

V- ESTRUCTURAS DEL ACERO

Basado en texto del Ing. Va Larre

V.1- En aceros recocidos

V.1.1. Ferrita

Es una solución sólida de pequeñísimas cantidades de C en Fe α . La máxima solubilidad, a los 723° C, es de 0,025% de C. Debido a que este valor es despreciable, se considera a la ferrita como Fe α casi puro. También puede disolver bajas cantidades de Si, P y otras impurezas (en aceros al carbono), y Ni, Mn, Cr, Al, N, etc. (en aceros aleados).

En la microestructura se presenta de las siguientes maneras.

V.1.1.1. Como elemento que acompaña a la perlita: ferrita proeutectoide o libre.

a) En aceros con $< 0,40\% \text{ C}$

Aparece en forma de granos mezclados entre los de perlita. Las áreas oscuras, en las imágenes a, b y c, de la Fig. V.1, son de perlita y las claras de ferrita.

b) En aceros con $0,40\% < \text{C} > 0,80\%$

Aparece en forma de redes rodeando a los granos de perlita, Fig. V.1d.

V.1.1.2. Dentro de la perlita: ferrita eutectoide.

Como una matriz sobre la que se disponen en forma más o menos ordenada, láminas de cementita. (Fig. V.2)

V.1.1.3. En estructura de Widmanstätten

Es una estructura acicular, grosera, típica de los aceros en bruto de colada; proporciona fragilidad y, por lo tanto es indeseable. La ferrita aparece rodeando los granos y a partir de ella se desarrollan las agujas o ramificaciones características de dicha estructura. Se originan por altas temperaturas de coladas, en el aporte y zonas afectadas por el calor en soldaduras, o durante transformaciones en estado sólido, cuando la velocidad de enfriamiento es demasiado alta para permitir la formación de ferrita intergranular. (Fig. V.3a).

V.1.1.4. En aceros de menos de 0,8% C templados sin llegar a la austenización completa

Durante el tratamiento con enfriamiento rápido denominado temple, la austenita se transforma en martensita. Si la temperatura de calentamiento es insuficiente, queda ferrita sin austenizar, que se mantiene hasta temperatura ambiente.

V.1.1.5. En aceros con recocidos de globalización

Son tratamientos que se realizan oscilando la temperatura alrededor de Ar1 (723° C). La cementita de la perlita se contrae en forma de glóbulos, quedando inserta en una matriz de ferrita. Este tratamiento, como se verá más adelante, se realiza para mejorar ciertas propiedades tecnológicas del acero, como la maquinabilidad y la deformabilidad.

En la Fig. V.3b, se observan glóbulos de cementita dispersos en una matriz blanca de ferrita, en un acero SAE 1064.

