

MATERIALES METÁLICOS

4.1 Metalurgia

El arte y la ciencia que se ocupa de la preparación y aplicación de los materiales metálicos se denomina metalurgia. Se reconocen tres ramas distintas de la metalurgia, aunque todas están interrelacionadas: la metalurgia química, la metalurgia física y la metalurgia mecánica.

La *metalurgia química* se refiere a los procesos de obtención de metales a partir de productos encontrados en la naturaleza, lo que no será tratado en este texto por no ser materia odontológica.

La *metalurgia física* se ocupa del estudio de la naturaleza, estructura y propiedades de los materiales metálicos así como de los mecanismos que se pueden utilizar para variar esas propiedades. El tema de la metalurgia física incluye la metalografía, el ensayo de propiedades y los tratamientos térmicos. La *metalografía* es el estudio de la estructura de los metales con la ayuda del microscopio metalográfico, la difracción de rayos X y otros métodos y permite correlacionar la estructura observada con las propiedades físicas y mecánicas.

La *metalurgia mecánica* cubre el estudio de los métodos para dar forma a los metales. Los principales son el colado (obtención de cuerpos metálicos por volcado del material líquido y posterior solidificación dentro de un molde), y el forjado (obtención de formas metálicas por deformación mecánica, golpes, dobleces, etc.) complementados con la soldadura (procedimiento utilizado para unir partes metálicas).

4.2 Metales - Su estructura

Los metales son elementos químicos que tienen ciertas características que los identifican y los distinguen de los elementos no metálicos.

En muchas oportunidades se utilizan propiedades tales como lustre, opacidad, conductividad térmica y eléctrica y otras para definir a los metales. Sin embargo, hay elementos como el carbono, silicio y boro que si bien tienen algunas características de los metales no pueden ser considerados como tales. La definición de metal basada en la química es la menos sujeta a controversias. Según ella, *metal* es todo elemento que en solución ioniza positivamente (da lugar a iones positivos o cationes). Más de las tres cuartas partes de los elementos conocidos son metales. Algunos elementos que no ionizan positivamente tienen algunas características de metal y se los conoce con el nombre de *metaloides*, los que mezclados con algunos metales dan combinaciones de mucha utilidad.

Como ya se mencionó en el capítulo 1, los metales son elementos que en estado sólido tienen una estructura cristalina, es decir que forman cristales, con iones distribuidos de forma tal que llevan a la formación de un reticulado espacial. En él, en este caso, se encuentra también la denominada nube electrónica, característica del enlace metálico.

De acuerdo con las diferentes ubicaciones que pueden tener los iones en el reticulado espacial se pueden dar distintos tipos de celdas unitarias. Los tres tipos que más frecuentemente se encuentran en los metales son las formas denominadas: cúbica a cuerpo centrado, cúbica a cara centrada y hexagonal compacta (figura 4.1).

El sodio metálico tiene un reticulado espacial cúbico a cuerpo centrado. Tal como se ve en la figura 4.1, a, la celda correspondiente tiene un ion en cada vértice del cubo y otro ion en el centro del cuerpo del cubo.

El oro y el cobre tienen reticulados espaciales cúbicos a cara centrada con una celda (figura 4.1, b), con un ion en cada vértice y otro en el centro de cada cara del cubo.

El cinc cristaliza en un reticulado hexagonal compacto. La celda correspondiente (figura 4.1, c) se caracteriza por tener una capa superior y una inferior de forma hexagonal con un ion en cada vértice y uno en el centro y además una capa intermedia de tres iones entre la superior y la inferior.

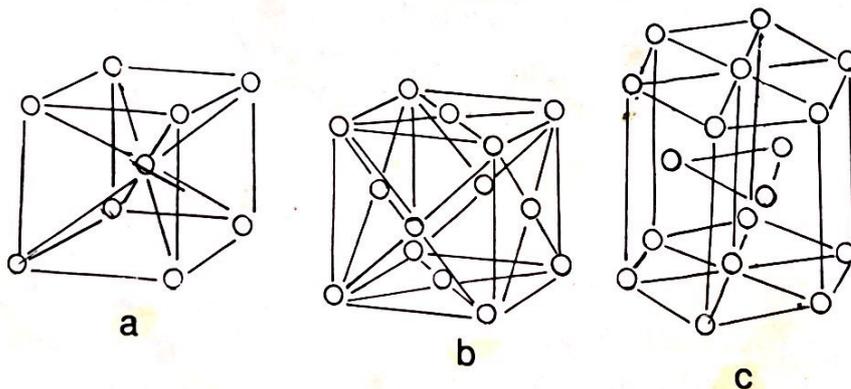
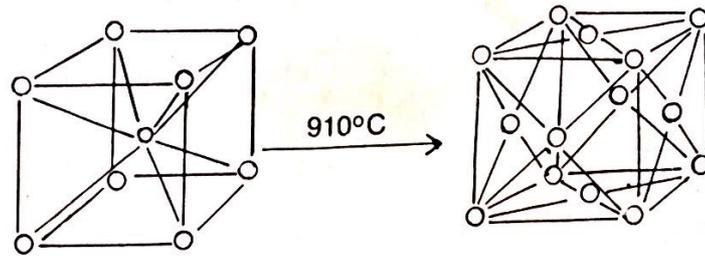


Fig. 4.1. Celdas unitarias: cúbica a cuerpo centrado (a), cúbica a cara centrada (b) y hexagonal compacta (c).

Fig. 4.2. Cambio alotrópico en el hierro.



En realidad, no puede considerarse que en cada vértice o cara de las celdas haya un ion, ya que éste es compartido por las celdas vecinas. Sólo parte de él, por tanto, pertenece a una celda en particular.

Las propiedades físicas y mecánicas de los metales dependen, entre otras cosas, de su estructura cristalina. Así, por ejemplo, una estructura cúbica a cara centrada es más dúctil que una cúbica a cuerpo centrado. El conocimiento de la estructura cristalina es también importante si se tiene en cuenta que un cristal puede tener propiedades distintas en diferentes direcciones. Por ejemplo, un cristal de cobre es más resistente cuando se lo tracciona en una dirección que en otra; un cristal de cinc conduce el calor más rápidamente en una dirección que en otra. Esta propiedad de *anisotropía* es característica de las estructuras cristalinas.

Algunos metales cambian su estructura cristalina al cambiar su temperatura. Este fenómeno se denomina *cambio alotrópico*. El hierro, por ejemplo, tiene una estructura cúbica a cuerpo centrado a temperatura ambiente, pero al calentarlo a 910°C experimenta un cambio alotrópico y pasa a tener una estructura cúbica a cara centrada (fig. 4.2).

4.3 Granos cristalinos - Solidificación de metales

La forma macroscópica de un cristal puede corresponder en algunos casos a la forma de la celda unitaria. Así, por ejemplo, los cristales de cloruro de sodio (material cerámico) son generalmente cúbicos, tal como la celda unitaria. Los cristales de metales, por lo contrario y debido a la elevada energía superficial que tienen, toman distintas formas.

Si se pule la superficie de un metal y se la prepara adecuadamente es posible observar por medio del microscopio por reflexión una

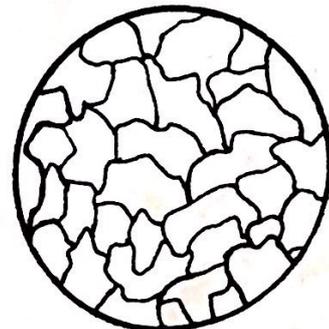


Fig. 4.3. Esquema de los granos cristalinos en un metal cuando es observado microscópicamente por reflexión.

estructura como la que se muestra en la figura 4.3. Cada uno de los polígonos que se ven es un cristal, o sea que el metal de la figura es un material policristalino. Cada uno de los cristales (polígono en la figura) se conoce como *grano cristalino*. Es necesario tener presente que si bien la observación se realiza en una superficie, los granos cristalinos se extienden en las tres direcciones del espacio.

