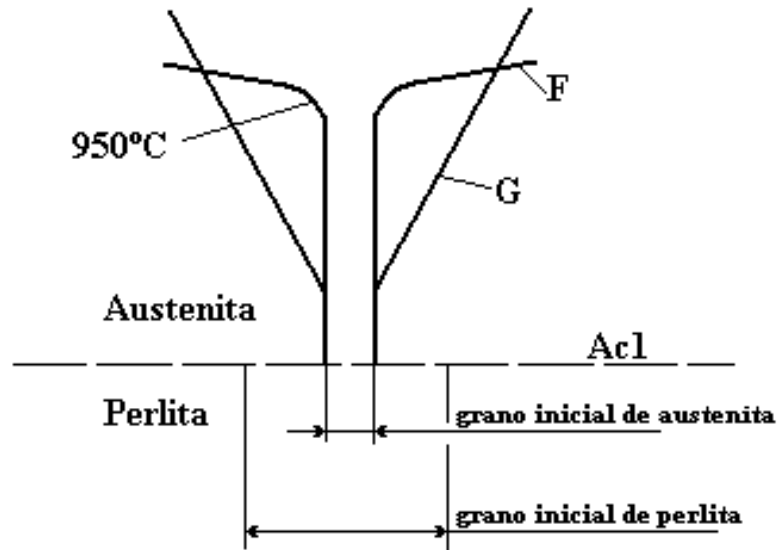
La transformación se caracteriza por la formación de austenita y la desaparición de la perlitita. Para homogeneizar la composición química después que ocurra la transformación es necesario dar un tiempo de mantenimiento para que mediante los procesos difusivos la composición en carbono de la misma sea la misma en toda la austenita. Téngase en cuenta que la austenita se origina de la ferrita que tiene 0,02%C y de la cementita que presenta 6,67%C. La composición en carbono de ambas fases es muy disímil. Este tiempo de mantenimiento debe tenerse siempre en cuenta desde el punto de vista tecnológico.

### Crecimiento del grano austenítico.

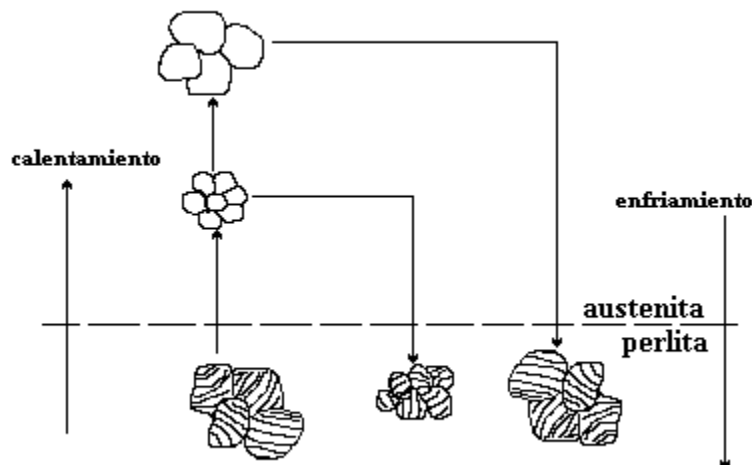
Una vez finalizada la transformación de perlitita en austenita se forma una gran cantidad de granos pequeños de austenita. El tamaño de estos granos caracteriza la magnitud llamada grano inicial de la austenita.

El calentamiento ulterior o el mantenimiento a la temperatura dada, una vez terminada la transformación provoca el crecimiento de los granos de austenita. Este es un proceso que se desarrolla espontáneamente. En ese sentido se distinguen dos tipos de acero.

- Aceros de grano fino hereditario (poco propensos al crecimiento).
- Acero de grano fino hereditario (muy propensos al crecimiento).