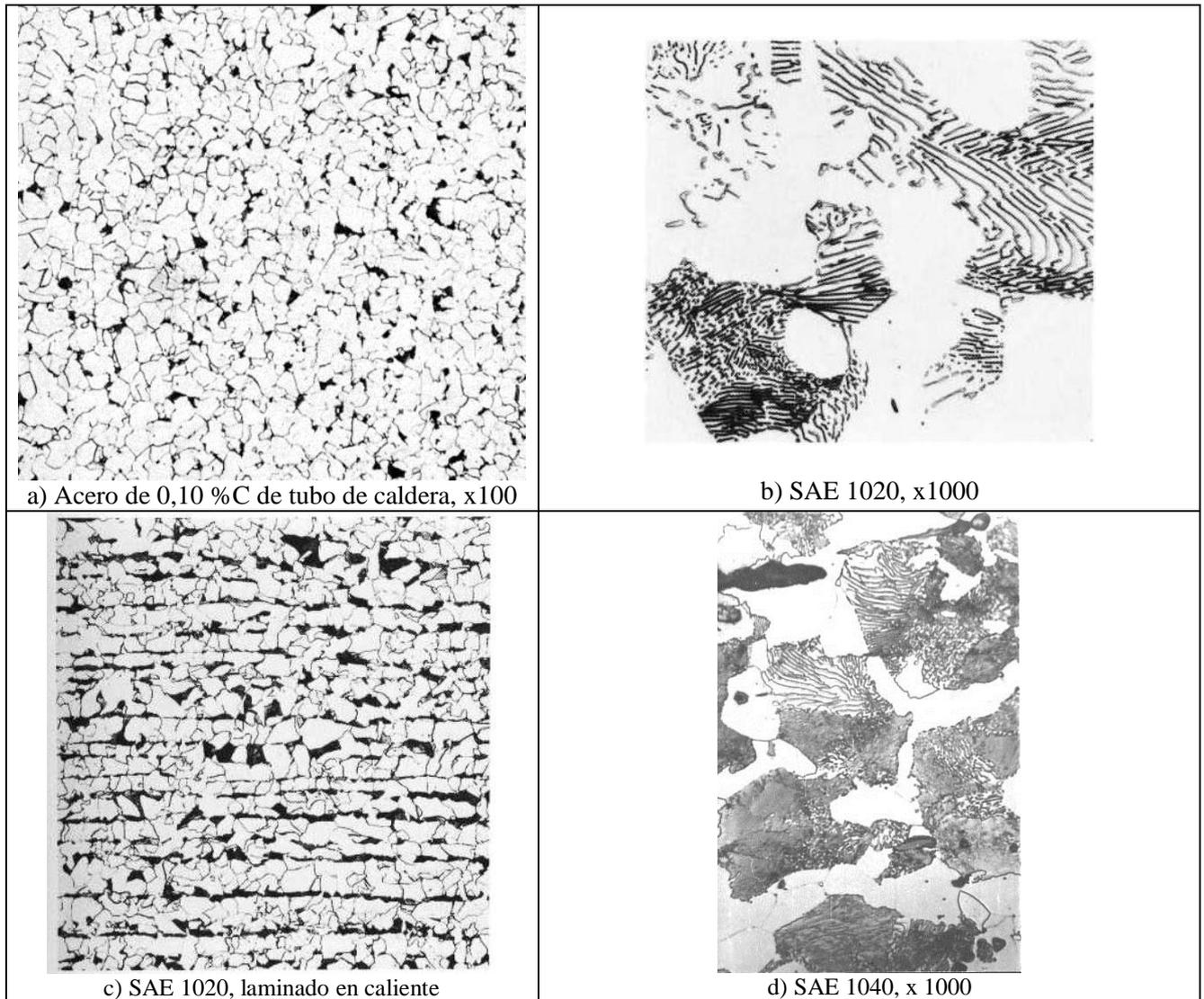


Fig. V.1: Microestructura de aceros hasta 0,40 % C

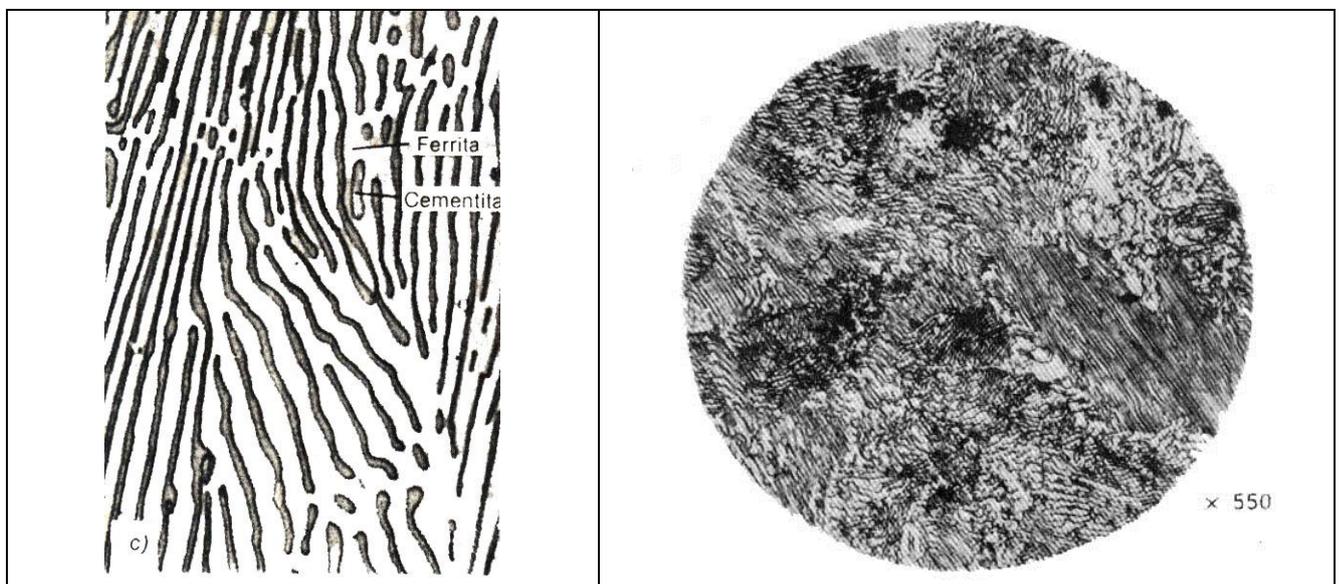


Fig. V.2: Microestructura de la perlita, 0,80 % C

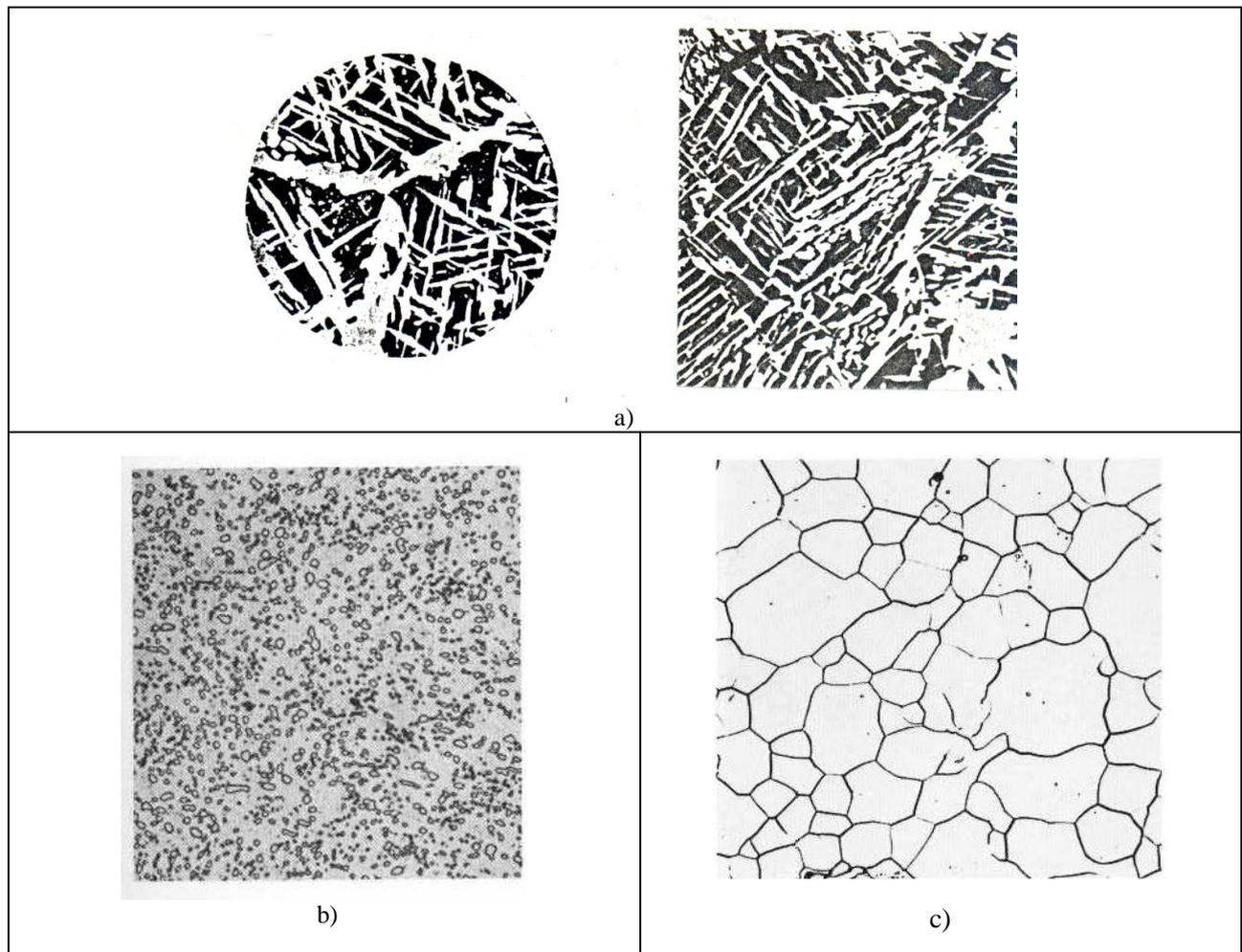


Fig. V.3: a) Ferrita Widmanstatten; b) Perlita globulizada; c) Acero de extra bajo carbono

V.1.1.6. En aceros de extra bajo carbono, < 0,035% C

Prácticamente es Fe casi puro, de red cristalina cúbica de cuerpo centrado (Fig. V.3c), magnética a temperatura ambiente. Las propiedades mecánicas de la ferrita pura son:

$$\sigma_t = 275 \text{ MPa}$$

$$A = 35 \%$$

$$\text{HB } 90$$

V.1.2. Cementita

Es el compuesto metaestable CFe_3 , con 6,67% C. Cristaliza en un sistema ortorrómbico de grandes dimensiones, $4,5 \times 5 \times 6,7 \text{ \AA}$. Las propiedades mecánicas de la cementita son:

$$\sigma_t = 2.940 \text{ MPa}$$

$$A = 0 \%$$

$$\text{HRc } 68$$

Es magnética hasta 218°C . Las formas en que se presenta son las siguientes:

V.1.2.1. En aceros con $\text{C} > 0.8 \%$ (hiperectectoides)

La cementita proeutectoide aparece en forma de retículos, rodeando a los granos de perlita, Fig. V.4a. En la observación metalográfica, se puede confundir con la ferrita. Para reconocerlas se debe pulir la probeta con abrasivos en fondo de goma. Esto desbasta las partes duras pero no las blandas; las primeras, lisas por ser menos atacadas por los reactivos químicos, reflejarán la luz del microscopio (si la iluminación es vertical) llegando al ocular. En cambio, las partes blandas más atacadas por el reactivo, más rugosas, reflejarán la luz