Los cristales individuales o granos cristalinos se forman cuando un metal solidifica. Al llegar a una temperatura desde el estado líquido (temperatura diferente para cada metal y denominada *temperatura de solidificación* o *de fusión*) se forman las primeras porciones de metal sólido (podría decirse que se forman las primeras celdas unitarias). Sobre éstas se depositan las porciones que solidifican posteriormente provocando el crecimiento de los centros originales. Las primeras porciones en solidificar actúan como *núcleos de cristalización*. El depósito de nuevo metal solidificado sobre esos núcleos hace que éstos crezcan. Por la forma en que se hace (como las ramas de un árbol), ese crecimiento se denomina *dendrítico*.

Cuando el crecimiento dendrítico hace que los núcleos se pongan en contacto, el crecimiento se detiene, el metal ha solidificado por completo y alrededor de cada núcleo se ha formado un grano cristalino.

Como los distintos núcleos de cristalización no tienen la misma orientación en el espacio (sólo por una casualidad remotísima esto podría ocurrir), al ponerse en contacto los núcleos en crecimiento, no puede haber continuidad que haga que el reticulado se prolongue ininterrumpidamente a través del metal. En las zonas de contacto entre los granos el reticulado pierde su regularidad y, por espacio de un espesor de unos pocos átomos (o iones), existe un desorden.

Ello hace que esta zona reaccione de manera distinta ante agentes químicos y posibilita su observación microscópica por reflexión, como se vio en la figura 4.3. El proceso de solidificación y formación de granos cristalinos se esquematiza en la figura 4.4.

La línea (o, en realidad, espacio) que separa un grano de otro se denomina *espacio intergranular*. Este espacio tiene gran importancia en el comportamiento de los metales ante la acción de cargas, tal como se analizará más adelante.

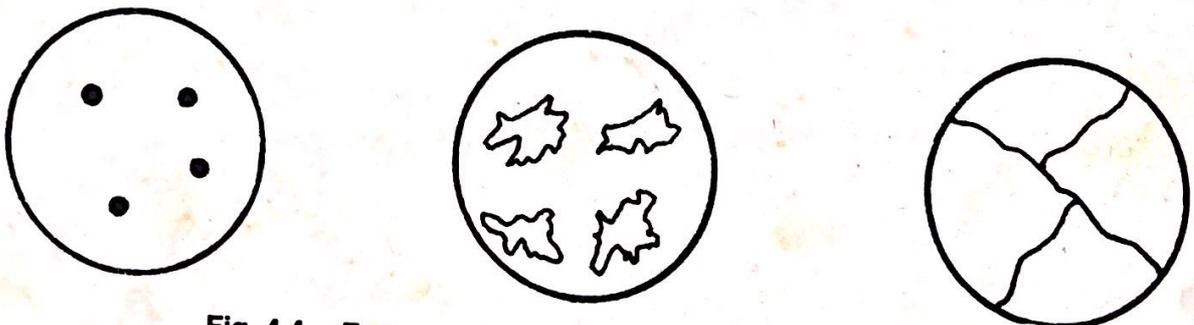


Fig. 4.4. Esquema del proceso de solidificación de un metal.

4.4 Curvas de enfriamiento

Los cambios que experimenta el metal en el momento de solidificar pueden estudiarse observando la forma en que se enfría desde el estado líquido.

Si se registra el comportamiento térmico de un metal al enfriarse (es decir, si se toman lecturas de su temperatura en función de tiempo), y se llevan los datos a un sistema de coordenadas cartesianas ortogonales, es posible obtener lo que se denomina *curva de enfriamiento* de ese metal. En la figura 4.5 se muestra la curva de enfriamiento de un metal.

Lo primero que llama la atención en una curva de este tipo es la presencia de una porción horizontal, llamada meseta. La temperatura a la cual se produce esa meseta es aquella a la cual el metal solidifica (o sea que será también la temperatura de fusión de ese metal). Observando al material durante ese lapso puede comprobarse que en él existen partes líquidas y partes sólidas, es decir dos fases (véase el capítulo 3). A temperaturas superiores e inferiores, en cambio, existe tan sólo una sola fase líquida o sólida, respectivamente.

La temperatura se mantiene constante durante esa solidificación (y correspondiente cristalización) debido a la liberación del llamado calor latente de fusión. Éste representa la diferencia que existe entre la energía que tiene la estructura en estado líquido y la mucho menor que tiene en estado sólido.

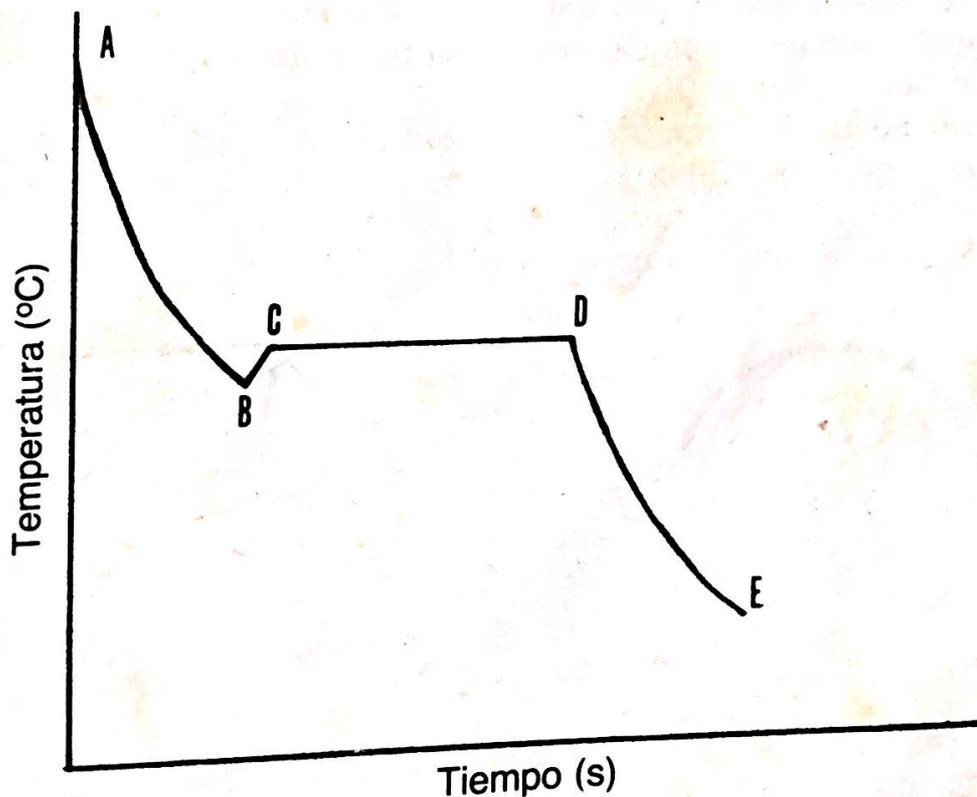


Fig. 4.5. Curva de enfriamiento de un metal.

Es importante notar también que, al enfriar desde el estado líquido (punto A de la figura 4.5) el metal no comienza a liberar calor al llegar a la temperatura de solidificación sino que continúa enfriándose hasta un poco por debajo de ella (punto B en la misma figura). Este fenómeno se conoce con el nombre de *sobreenfriamiento*. Sólo después de ello se forman los primeros núcleos de cristalización produciéndose la exotermita que eleva la temperatura hasta la de solidificación (punto C en la figura) y la mantiene constante hasta terminada la cristalización (punto D en la figura). A partir de allí continúa perdiéndose calor hasta alcanzar la temperatura ambiente (punto E en la figura).

El sobreenfriamiento se produce porque los primeros átomos o iones que se unen para formar núcleos tienen que alcanzar un cierto valor de energía como para no ser absorbidos por la energía del líquido que los rodea. Sólo lo logran a temperatura inferior a la real de solidificación.

4.5 Tamaño del grano

Repitiendo, es al terminar el sobreenfriamiento (punto B en la figura 4.5) cuando se forman los núcleos de cristalización. De acuerdo con el número de núcleos que se formen en el metal que solidifica será posible obtener un sólido con pocos granos cristalinos por unidad de volumen (o sea con granos relativamente grandes) o un sólido con muchos granos cristalinos por unidad de volumen (o sea con granos relativamente pequeños) según sea la cantidad de núcleos pequeña o grande, respectivamente.