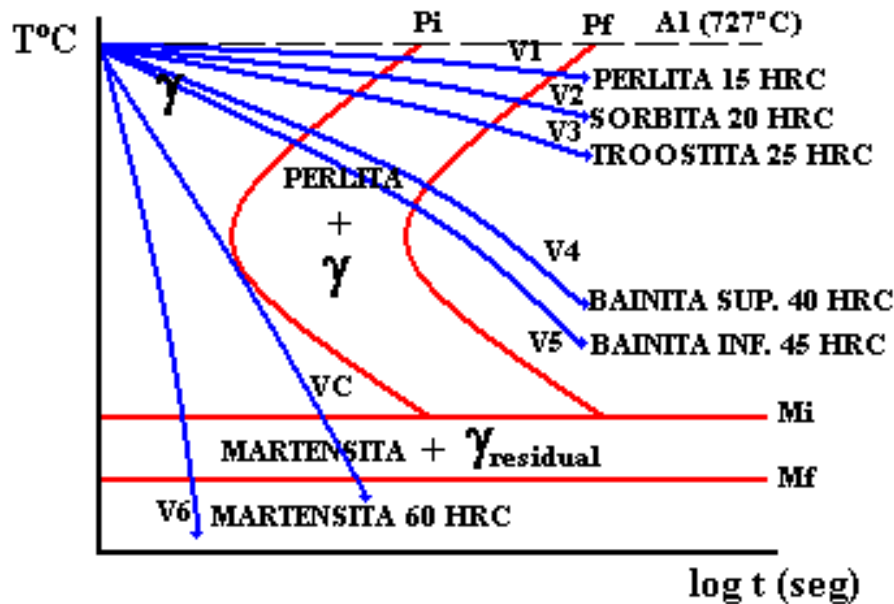


El tamaño de grano obtenido en el acero como resultado de un tratamiento térmico se llama grano real. Los granos crecen durante el calentamiento y no disminuyen de tamaño durante el enfriamiento. Por esto la temperatura máxima de calentamiento del acero en estado austenítico y su granulación hereditaria determinan el tamaño definitivo del grano.



- Transformaciones durante el enfriamiento del acero (Diagrama T.T.T.).

Para el estudio de las transformaciones de fase durante el enfriamiento, emplearemos el diagrama de descomposición isotérmica de la austenita denominado también diagrama T.T.T. el cual se construye en coordenadas temperatura vs tiempo. En esas coordenadas se sitúan sobre el diagrama las curvas de enfriamiento. Para el análisis de este epígrafe se empleará el diagrama T.T.T. correspondiente al acero eutectoide (0,8%C).

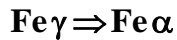


De la línea V1 que caracteriza el enfriamiento lento, se obtienen como producto final la perlita de poca dureza (de láminas gruesas). Cuando el enfriamiento es más rápido (V2 y V3) la velocidad de difusión disminuye formándose productos más disperso y más duros.

Para temprar el acero hay que enfriarlo con una velocidad tal que no tenga tiempo de producirse los procesos difusivos de descomposición de la austenita en la región superior de temperaturas. La velocidad mínima de enfriamiento, necesaria para que se forme la martensita a partir de la austenita se denomina **velocidad crítica de temple (VC)**. Para temprar un acero es necesario que se enfríe con una velocidad mayor que la crítica. Si el enfriamiento es menor que la crítica se obtendrán productos perlíticos, principalmente troostita, lo que disminuirá la dureza del acero.

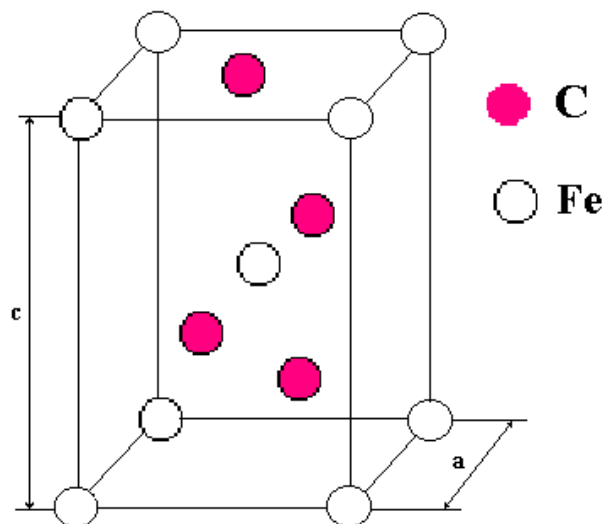
## Transformación martensítica.

Si la austenita se subenfía hasta la temperatura en la que la red de la austenita a pesar de la presencia de carbono disuelto en ella, es inestable, pero la velocidad de difusión del carbono, debido a la temperatura, es tan pequeña que se efectúa la restructuración de la red sin que precipite el carbono.