incidente fuera del microscopio y del ojo del observador. Como la cementita es muy dura y la ferrita muy blanda, la primera se verá clara, iluminada, mientras que la última se verá oscura. Sin embargo, cuando la ferrita aparece en forma reticular, no es atacada por el reactivo. Por lo tanto, cuando se observa

una red blanca con un ataque común, no se puede determinar si es ferrita o cementita.

Para ello se realiza un ataque diferencial, con picrato de sodio en caliente (60°C) durante media hora. Si la retícula se ve clara, es de ferrita y se trata de un acero hipoeutectoide. Si la retícula se ve oscura el acero es hipereutectoide ya la fase es cementita. Las dos microfotografías de la Fig. V.4b, corresponden al mismo acero de 1,2 % de C normalizado. En la primera, la probeta fue atacada con Nital 2 (ácido nítrico al 2% en alcohol). Se observa la red blanca de cementita, pues se conoce el porcentaje de carbono y el tratamiento térmico que tuvo. De no tener estos datos, el ataque con picrato de sodio revelará una imagen como si fuera un negativo de la primer fotomicrografía: cementita oscura y perlita clara.

V.1.2.2. Dentro de la perlita

En este caso se llama cementita perlítica o eutectoide. Tiene la apariencia de láminas insertas en una matriz de ferrita, Fig. V.2.

V.1.2.3 En aceros con recocidos de globulización

En forma de nódulos, glóbulos o esferoides dentro de una matriz de ferrita, Fig. V.3b.

V.1.2.4. En aceros con más de 0,8 % C templados, sin llegar a la austenización completa.

Aparece rodeada por martensita o por otros constituyentes intermedios.