El tamaño de los granos puede controlarse agregando al metal "impurezas" que posibilitan la formación de núcleos y también regulando el régimen de solidificación. Si el enfriamiento es lento, la cristalización se hace a partir de unos pocos núcleos y el metal solidificado

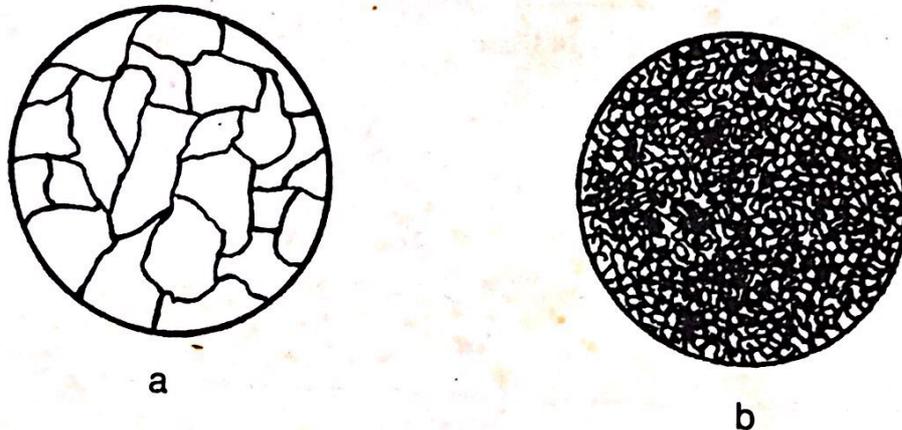


Fig. 4.6. Estructuras metálicas de grano cristalino grande (a) y pequeño (b).

tendrá pocos granos y grandes. Lo inverso sucederá al enfriar un metal rápidamente (figura 4.6).

4.6 Aleaciones

Dos o más elementos pueden combinarse de distintas maneras. Si esa combinación posee propiedades y características metálicas, se la conoce con el nombre de *aleación*. Las propiedades de las aleaciones difieren apreciablemente de las de los elementos que las constituyen. Es posible obtener mejoras en la resistencia, dureza y otras características por medio de aleaciones resultantes de combinar varios elementos.

En la mayoría de los casos los componentes de las aleaciones son completamente solubles en estado líquido, permitiendo, de esa manera, su combinación física. Esto significa que cuando los componentes están mezclados en estado líquido constituyen un sistema homogéneo, o sea con una sola fase.

Los metales que son solubles en estado líquido no necesariamente lo son en estado sólido. Al solidificar pueden separarse completamente el uno del otro para formar una estructura heterogénea, o pueden continuar disueltos uno en el otro en estado sólido (una sola fase) o, incluso, pueden combinarse para formar una sola fase pero de composición definida. Según el orden de las características mencionadas pueden clasificarse las aleaciones metálicas en tres grupos: aleaciones eutécticas, soluciones sólidas y compuestos intermetálicos.

4.6.1 Compuestos intermetálicos

Todo el que está familiarizado con los fundamentos de la química conoce los compuestos formados entre metales y no metales. Estos compuestos no tienen características metálicas sino que constituyen los materiales cerámicos. Los compuestos formados entre dos metales o entre un metal y un metaloide poseen, en cambio, propiedades metálicas y constituyen un tipo de aleación.

Los compuestos intermetálicos difieren de los compuestos químicos comunes en que la combinación se realiza sin tenerse en cuenta las leyes de valencia. Por ejemplo, se pueden encontrar compuestos como Ag_3Sn o Fe_3C . En estas fórmulas los índices sólo señalan que, al ser mezclados en determinadas y fijas proporciones, se ha formado una estructura cristalina con una fase en la que en cada celda unitaria existe esa relación entre los iones de cada metal.

En esa forma de aleación se ve reforzado el enlace metálico por otro tipo de uniones como la covalente. Esto, como es de imaginar, repercute en las propiedades de este tipo de aleaciones.

4.6.2 *Soluciones sólidas*

Los elementos que se combinan para formar aleaciones pueden hacerlo de forma tal que se disuelvan completamente uno en otro y los átomos de uno de ellos pasen a formar parte del reticulado espacial del otro. Podría parecer, de acuerdo con lo enunciado, que las soluciones sólidas son una forma de compuesto intermetálico, dado que una situación similar a la descrita se encuentra en estos últimos. Sin embargo, en los compuestos intermetálicos hay una relación fija entre la proporción de cada uno de los elementos presentes, mientras que en una solución sólida esas proporciones pueden variar en una escala más o menos amplia.

Si una aleación en la cual los constituyentes son completamente solubles en estado sólido es observada al microscopio (después de haber sido convenientemente preparada) sólo se pueden ver granos cristalinos iguales. Los componentes pierden su individualidad en una solución sólida y sólo se observa una fase.

La posibilidad de que dos elementos formen soluciones sólidas está dada por la existencia de ciertas similitudes entre ambos (tamaño atómico aproximadamente igual y el mismo tipo de reticulado espacial, principalmente). En estos casos, átomos de uno de los elementos pueden sustituir a los átomos (o iones) del otro en el reticulado espacial. Este tipo de aleación se denomina *solución sólida sustitucional*.

Si las condiciones de similitud existen pero los tamaños atómicos de ambos elementos no son aproximadamente iguales, es posible que los átomos más pequeños no reemplacen a los más grandes sino que

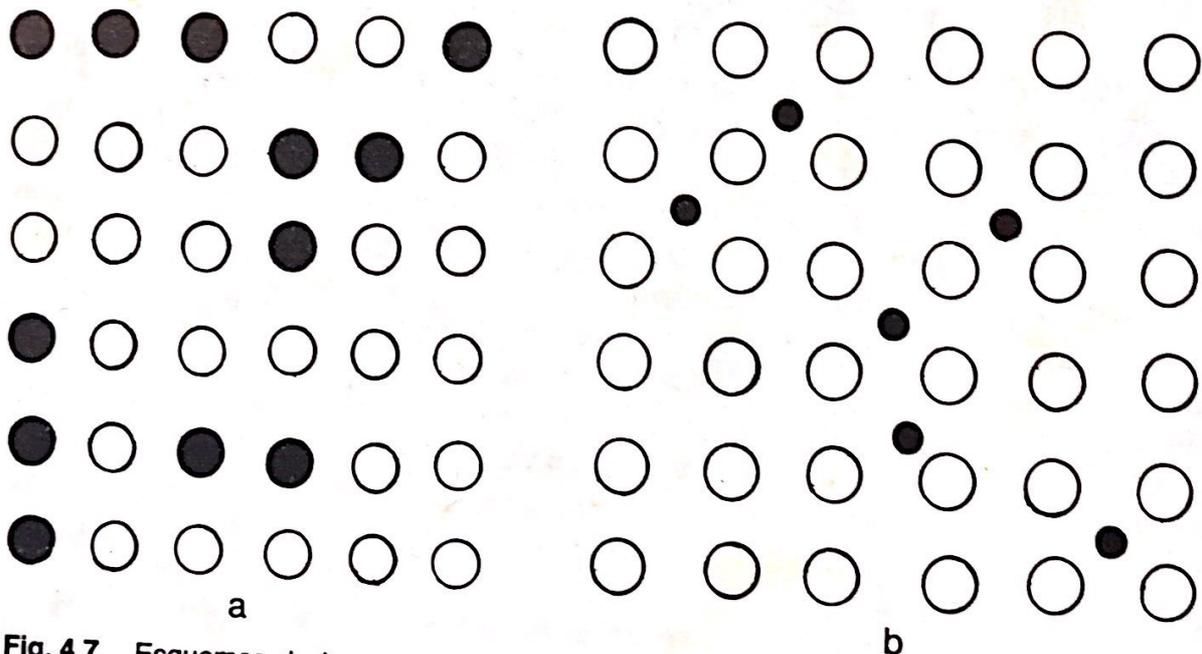


Fig. 4.7. Esquemas de la estructura de soluciones sólidas sustitucionales (a) e intersticiales (b).

aquéllos se ubiquen entre éstos. Este tipo de aleación se denomina *solución sólida intersticial*.