Sus principales características son:

- Ocurre sin difusión.
- Se origina martensita (solución sólida de carbono en hierro  $\alpha$ ) de red tetragonal.
- El contenido de carbono de la martensita es igual al contenido de carbono de la austenita que la originó.
- La tetragonalidad de la martensita es proporcional al contenido de carbono.
- Se forma una estructura acicular (en forma de láminas o agujas).
- La transformación transcurre a intervalos a partir de la curva de inicio de transformación ( $M_i$ ) hasta la curva final de transformación ( $M_f$ ).
- Generalmente ( $M_f$ ) se encuentran por debajo de  $0^\circ\text{C}$  por lo que en la estructura del acero siempre queda un pequeño porcentaje de austenita que no se transforma denominado austenita residual. (Hablar del temple subcero).
- Es una transformación irreversible. Es decir, no se obtiene a partir de la martensita, martensita nuevamente.
- El metal queda en estado inestable con gran cantidad de tensiones internas.



Celdilla elemental de la martensita.

## Transformaciones durante el revenido.

Durante el calentamiento de una estructura martensítica ocurren en el acero las siguientes transformaciones.

1. **Entre 80°C y 200°C:** Primera etapa del revenido. Disminuye la tetragonalidad de la martensita. La martensita que se obtiene con este revenido (martensita revenida con relación c/a cercana a 1) es casi cúbica. Se empieza a precipitar el carbono de la martensita.
2. **Entre 200°C y 300°C:** Segunda etapa del revenido. La austenita residual se transforma en una mezcla formada por solución sólida sobresaturada de carbono en hierro  $\alpha$  (martensita revenida). Se forman carburos intermedios  $\epsilon$  de fórmula  $\text{Fe}_2\text{C}$ .
3. **Entre 300°C y 400°C:** Tercera etapa del revenido. Se eliminan las tensiones residuales y la estructura de los carburos se torna cementítica. La estructura es denominada bainita de revenido (mezcla de cementita y ferrita). Aparece la fragilidad del revenido de primer género. El límite elástico alcanza su valor más elevado.
4. **Más de 400°C y hasta 600°C:** Se obtiene la sorbita y la troostita de revenido (mezclas de ferrita y cementita). Coalece la cementita. La dureza disminuye mucho, pero se obtiene la mayor resistencia a la fatiga.

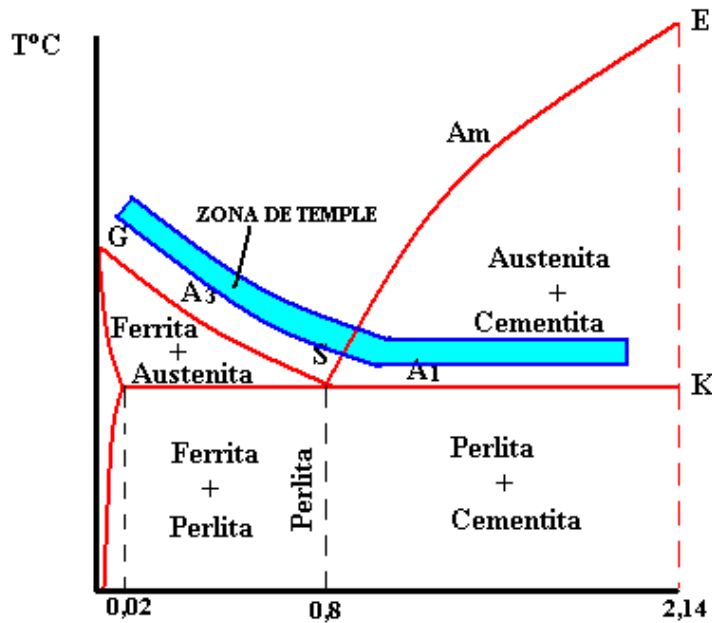
Conviene llamar la atención que en las mezclas de ferrita y cementita que se obtienen del revenido tienen una forma granular, mientras que las que se obtienen directamente de la austenita son laminares. Estas últimas presentan propiedades mecánicas inferiores a las provenientes del temple y el revenido.

- **Temple del acero.**

- **Clasificación general de los tratamientos térmicos de los aceros.**

1. **Volumétricos:** Temple, Revenido, Recocido, Normalizado, Termomecánico.
2. **Superficiales:** Temple Superficial, Tratamientos Termoquímicos.