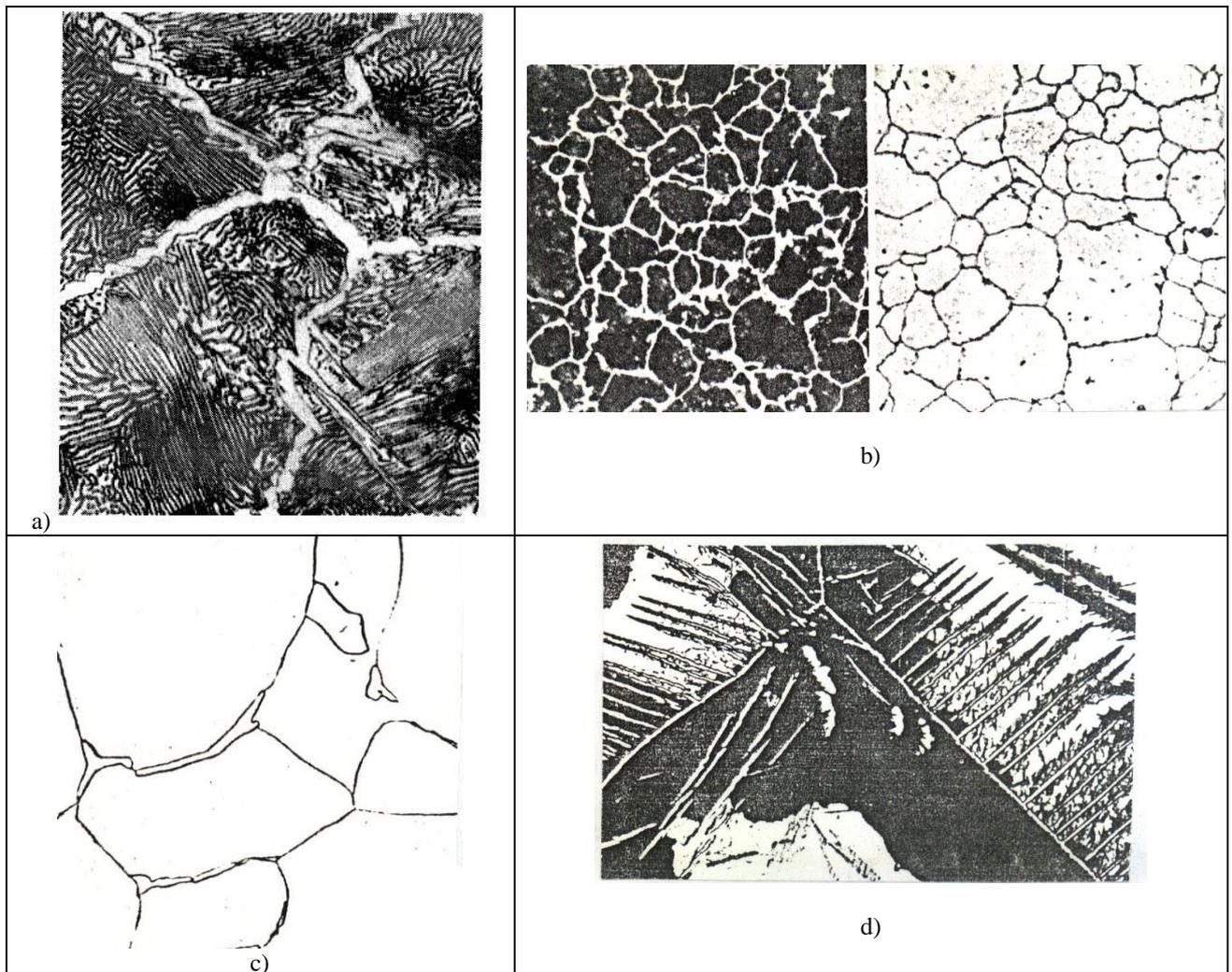


Fig. V.4: a) Acero hipereutectoide; b) observación de cementita proeutectoide con diferentes reactivos; c) Cementita terciaria, x1000; d) Cementita acicular

V.1.2.5. Precipitada de la ferrita en aceros con C < 0.25%

En este caso se denomina CFe_3 terciaria. En aceros con más de 0,25% la cementita 3^{ria} se confunde con la cementita de la perlita. La imagen de la Fig. V.4c muestra los granos de ferrita rodeados de cementita en un acero completamente ferrítico.

V.1.2.6 Agujas en aceros cementados:

Se observa en la Fig. V.4d, y se presenta para enfriamientos más acelerados.

V.1.3 Perlita

Es un constituyente formado por láminas intercaladas de cementita y ferrita, Fig. V.2, cuya composición química es 0,8 % C y 99,2 % Fe (12,4 % CFe_3 y 87,6 % Fe). Aparece siempre que haya un enfriamiento lento, por debajo de los 720° C. Según la velocidad de enfriamiento estas láminas aparecen más o menos separadas. Dentro de su normal lentitud, a mayor velocidad de enfriamiento, menor distancia interlaminar.

	DISTANCIA ENTRE LAMINAS (μm)	Dureza (HB)
1) Láminas gruesas	0,4	190-210
2) Láminas medianas	0,35	210-230
3) Láminas finas	0,25	230-300

Las propiedades mecánicas de la perlita son:

$$\sigma_t = 780 \text{ MPa}$$

$$A = 15 \%$$

$$HB \text{ 190 a 300}$$

V.2. Estructuras típicas del temple

V.2.1. Austenita

Es la solución sólida de carbono en $Fe\gamma$ (FCC), cuya máxima solubilidad, 2 % C, se da a los 1130° C. Está presente en los aceros a temperaturas superiores a A_{c1} . Por encima de A_{c3} o A_{cm} , los aceros comunes son completamente austeníticos. Se la incluye dentro de las estructuras de temple pues a partir de ella, cuando el enfriamiento es suficiente rápido para impedir la difusión del carbono, se forma la estructura típica del temple, martensita. En aceros aleados o hipereutectoides, se encuentra a temperatura ambiente ya que no alcanzan a transformar completamente a martensita durante el temple; en este caso se la denomina “austenita retenida”. También se encuentra a temperatura ambiente en aceros inoxidable de alto níquel, denominados austeníticos, y en los indeformables de alto Mn (12 %).

La diferente tonalidad de los granos de austenita en la Fig. V.5, se debe al ataque del reactivo empleado (10 ml HNO_3 + 10 ml ácido acético + 15 ml HCl + 2 gotas de glicerol). La orientación espacial de los cristales en los distintos granos es la causa de ese ataque diferencial y de la dispar rugosidad en los mismos. A consecuencia de esto, la luz proyectada por el microscopio se perderá en algunos casos y se reflejará sobre el ocular en otros, resultando distintas tonalidades.