El reticulado espacial de ambos tipos de soluciones sólidas se encuentra esquematizado en la figura 4.7. Un ejemplo de solución sólida sustitucional es el de las aleaciones de oro y cobre, y un ejemplo de solución sólida intersticial es una aleación de hierro y carbono, que se forma, en ciertas condiciones, entre el hierro y el carbono.

4.6.3 Diagramas de equilibrio

Se dijo más arriba que los elementos que forman soluciones sólidas pueden ser combinados en distintas proporciones. Si se consideran todas las combinaciones posibles (es decir todas las aleaciones) entre dos o más elementos, se denomina al conjunto *sistema de aleaciones* de esos metales. Así, por ejemplo, "sistema oro-cobre" significa que todas las aleaciones de oro y cobre posibles (todos los porcentajes en que se puedan combinar) se tienen en consideración.

Un sistema de aleaciones puede ser binario, ternario, cuaternario, según intervengan en su formación dos, tres o cuatro elementos metálicos.

Para poder decidir qué aleación de un sistema en particular es conveniente utilizar para un determinado fin, es necesario conocer el comportamiento de todo el sistema. Sólo cuando se conoce el sistema es posible discernir qué aleación dentro de él (qué combinación de elementos constituyentes del sistema) es la que tiene características más adecuadas.

Para ello es necesario analizar el comportamiento, que es consecuencia de la estructura, de todos o por lo menos de varias aleaciones posibles de formar entre los componentes. Una forma de hacerlo es estableciendo las curvas de enfriamiento de las aleaciones del sistema. Esto permite estudiar los cambios que ocurren durante la solidificación, lo que puede complementarse con métodos como la observación microscópica, la difracción de rayos X y otros, para establecer las transformaciones que pueden producirse en algunas aleaciones después de solidificadas.

Por ejemplo, si se desea estudiar el sistema plata-oro, se comienza por preparar una serie de aleaciones que contengan diferentes proporciones de ambos metales. De cada una de ellas se procede a determinar la curva de enfriamiento fundiéndola y registrando su temperatura durante el tiempo que lleva su enfriamiento (se entiende que el otro factor involucrado, la presión ambiente, se mantiene constante).

Considérese primero una muestra de plata pura que se enfríe lentamente desde la temperatura a que está fundida. La curva de

enfriamiento correspondiente se muestra en (a) de la figura 4.8. Una interrupción en el descenso de la temperatura se produce entre "x" e "y", es decir, durante el tiempo en que se produce la solidificación y cristalización, debido a la liberación del calor latente de fusión.

Repitiendo el procedimiento con una aleación compuesta por un 75 % de plata y un 25 % de oro se encontraría la curva (b) de la figura 4.8. El enfriamiento se produce de manera uniforme hasta que la temperatura alcanza un valor, llegado el cual el régimen de enfriamiento

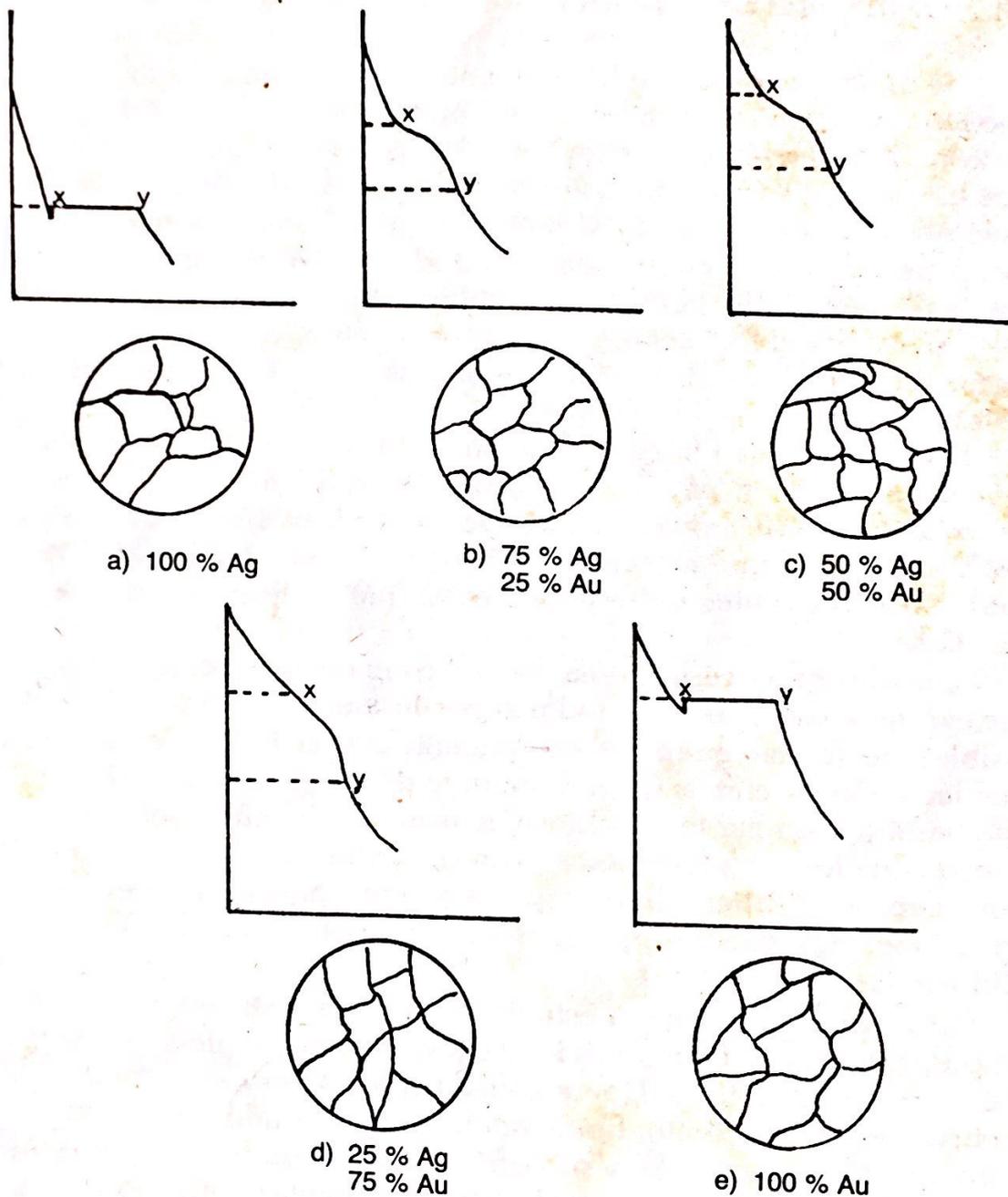


Fig. 4.8. Curvas de enfriamiento y granos cristalinos en sistemas de soluciones sólidas plata-oro (esquemático).

disminuye. Si se examina la aleación en ese momento, se observa que está comenzando la solidificación y que cuando ella termina se recupera nuevamente el régimen de enfriamiento inicial. La curva obtenida muestra que entre "x" e "y" se produjo la solidificación y que ésta no se realizó a temperatura constante como en el caso del metal puro. Por encima de "x" hubo una solución homogénea de dos metales líquidos (una sola fase); entre "x" e "y" hubo una solución de partes líquidas (plata y oro líquidos) y partes sólidas (solución sólida plata-oro) es decir que entre "x" e "y" hubo dos fases presentes; por debajo de "y" hubo solución sólida plata-oro y por lo tanto una sola fase (al microscopio sería imposible reconocer la plata del oro y sólo se verían granos cristalinos iguales, tal como se esquematiza en la figura 4.8).

Curvas similares pero con distintos valores de temperatura para "x" e "y" se obtendrían con las otras aleaciones del sistema. Dos más de ellas se muestran en la figura 4.8.

Por último, si se estableciera la curva de enfriamiento del oro puro se obtendría la curva característica de un metal con la correspondiente meseta.

Resulta más práctico volcar esta información parcial en un plano único, como se hace con el plano del recorrido de las calles de una ciudad. Este esquema único se denomina *diagrama de equilibrio*.