**Temple:** Consiste en un calentamiento entre 30 – 50°C por encima de  $\text{Ac}_3$  para los aceros hipoeutectoides y 30 – 50°C por encima de  $\text{Ac}_1$  para los aceros eutectoides e hipereutectoides seguido de un enfriamiento enérgico en un medio adecuado, con velocidad mayor que la crítica de Temple para obtener una estructura martensítica, dureza y resistencia en el acero.



¿Por qué los aceros hipoeutectoides se austenizan completamente y los hipereutectoides no?

Si se calienta entre Ac1 y Ac3 en los aceros hipoeutectoides queda parte de ferrita en la estructura austenítica y al enfriarse, se hereda en la transformación martensítica y esto ocasiona una disminución de la resistencia y la dureza (este defecto se denomina temple incompleto). Es por ello que en estos aceros se da temple completo (por encima de Ac3).

En el caso de los aceros hipereutectoides hay varias razones para no calentar por encima de Acm:

1. Aumenta mucho el tamaño del grano austenítico.
2. Se descarbura más la superficie del acero.
3. Disminuye algo la dureza de la estructura de martensita porque aumenta la cantidad de austenita residual.

Cuando se calienta entre Ac1 y Acm:

1. La cementita presente en el acero templado aumenta la dureza y la resistencia al desgaste.

Según lo anterior de acuerdo a la temperatura de calentamiento hay dos tipos de temple: **completo e incompleto.**



El tiempo total que dura el tratamiento térmico se compone del tiempo de calentamiento hasta la temperatura dada ( $T_c$ ) y el tiempo de permanencia a esta temperatura ( $T_p$ ).

$$T_{\text{total}} = T_c + T_p$$

La magnitud de  $T_c$  depende de la aptitud del medio para calentar, de las dimensiones de las piezas y de la colocación en el horno.  $T_p$  depende de la velocidad de los cambios de fase, la cual está determinada por el grado de calentamiento por encima del punto crítico y por la difusión de la estructura inicial.

En la práctica  $T_p$  puede tomarse como 1 min x mm para los aceros al carbono y 2 min x mm para los aceros aleados. El tiempo de calentamiento depende de muchos factores y puede oscilar entre 1 – 2 min para piezas pequeñas en baños de sales y muchas horas en piezas grandes en hornos de cámara.

El tiempo de calentamiento exacto solo puede establecerse por la vía experimental para una pieza dada en las condiciones concretas, pero se puede calcular de forma aproximada para lo cual existen varios métodos. Se puede tomar 1 min x mm en hornos de mufla y piezas de acero al carbono. Para aceros aleados debe incrementarse un 20 – 25%.

**Templabilidad:** Se entiende por templabilidad la profundidad a la que penetra en la pieza la zona templada. La templabilidad incompleta se explica porque durante el temple, la pieza se enfriará más rápido en la superficie que en el centro.

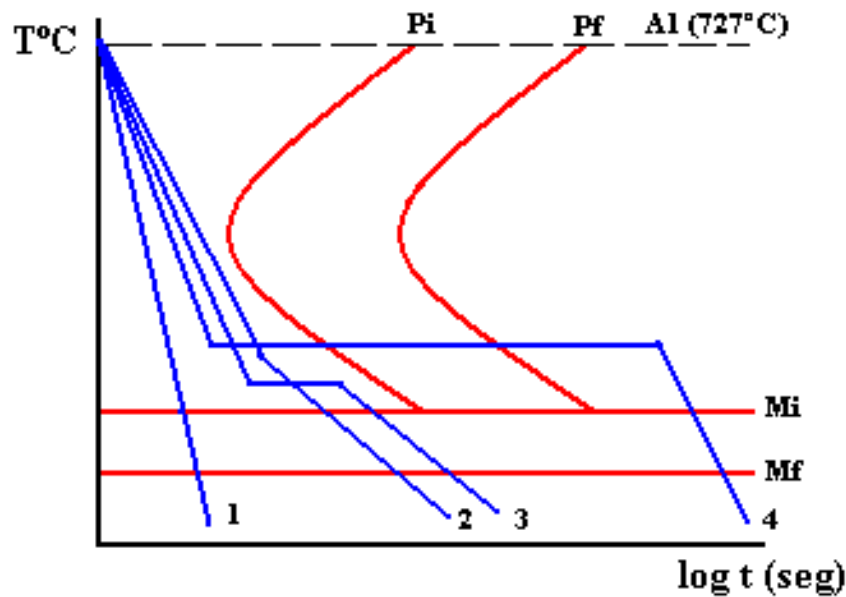
Es evidente que en la medida que disminuye la velocidad crítica de temple aumenta la profundidad de la capa templada, y si la  $V_c$  es menor que la velocidad de enfriamiento en el centro de la pieza, esta sección se templará completamente. Por consiguiente, cuanto menor sea  $V_c$ , tanto mayor será la templabilidad.