Es paramagnética, resistente al desgaste, dúctil, tenaz. Es el constituyente más denso de los aceros. Las propiedades mecánicas de la austenita son:

$$\sigma_t = 860 \text{ a } 1030 \text{ MPa}$$

$$A = 30 \text{ a } 60 \%$$

$$HB \text{ 300}$$

V.2.2. Martensita

Se obtiene por enfriamiento rápido de la austenita, sin que actúe la difusión. Es una solución sólida sobresaturada de C en hierro α , por lo que la estructura cristalina es tetragonal centrada. Su elevada dureza aumenta con el porcentaje de C; no obstante, cuando se supera el 0,75% C queda algo de austenita sin transformar, y el promedio de dureza decrece ligeramente. La Fig. V.6a muestra su aspecto metalográfico de

agujas en zig-zag en una matriz de austenita. Cuando la transformación de la austenita es completa, la observación es más difícil, como se muestra la Fig. V.6b correspondiente a un acero de medio contenido de carbono. Si la temperatura de temple es correcta, las agujas muy finas de martensita exigen 1000 x de aumento o más, para su interpretación.

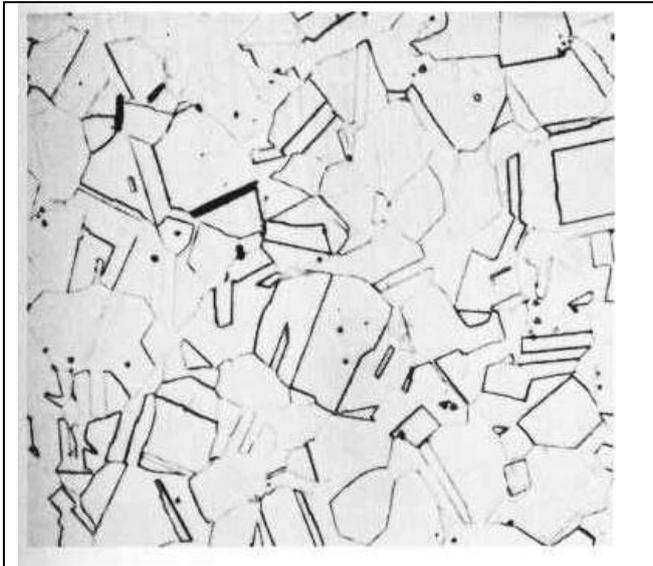
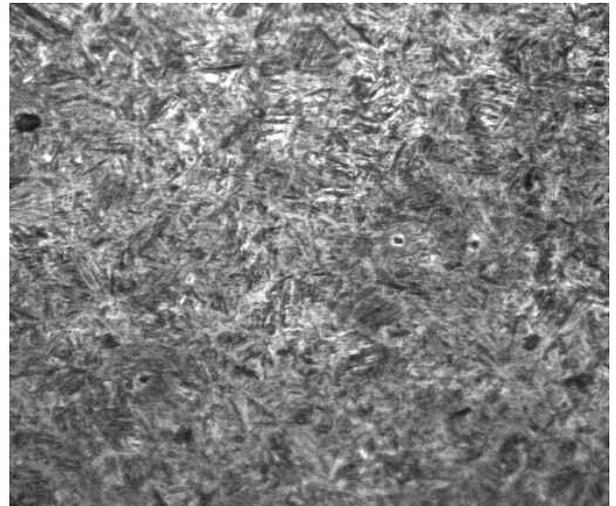


Fig. V.5: Microestructura de un acero inoxidable AISI 201, recocido 5 min a 1060° C y enfriado rápidamente. Se observan granos equiaxiales y maclas de recocido.



b)



c)

Fig. V.6: Estructuras martensíticas

a) Acero para herramientas (0,9 % C, 1 % Mn, 0,50 % Cr, 0,50 % W), austenizado a 980° C, templado en aceite y revenido a 218° C. Se observan agujas de martensita (negras) en una matriz de austenita retenida (blanca)

b) Acero de 0,5 % C.

c) Acero de 1,7 % C bruto de colada, templado a 1200° C en salmuera. Se observan dos clases de martensita, más y menos clara, sobre un fondo gris de austenita retenida; las improntas negras se deben a un ensayo de microdureza.

Por calentamiento a baja temperatura (encima de 150° C), la red tetragonal inestable de la martensita tiende a transformarse en cúbica, precipitando el C en forma de pequeñas partículas submicroscópicas. Este tratamiento se denomina *revenido*. Para diferenciarlas, se denomina α' a la primera martensita y β a la última. Ésta se ve como agujas ennegrecidas, a diferencia de las agujas más claras de la martensita α' , Fig. V.6c. A medida que aumenta la temperatura, sin llegar a A_{c1} la precipitación es cada vez más intensa.

La velocidad de enfriamiento alta (alrededor de 120°/hora) es fundamental para la aparición de la martensita. En piezas de secciones grandes, esa velocidad se logra sólo en algunos sectores; en esos casos aparecerá martensita acompañada con otras estructuras intermedias de menor dureza: toostita, sorbita y bainita. Las propiedades mecánicas de la martensita son:

$$\sigma_t = 1.800 \text{ a } 2.450 \text{ MPa}$$

$$A = 2,5 \text{ a } 0,5 \%$$

HRC 48 a 68 para 0,35 y 0,9 % C respectivamente.

V.2.3. Bainita

Es un constituyente intermedio entre la austenita y la martensita, propio del tratamiento isotérmico denominado *Austempering*. Se trata de un agregado de cementita y ferrita, el último constituyente descubierto por Bain.