Para ello, los datos obtenidos en la curva de enfriamiento se llevan a un sistema de coordenadas cartesianas ortogonales donde se indica la temperatura sobre el eje vertical y las composiciones sobre el eje horizontal. (Se entiende que el otro factor, presión, se ha mantenido constante.) Es costumbre a los efectos de simplificar la escritura, colocar sobre este último eje tan sólo el porcentaje de uno de los componentes del sistema, ya que se sobreentiende que el resto es el porcentaje del otro componente. Así se lee, en el diagrama de la figura 4.9 (diagrama de equilibrio del sistema plata-oro), "porcentaje de oro en peso" sobre el eje horizontal y se busca el número 20, que significa que la composición será en ese caso 20 % de oro y 80 % de plata. (Se indica "en peso" puesto que pueden también confeccionarse diagramas según el porcentaje de átomos de cada metal presente en las aleaciones.)

Llevando los valores de temperatura obtenidos para "x" (iniciación de la solidificación) al diagrama y uniendo todos los puntos "x" y todos los puntos "y" se obtienen dos líneas. La lograda con los puntos "x" constituye la denominada *línea de liquidus* y cualquiera sea la aleación del sistema que se considere estará en estado líquido (una sola fase) a una temperatura superior a la que ella indique. La resultante de unir los puntos "y" se denomina *línea de solidus* y cualquiera sea la aleación del sistema que se considere estará en estado sólido (una sola fase en las soluciones sólidas) a temperatura inferior a la que ella indique. A temperaturas comprendidas entre la que indique la línea de liquidus y la

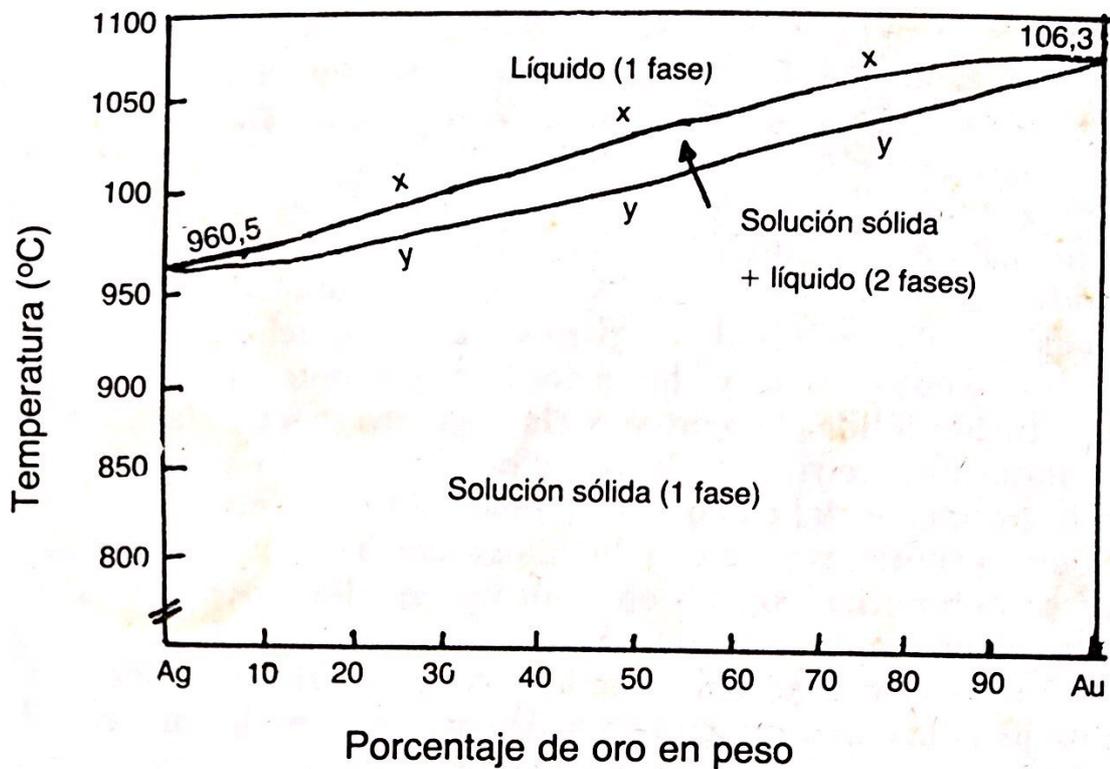


Fig. 4.9. Diagrama de equilibrio del sistema plata-oro.

de la línea de solidus, la aleación estará compuesta por partes sólidas y líquidas (dos fases).

Los diagramas de equilibrio, tal como el que se muestra en la figura 4.9, sirven para conocer los intervalos de temperaturas de fusión (intervalo entre el comienzo y la terminación de la solidificación) de las aleaciones de un sistema. También indican las fases presentes en una determinada aleación a una temperatura establecida, y mediante procedimientos que no se describirán aquí permiten conocer la composición de cada una de las fases presentes así como su proporción relativa.

Del diagrama de la figura 4.9 se desprende que una aleación que contenga 60 % de oro y 40 % de plata estará líquida por encima de 1040°C; solidificará entre 1040 y 1020°C y estará sólida por debajo de 1020°C. Tendrá también en cada caso las fases (una o dos) que el diagrama indica, siempre y cuando se encuentre en equilibrio.

4.6.4 Aleaciones eutécticas

Cuando dos elementos capaces de formar aleaciones son solubles en estado líquido pero no lo son en estado sólido, cristalizan separadamente dando lugar a la formación de las denominadas aleaciones eutécticas.

Un sistema en el cual los componentes son completamente solubles en estado líquido pero completamente insolubles en estado sólido, es el de las aleaciones de bismuto y cadmio.

Tal como se hizo en las soluciones sólidas de plata y oro, es posible obtener el diagrama de equilibrio del sistema bismuto-cadmio a partir de las curvas de enfriamiento de sus aleaciones.

La curva de enfriamiento del bismuto puro se muestra en (a) de la figura 4.10. La solidificación se inicia a la temperatura correspondiente a "x" y se completa a la misma temperatura en "y".