Para valorar prácticamente la templabilidad se utilizará una magnitud llamada diámetro crítico ( $D_c$ ). El diámetro crítico es el diámetro máximo para una barra cilíndrica que se temple en toda su sección en un medio de enfriamiento dado. Por consiguiente, para un acero dado a cada medio de enfriamiento le corresponde un diámetro crítico.

Si es necesario que una pieza se temple en todo su espesor hay que elegir un acero tal que:  
 $D_c > D_{\text{pieza}}$ .

Una pieza templada se halla siempre en un estado de tensión estructural. El revenido es un medio necesario y radical para disminuir las tensiones residuales. El calentamiento del acero en el revenido aumenta la plasticidad, esto permite que, en los diversos volúmenes, las deformaciones elásticas se conviertan en plásticas, con lo cual disminuye la tensión.

## Tipos de temple.



1. Temple continuo (en un solo medio).
2. Temple escalonado (en dos medios).
3. Temple Escalonado (Mantempering).
4. Temple isotérmico (Austempering).

## Otros procedimientos de temple.

1. Enfriamiento en chorro de agua (mayor templabilidad).
2. Temple con autorrevenido (para lograr que la dureza disminuya gradual y uniformemente. Se emplea en herramientas, cortafríos, punzones, hachas, etc. Solo se le da dureza al filo.)
3. Enfriamiento subcero (para disminuir la austenita residual).

- **Revenido.**

Uno de los orígenes de la aparición de grietas en las piezas templadas es la presencia de tensiones internas producto de la transformación martensítica. Para evitar este defecto es necesario aplicar el tratamiento térmico de revenido posterior al temple.

**Revenido:** Es un proceso tecnológico de tratamiento térmico que consiste en el calentamiento del acero templado hasta temperaturas por debajo de AC1, mantenimiento y enfriamiento posterior a la velocidad adecuada. Su objetivo es eliminar las tensiones internas y estabilizar la estructura martensítica.

### **Tipos de Revenido.**

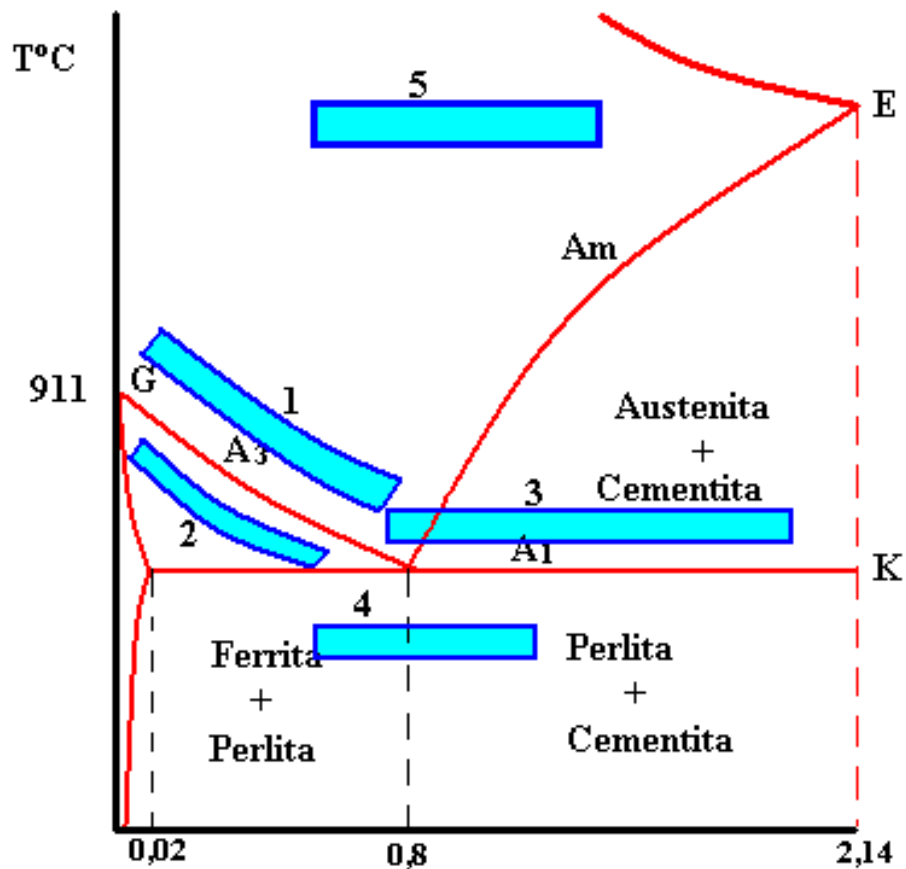
- **Revenido Bajo:** Se realiza en el intervalo de temperatura de 150°C a 250°C. Se utiliza para todos los aceros de herramientas de alto contenido de carbono. Prácticamente no disminuye la dureza, pero disminuye las tensiones internas y parte de la austenita residual.
- **Revenido Medio:** Se realiza a 350 – 450°C. Es muy utilizado en muelles y resortes. Disminuye bastante la dureza y se eleva la tenacidad. Se obtiene una estructura de troostita de revenido. También se puede utilizar en herramientas que deban tener buena resistencia con suficiente elasticidad.
- **Revenido Alto:** Se realiza a 500°C – 650°C. En este proceso, la martensita se transforma en sorbita de revenido. Esta estructura garantiza una mejor combinación de resistencia y plasticidad del acero. En la sorbita de revenido la cementita adquiere forma granular, a diferencia de la obtenida en un normalizado. Como consecuencia de esto se eleva notablemente la resistencia con la misma dureza o aún más elevada con relación al acero normalizado. Este tipo de revenido se emplea para piezas de acero que estén sometidas a elevada fatiga o cargas de impacto.