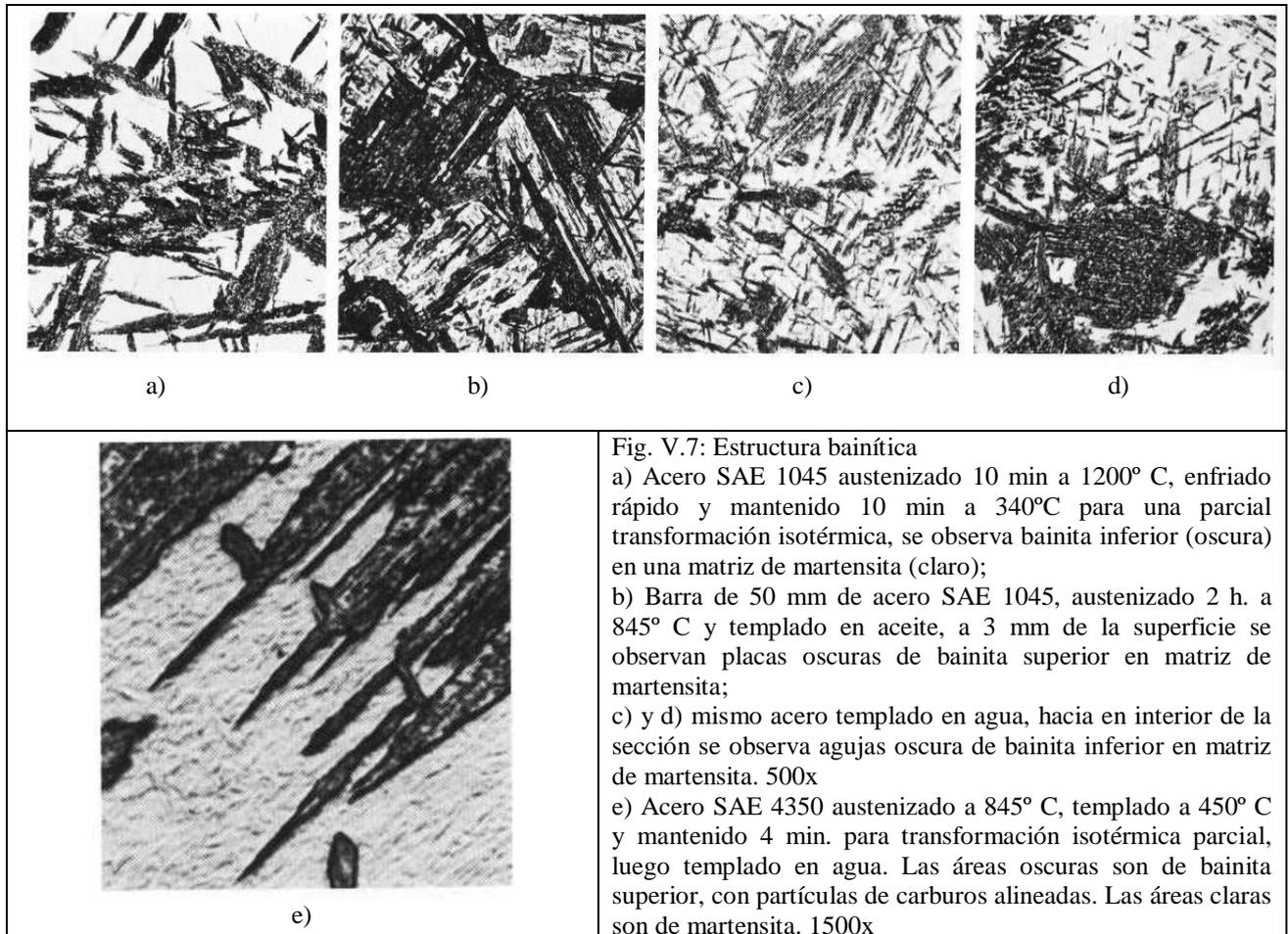


Fig. V.7: Estructura bainítica

a) Acero SAE 1045 austenizado 10 min a 1200° C, enfriado rápido y mantenido 10 min a 340° C para una transformación isotérmica, se observa bainita inferior (oscura) en una matriz de martensita (claro);

b) Barra de 50 mm de acero SAE 1045, austenizado 2 h. a 845° C y templado en aceite, a 3 mm de la superficie se observan placas oscuras de bainita superior en matriz de martensita;

c) y d) mismo acero templado en agua, hacia en interior de la sección se observa agujas oscura de bainita inferior en matriz de martensita. 500x

e) Acero SAE 4350 austenizado a 845° C, templado a 450° C y mantenido 4 min. para transformación isotérmica parcial, luego templado en agua. Las áreas oscuras son de bainita superior, con partículas de carburos alineadas. Las áreas claras son de martensita. 1500x

Se forma cuando la estructura previamente austenizada se mantiene un tiempo suficiente a temperatura constante, que puede variar entre 250 y 600° C aproximadamente. Si la temperatura está entre 500 y 550° C, se obtiene la bainita superior o plumosa, de aspecto arborescente, constituida por una matriz ferrítica conteniendo carburos (cementita en los aceros al C) en delgadas partículas, con orientación paralela a la dirección de las agujas de la propia bainita. En la micrografía de la Fig. V.7b se observa bainita superior o plumosa, en una matriz de martensita (blanca) a 500x. La Fig. V.7e corresponde a bainita obtenida a 450° C

en un acero SAE 4350, con un aumento de 1500x; se puede apreciar la orientación de las partículas de carburo dentro de la bainita.

La bainita inferior, Fig. V.7a y c, tiene un aspecto acicular, formándose por transformación isotérmica a una temperatura comprendida entre 250 y 400°C. Las agujas están formadas por ferrita con partículas de carburos más delgadas y juntas que en el caso anterior y que además tienen una orientación a 60° respecto a las agujas matrices de ferrita.

La dureza de la bainita aumenta cuando disminuye la temperatura del austempering, debido a que decrece el tamaño y distribución de los carburos, de modo similar a lo que ocurre con la perlita.

Las propiedades mecánicas de la bainita son:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= 1.770 \text{ MPa} \\ A &= 5\% \\ \text{HR}_C &= 50 \text{ Promedio} \\ Z &= 46,4\% \quad (\text{estricción relativa})\end{aligned}$$

V.2.4. Sorbita

Es un agregado fino de cementita e hierro α . Se obtiene, como el caso anterior, por transformación de la austenita a temperatura constante entre 600 y 650° C; el constituyente resultante es también intermedio entre la austenita y la martensita. Sólo con grandes aumentos se puede definir su forma de pequeños "gusanillos" o como granos blancos muy finos sobre un fondo oscuro, separados a 100 – 250 μm . A veces se confunde con la perlita, pero su aspecto es menos definido.