La curva de enfriamiento de una aleación que contenga 40 % de

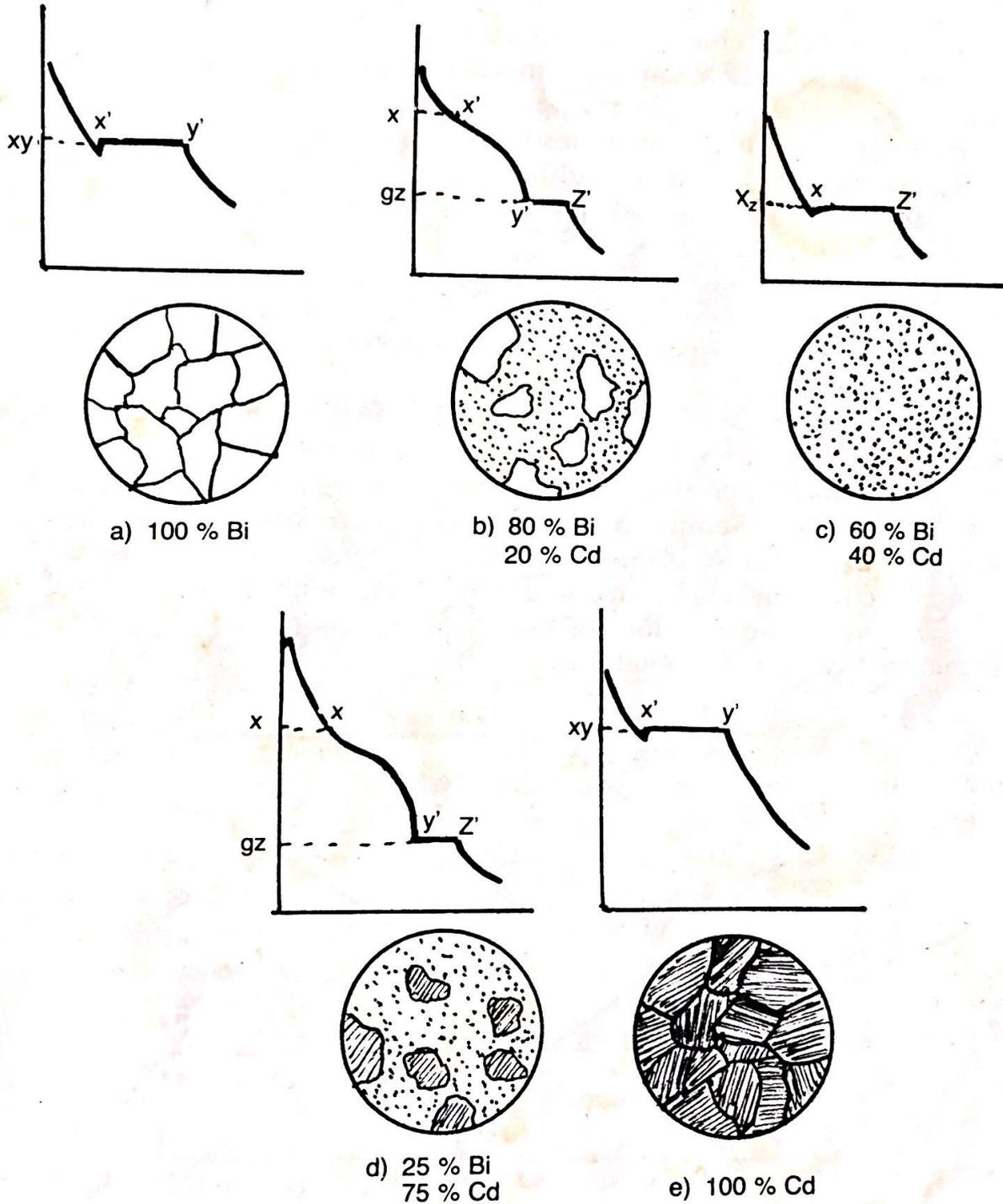


Fig. 4.10. Curvas de enfriamiento y granos cristalinos en el sistema de aleaciones eutécticas bismuto-cadmio (esquemático).

cadmio y 60 % de bismuto se muestra en (c) de la figura 4.10. Esta curva es única dentro del sistema, ya que sólo tiene una meseta que ocupa todo el intervalo de solidificación. En este sentido se comporta igual que un metal puro. Esta aleación está constituida, en estado sólido, (figura 4.10) enteramente por la mezcla íntima de granos de cadmio y bismuto. Esta aleación es el *eutéctico* del sistema.

Una aleación constituida por 20 % de cadmio y 80 % de bismuto tiene la curva de enfriamiento (b) de la figura 4.10. La curva experimenta un cambio de dirección en "x" a una temperatura que es inferior a la que ocurre en la solidificación del bismuto puro. La curva continúa a partir de "x" con un régimen de enfriamiento más lento hasta "y", donde se produce la formación de una meseta. Ésta se extiende hasta "z", que es donde se ha completado la solidificación. La estructura de esta aleación (que se muestra esquemáticamente en la figura) consiste en granos grandes de bismuto formados durante el enfriamiento desde "x" hasta "y" y además una mezcla íntima de granos de bismuto y cadmio que se formó a temperatura constante entre "y" y "z". Esta mezcla íntima tiene la composición y el aspecto del eutéctico del sistema (40 % de cadmio y 60 % de bismuto).

Una aleación de 75 % de cadmio y 25 % de bismuto tiene la curva de enfriamiento que se muestra en (d) de la figura 4.10. La solidificación comienza en "x" con una disminución en el régimen de enfriamiento.

El eutéctico se empieza a formar en "y" y completa su solidificación en "z". La aleación sólida está constituida por granos grandes de cadmio y el eutéctico (mezcla íntima de granos de cadmio y bismuto).

La curva que se muestra en (e) corresponde al cadmio y es la característica de todo metal puro.

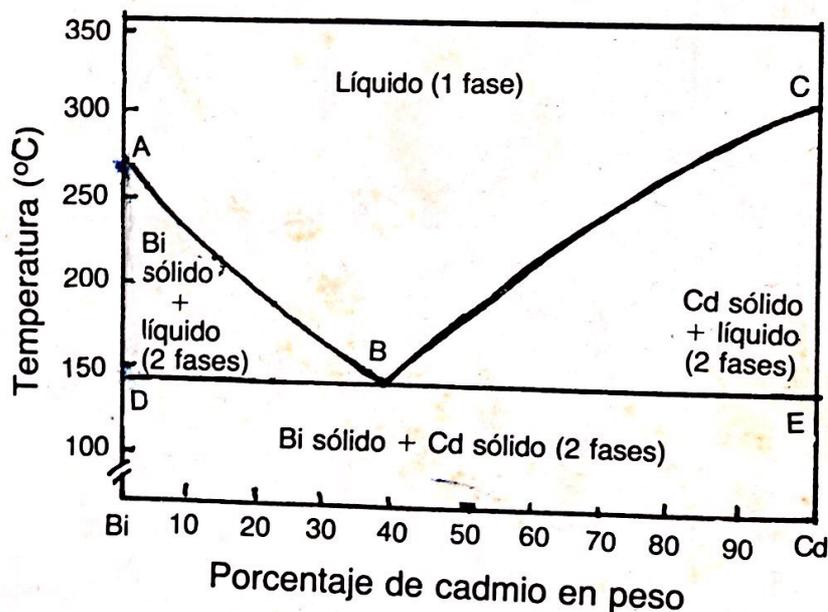


Fig. 4.11. Diagrama de equilibrio del sistema bismuto-cadmio.

Con los datos de las curvas de enfriamiento es posible obtener el diagrama de equilibrio que se muestra en la figura 4.11. La línea ABC constituye la línea de liquidus del sistema y la DBE la de solidus. Si se hubieran tomado otras aleaciones en este sistema se habría visto que todas ellas tienen curvas de enfriamiento con una meseta a la temperatura de solidificación del eutéctico. Esto es característico de todas las aleaciones formadas por elementos insolubles en estado sólido.

Esa temperatura de solidificación del eutéctico es siempre inferior a las temperaturas de solidificación de los elementos que lo constituyen (eutéctico significa que "funde más bajo").

Las fases presentes en las diferentes zonas del diagrama del sistema bismuto-cadmio son las siguientes:

Encima de ABC	Solución (una fase)
Zona ABD	Bismuto sólido y solución líquida (dos fases)
Zona CBE	Cadmio sólido y solución líquida (dos fases)
Debajo de DBE	Bismuto sólido y cadmio sólido (dos fases)

Resumiendo, los elementos no solubles en estado sólido forman aleaciones de distintas características según las proporciones en que entren sus componentes. Un porcentaje determinado (40 % de Cd y 60 % de Bi en el sistema bismuto-cadmio) determina la formación de una aleación que tiene una temperatura definida de solidificación (meseta en la curva de enfriamiento) y una estructura formada por una mezcla íntima de granos de cada uno de los elementos componentes. Esta aleación es la eutéctica del sistema.

Si la composición de la aleación es tal que uno de los componentes está en exceso con respecto a la composición del eutéctico, ese exceso solidifica separadamente y a una temperatura superior a la del eutéctico, pero inferior a la del elemento puro. La estructura de una aleación de este tipo está caracterizada por la presencia de granos grandes del metal en exceso que solidificó separadamente y la mezcla íntima de granos de ambos elementos que constituye el eutéctico.

Nótese que el diagrama de equilibrio de las aleaciones eutécticas se caracteriza por una línea de solidus paralela a la abscisa (horizontal). Toda vez que en un diagrama se vea una línea de solidus horizontal puede saberse que se está frente a una aleación con dos fases en estado sólido.

4.6.5 Aleaciones de elementos parcialmente solubles en estado sólido

En la sección anterior fueron descritas las características de las aleaciones formadas por elementos completamente insolubles en estado

sólido. Por el agregado de una pequeña cantidad de un elemento al otro (teóricamente un solo átomo) se produce la aparición de una nueva fase.

Es más frecuente, sin embargo, encontrar elementos que son parcialmente solubles en estado sólido. Esto indica que son capaces de formar soluciones sólidas cuando existe una pequeña cantidad de un elemento agregado al otro, pero si esa cantidad supera un límite ya no es posible una solución total, sino que se formará una aleación eutéctica.