El temple del acero con un ulterior revenido alto se denomina termomejoramiento o bonificado.

- **Estudiar la fragilidad del revenido (de Primer y Segundo Género).**

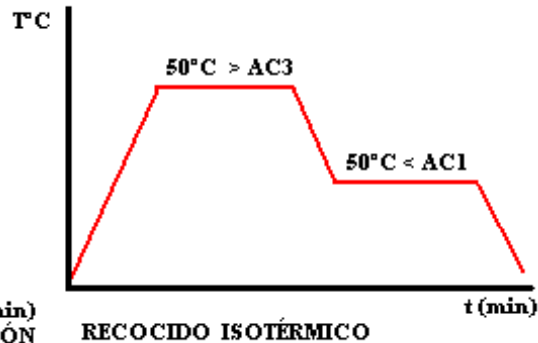
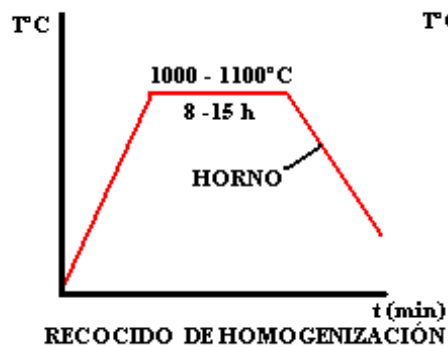
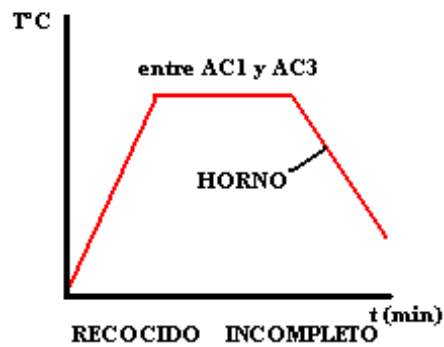
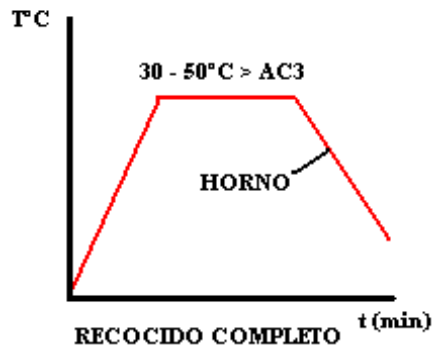
- **Recocido.**

**Recocido:** Es una de las operaciones de tratamiento térmico más importantes y utilizadas en el tratamiento térmico del acero. Consiste en calentar el acero hasta una temperatura dada, un mantenimiento a esa temperatura y un enfriamiento lento en el horno. Se obtienen estructuras de equilibrio, son generalmente tratamientos iniciales. Ablandan el acero. Atendiendo a los tipos que existen diferentes tipos.