Sus propiedades mecánicas son:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= 870 \text{ a } 1.400 \text{ MPa} \\ \text{HB } 250 \text{ a } 400 \text{ (HR}_C \text{ 25 a 40)} \\ A &= 10 \text{ a } 20\%\end{aligned}$$

V.2.5. Troostita

En un agregado extremadamente fino de cementita e hierro α . Se produce por enfriamiento de la austenita a una velocidad ligeramente inferior a la denominada "crítica de temple" o por transformación isotérmica de la austenita a temperatura comprendida entre 500 y 600° C. Fig. V.8.

Su forma es nodular oscura, con estructura radial y aparece acompañando a la martensita, situándose en los bordes de grano austeníticos. Observada a grandes aumentos revela laminillas similares a la perlita, orientadas hacia un nódulo central. La distancia interlaminar es de 100 μm .

Sus propiedades mecánicas son:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= 1.400 \text{ a } 1.700 \text{ MPa} \\ A &= 5 \text{ a } 1\% \\ \text{HB } 400 \text{ a } 500 \text{ (HR}_C \text{ 40 a 50)}\end{aligned}$$



Fig. V.8: Estructura resultante de un temple incorrecto: troostita en bordes de grano (oscuro) el resto es martensita.

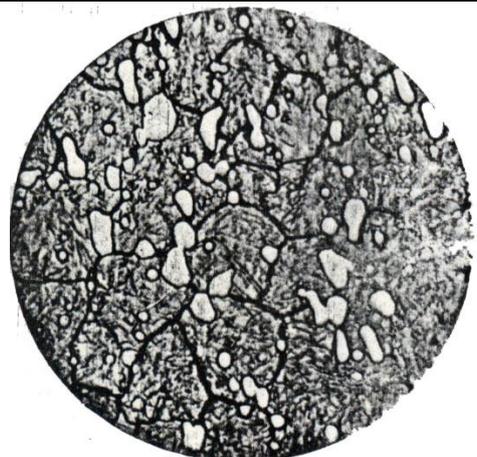


Fig. V.9: Carburos en un acero rápido, 2500x.

V.3. Carburos

Son fases muy duras que se forman al combinarse el C con algunos elementos aleantes. Pueden ser:

- a) Carburos simples: formados por un elemento especial combinado con el C.
- b) Carburos dobles: formados por un elemento especial e hierro con C.
- c) Carburos compuestos: formados por mezclas de carburos simples con carburos de hierro.

Los carburos de elementos de aleación, como el Cr, Ni, Mo, Mn, W, V, etc, se ponen de manifiesto como "lagunas blancas" al microscopio. Tienen puntos de fusión bajos; sin embargo, una vez solidificados, tienen una gran dureza (70 -80 HR_C) siendo las estructuras más duras que se encuentran en los aceros, superando a la martensita.

Cuando se trata de aceros indeformables (12 - 13 % Cr y 2 % C) o aceros rápidos (18 % W y 4 % Cr), que contienen alto Cr y es necesario que los carburos se encuentren muy bien distribuidos, se lleva al material a muy alta temperatura (aproximadamente 1300° C) y se deja el tiempo necesario para que los carburos se disocien, y difundan sus elementos en la matriz. Luego, cuando se enfría (aprox. 800° C) el carburo precipita en forma de partículas, más pequeñas y mejor distribuidas.

Una de las propiedades más importantes de los aceros con carburos es la facultad que poseen de conservar su dureza cuando son calentados a temperaturas relativamente elevadas, mientras que los aceros al C templados, de estructura martensítica, se ablandan mucho más rápidamente. Por eso se los utiliza para fabricar herramientas que conservan su poder cortante aún trabajando casi al rojo.

V.4. Distribución y efecto de los elementos aleantes

La presencia de elementos de aleación: Cr, Ni, Mo, W, etc. no se puede determinar en el examen microscópico, porque las estructuras perlíticas, bainíticas, martensítica, etc, son exactamente iguales en un acero al C común o en aceros aleados. En cambio, después de idénticos tratamientos térmicos, las estructuras finales obtenidas serán distintas. Por ejemplo, un acero de 0,30 % C calentado a 850° C y enfriado al aire, da una estructura perlítica; en cambio, en un acero con 0,30 % C, 1,25 % Cr, 5 % Ni, 0,60 % Mo, con el mismo tratamiento, resultará martensita como estructura final. No obstante, examinadas aisladamente, no se puede distinguir si esas estructuras provienen de un acero al C o de uno aleado.

Los diferentes elementos aleantes se pueden encontrar en los aceros recocidos, en alguna de estas formas:

- a) Disueltos en la ferrita, como Ni, Cr, Mn, Cu, Al, Si, P.
- b) Combinados con el C: tienen tendencia a formar carburos, simples, dobles o compuestos; como Cr Mo, Mn, W y V.
- c) Combinados con otros elementos: formando inclusiones no metálicas. El Si y el Al forman silicatos y aluminatos o silicoaluminatos de Ca, Fe, Mn y Cr. El titanio forma OTi, carburos, nitruros y cianonitruros de Ti. El Mn forma silicatos y sulfuros.
- d) Dispersos formando fases raras, como el Cu cuando su porcentaje supera el 0,75 %.

V.5. Inclusiones no metálicas

Interrumpen la continuidad de la estructura y disminuyen la resistencia de los aceros.

Pueden ser de tres tipos: sulfuros, óxidos y silicatos. Dentro de los sulfuros (Fig. V.10a), el más importante es el SMn, que es plástico, de color gris paloma y se deforma y alarga por forja y laminación (Fig. V.10b y c). Es menos perjudicial que los óxidos y silicatos.