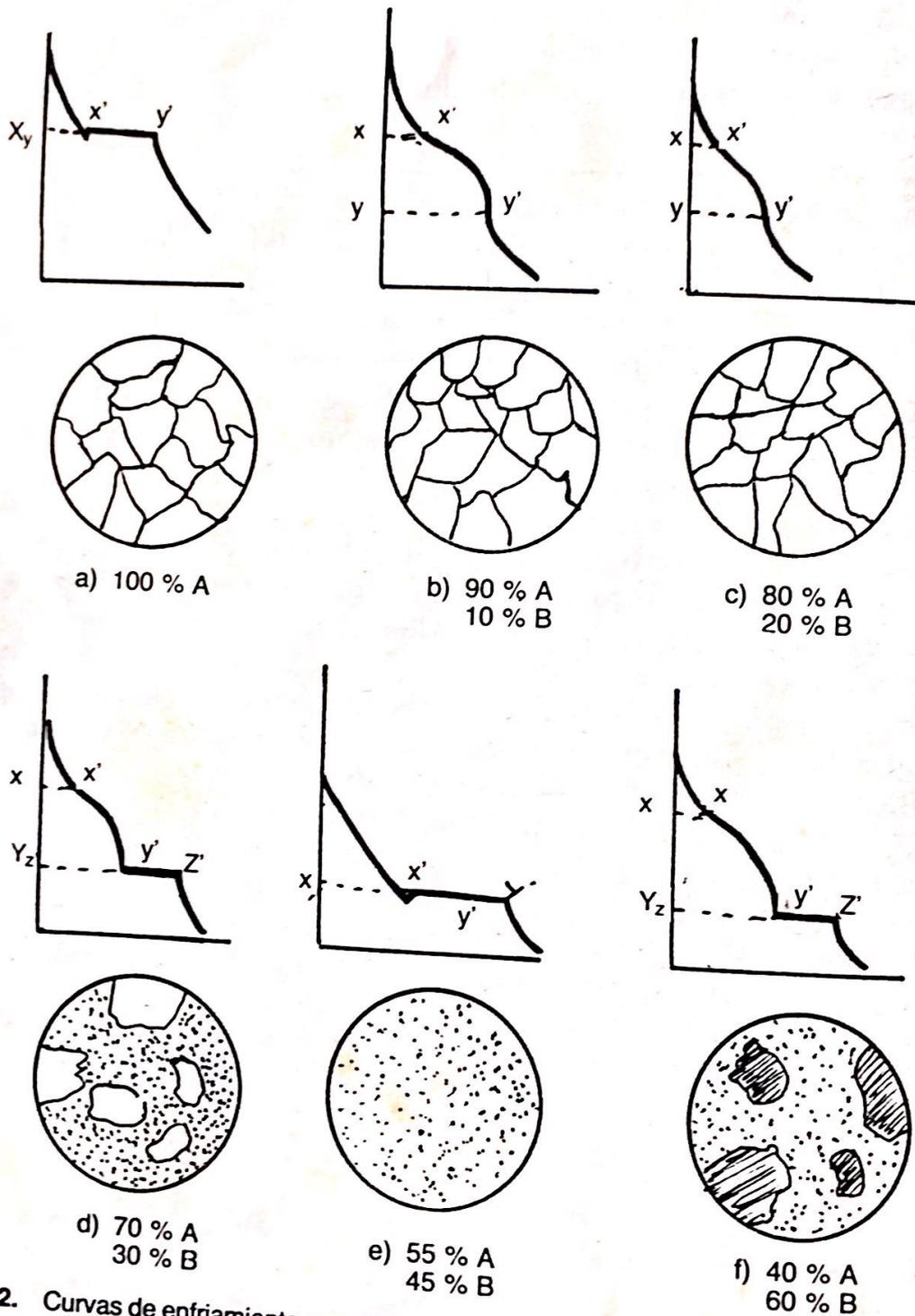


Fig. 4.12. Curvas de enfriamiento y granos cristalinos en un sistema hipotético de dos metales parcialmente solubles en estado sólido.

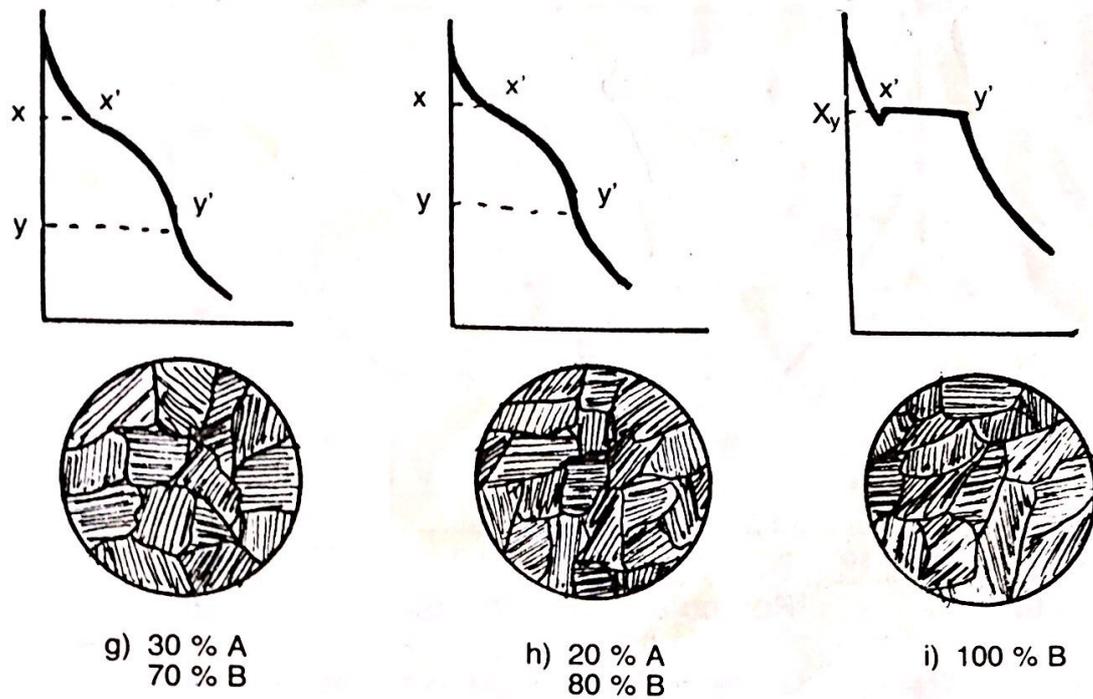


Fig. 4.12. (Cont.)

Para simplificar, se analizará primero un sistema de aleaciones de dos metales hipotéticos: A y B. Las curvas de enfriamiento y la estructura esquemática de los componentes puros y de una serie de aleaciones de A y B se muestran en la figura 4.12. Las curvas (b), (c), (g) y (h) son las características de las soluciones sólidas. Es de esperar entonces que en estas aleaciones, en particular del sistema A-B, se formen soluciones sólidas con estructura homogénea (una sola fase). Las curvas (d) y (f) son las de una aleación eutéctica con un componente en exceso y sus estructuras tendrán granos grandes de dicho componente en exceso (en este caso al analizarlo puede comprobarse que no es un metal puro sino una solución sólida de los dos metales) y el eutéctico constituido por una mezcla íntima de granos de los componentes (cuyo análisis comprueba que son dos soluciones sólidas distintas y no dos elementos puros). La curva (e) es característica del eutéctico y su estructura también lo es (mezcla íntima de granos de dos soluciones sólidas).

Con las temperaturas a que la solidificación comienza (todos los puntos "x") y aquellas a la que la misma concluye (todos los puntos "y") se puede obtener el diagrama de equilibrio de la figura 4.13.

En este diagrama, como en todos los que aparecen varias fases (siendo cada una de ellas combinación de elementos) es costumbre designarlas con letras griegas. La primera fase que aparece a la izquierda de un diagrama con esta característica se denomina α (alfa); la segunda, β (beta); la tercera, γ (gamma), y así sucesivamente.