## Tipos de Recocido.

1. Completo.
2. Incompleto.
3. Globulización.
4. Recristalización.
5. Homogenización.
6. Isotérmico.



- **Recocido Completo:** Elimina las estructuras indeseables como la de Windmanstaeten. Afina el grano cuando ha crecido producto de un mal tratamiento. Para aceros hipoeutectoides.
- **Recocido Incompleto:** Elimina tensiones. Solo recristaliza la perlita. Más económico.
- **Recocido de Globulización:** Mejora la maquinabilidad en los aceros eutectoides e hipereutectoides.
- **Recocido de Recritalización:** Disminuye tensiones. Elimina la acritud.
- **Recocido de Homogenización:** Elimina la segregación química y cristalina. Se obtiene grano grueso. Es necesario un recocido completo posterior.
- **Recocido isotérmico:** Economiza tiempo. Se emplea mucho en los aceros aleados. Se mantiene en baños de sales a temperaturas menores que A1 hasta que la descomposición de la austenita se produzca y después se enfría al aire.

- **Normalizado.**

**Normalizado:** Consiste en un calentamiento del acero aproximadamente 30 – 50°C por encima de Ac3 o Ac<sub>m</sub> y un enfriamiento posterior al aire. Se produce durante el mismo la recristalización y afino de la perlita. Se realiza con enfriamiento al aire. En el caso de los aceros con bastante carbono y mucha templabilidad, este tratamiento puede equivaler a un temple parcial, donde aparezcan productos perlíticos y martensíticos. Para aceros con bajo contenido de carbono no aleados no existe mucha diferencia entre el normalizado y el recocido. Para aceros de contenido medio (entre 0,3 – 0,5%C) la diferencia de propiedades es mayor que en el caso anterior. El normalizado da más dureza.

Objetivos del normalizado.

- Subsanan defectos de las operaciones anteriores de la elaboración en caliente (colada, forja, etc).
- Preparar la estructura para las operaciones tecnológicas siguientes (por ejemplo mecanizado o temple)
- Puede ser un tratamiento térmico final.

## CONCLUSIONES.

1. Las principales 4 transformaciones que ocurren en el acero son:
2. La transformación de perlita en austenita.
3. La transformación de austenita en perlita.
4. La transformación de martensita en perlita (o más exactamente en mezclas de ferrita y cementita).
5. Las transformaciones en el enfriamiento pueden ser con difusión (de austenita en perlita) y sin difusión (de austenita en martensita).
6. Como resultado de la transformación martensítica se origina una red tetragonal con elevada dureza y alto nivel de tensiones internas, la martensita.
7. Durante el revenido con la difusión del carbono la martensita pierde tetragonalidad transformándose en una estructura de mezcla de  $\alpha$  Fe<sub>3</sub>C.
8. El temple se aplica cuando se quiere aumentar la dureza y la resistencia de una pieza de acero.
9. El temple se clasifica en completo e incompleto durante el calentamiento en dependencia de la temperatura hasta donde se lleve a cabo el mismo.
10. El tiempo total de calentamiento durante el temple garantiza la homogenización de la austenita en toda la pieza.
11. Todos los aceros templados tienen tensiones residuales que se eliminan a través del tratamiento térmico de revenido.
12. En la medida que se aumenta la temperatura de revenido la estructura de la martensita pierde tetragonalidad hasta que la estructura del acero vuelve a ser una mezcla de ferrita y cementita.
13. Los recocidos ablandan el acero y permiten obtener en los aceros estructuras de equilibrio.
14. El normalizado se emplea para afinar el grano y recrystallizar la perlita.

### **Bibliografía.**

CALLISTER, WILLIAM D. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc., 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

CALLISTER, WILLIAM D. Ciencia e Ingeniería de Materiales. Una Introducción. Quinta Edición. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Utah. John Wiley & Son, Inc, 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

GULIAEV, A P. Metalografía. Tomos I y II. Editorial Mir. Moscú. 1983. p 186 188.

KOZLOV, Y. Ciencia de los Materiales – 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1986. p 76 – 78.

LAJTIN, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales – 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359 – 360.