Los óxidos provienen de una oxidación muy intensa y el exceso de desoxidantes (Fig. V.10d y e). La alúmina (Al₂O₃) es consecuencia de un exceso de Al agregado como desoxidante. Los óxidos constituyen las inclusiones más comunes; la Al₂O₃, es muy dura y frágil, se rompe y dispersa con la forja y la laminación.

Los silicatos (Fig. V.10f y g) provienen de escorias no muy fluidas, por temperatura insuficiente del horno, lo que provoca su emulsión en el resto de la masa líquida. Son las inclusiones más peligrosas porque reducen las buenas características del acero. Se alargan y rompen por laminación y forja.

Hay elementos, como el hidrógeno, que no se distinguen, pero que aparecen en todos los aceros, disminuyendo sus propiedades mecánicas. En algunos casos forma puntos brillantes llamados "ojos de pescado" (fish eyes), que confieren mucha fragilidad a la estructura.

El fósforo en exceso, forma un eutéctico llamado steadita, que está compuesto por CFe₃ y PFe₃ en matriz ferrítica, es muy frágil. (Fig. V.10h)



Fig.V.10a: Sulfuros mixtos de Fe y Mn conteniendo unos pequeños puntos de óxido (negro). Tal cual pulido, 1000x



Fig.V.10b: SAE 4140 templado, se observa martensita e inclusiones alargadas de sulfuro de manganeso, 500x.



Fig.V.10c: Inclusión longitudinal de sulfuro segmentado en acero de tubos SAE 1215 estirado en frío, Tal cual pulido, 1000x.

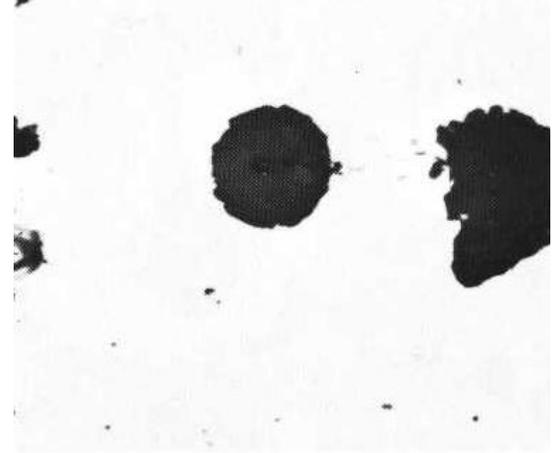


Fig.V.10d: Inclusión de SiO₂ en el centro; el óxido irregular a la izquierda es FeO-SiO₂. Tal cual pulido, 1000x.

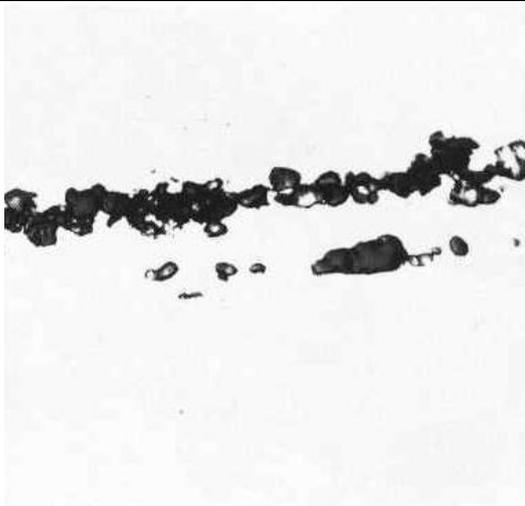


Fig.V.10e: Inclusión de alúmina en acero de tubos SAE 1025 estirado en frío, tal cual pulido, 1000x.

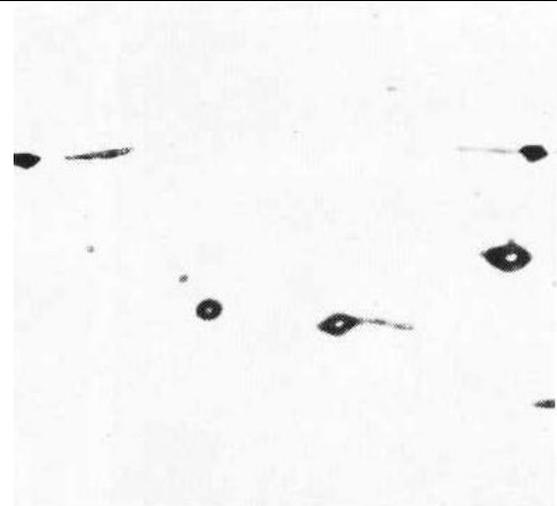


Fig.V.10f: Silicatos globulares y vidriosos; las colas adjuntas son sulfuros, tal cual pulido 1000x.

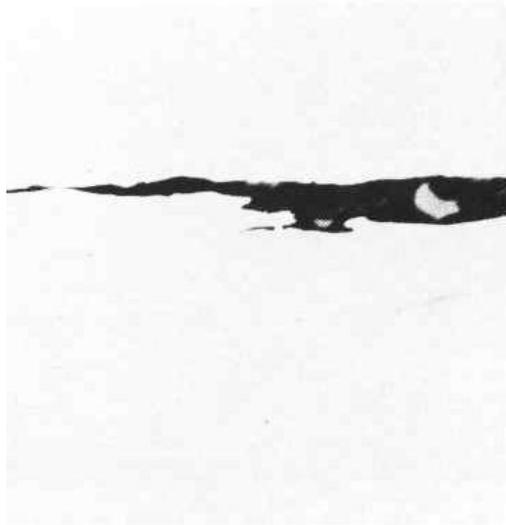


Fig.V.10g: Gran inclusión de silicato en acero de tubos SAE 8620. Tal cual pulido, 250x.



Fig.V.10h: Fundición gris clase 30B con área de steadita y grafito tipo A en matriz de perlita, atacado con Nital, 1500x.