Es importante notar que siempre la zona donde existe una fase está

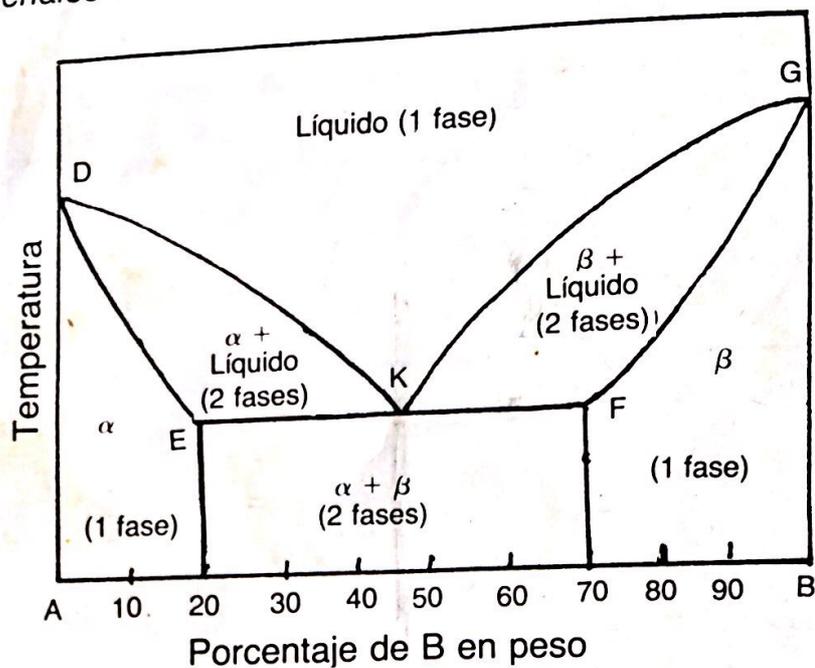


Fig. 4.13. Diagrama de equilibrio del sistema hipotético A-B.

seguida en el diagrama (a su derecha) por una zona donde coexisten dos. Así, en el diagrama de A y B la primera fase individualizable a la izquierda es la denominada alfa, que es una solución sólida de B en A (B es el soluto y A el solvente). La segunda fase individualizable (siempre comenzando por la izquierda) es la denominada beta, que es una solución sólida de A en B (A es el soluto y B el solvente). Entre las zonas en que existen alfa y beta individualmente hay una porción donde coexisten alfa y beta.

Resumiendo, las fases presentes en las diferentes zonas del diagrama del sistema A-B son las siguientes:

Encima de DKG	Solución líquida (una fase)
Zona DEK	Solución sólida alfa y solución líquida (dos fases)
Zona GKF	Solución sólida beta y solución líquida (dos fases)
Debajo de DE	Solución sólida alfa (una fase)
Debajo de GF	Solución sólida beta (una fase)
Debajo de EKF	Solución sólida alfa y solución sólida beta (dos fases).

Es interesante recordar que las dos fases de esta última zona (soluciones sólidas alfa y beta) estarán en su totalidad íntimamente mezcladas para constituir el eutéctico si la composición es 55 % de A y 45 % de B. Si una de ellas está en exceso con respecto a la composición de este eutéctico (es decir, las aleaciones entre E y K y entre K y F del diagrama) ese exceso formará granos grandes separados.

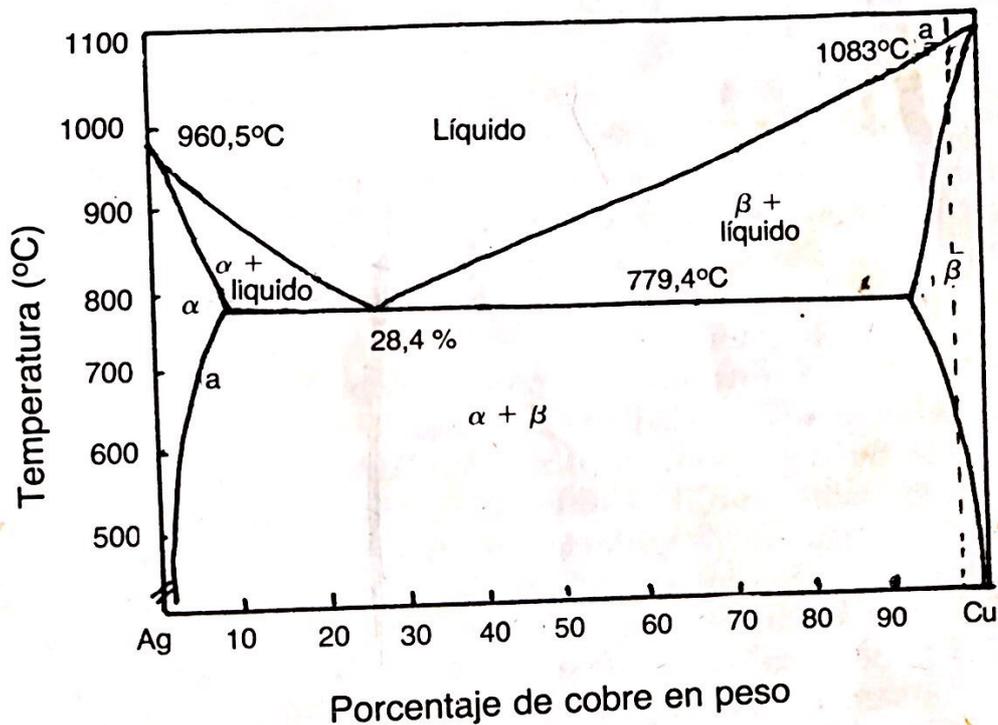


Fig. 4.14. Diagrama de equilibrio del sistema plata-cobre.

Los diagramas de este tipo no son tan simples como el ilustrado en la figura 4.13. Siempre hay un cambio en la solubilidad en estado sólido, lo que queda indicado en el diagrama de equilibrio.

En la figura 4.14, se muestra el diagrama de equilibrio del sistema plata-cobre. En él la solubilidad del cobre en la plata y de la plata en el cobre disminuye por debajo de la temperatura del eutéctico. Por ejemplo, una aleación con 97 % de cobre y 3 % de plata (línea de puntos en el diagrama de la figura 4.14) estaría compuesta por solución sólida beta a 800°C.

Al llegar a la temperatura indicada por el punto "a" en el diagrama, la solubilidad de la plata en el cobre alcanza su valor de saturación. Por debajo de esa temperatura la solubilidad es todavía inferior y la solución sólida alfa comienza a precipitar del interior de beta. Las fases presentes en la aleación final serán solución sólida alfa y solución sólida beta. O sea que esa misma aleación, una vez en estado sólido, cambió su estructura de homogénea a heterogénea a medida que se enfrió, de la misma forma que una solución de sal en agua puede ser saturada y homogénea a una temperatura y sobresaturarse y precipitar el excedente al enfriarla. Esa precipitación, sin embargo, es más difícil que se produzca en estado sólido, por la menor movilidad de los átomos y, por ello, esto ocurre si el enfriamiento se produce en equilibrio, pero no en el caso contrario. Esto permite lograr cambios en las propiedades de la aleación, como se analiza más adelante.

4.6.6 *Reacciones peritéticas. El sistema plata-estaño*

Algunos compuestos intermetálicos se comportan como metales puros y si se los calienta conservan su identidad hasta la temperatura en que funden. Esa fusión la hacen a temperatura constante.

Hay otros compuestos intermetálicos que sólo existen a determinadas temperaturas. Si se los calienta experimentan una transformación en estado sólido dejando de ser compuestos intermetálicos antes de pasar completamente al estado líquido.

Un ejemplo de este último tipo de compuesto intermetálico es el que puede formarse entre la plata y el estaño, que reviste interés por ser una aleación frecuentemente utilizada en odontología.

El diagrama de equilibrio del sistema plata-estaño se muestra en la figura 4.15. Como puede apreciarse, según cambie el porcentaje de ambos elementos que intervienen en la aleación es posible obtener la formación de distintas fases.

Hacia la derecha puede verse una línea de solidus horizontal que indica un sistema eutéctico, y a la izquierda, en cambio, soluciones sólidas. Pero además aparecen líneas verticales que indican modificacio-

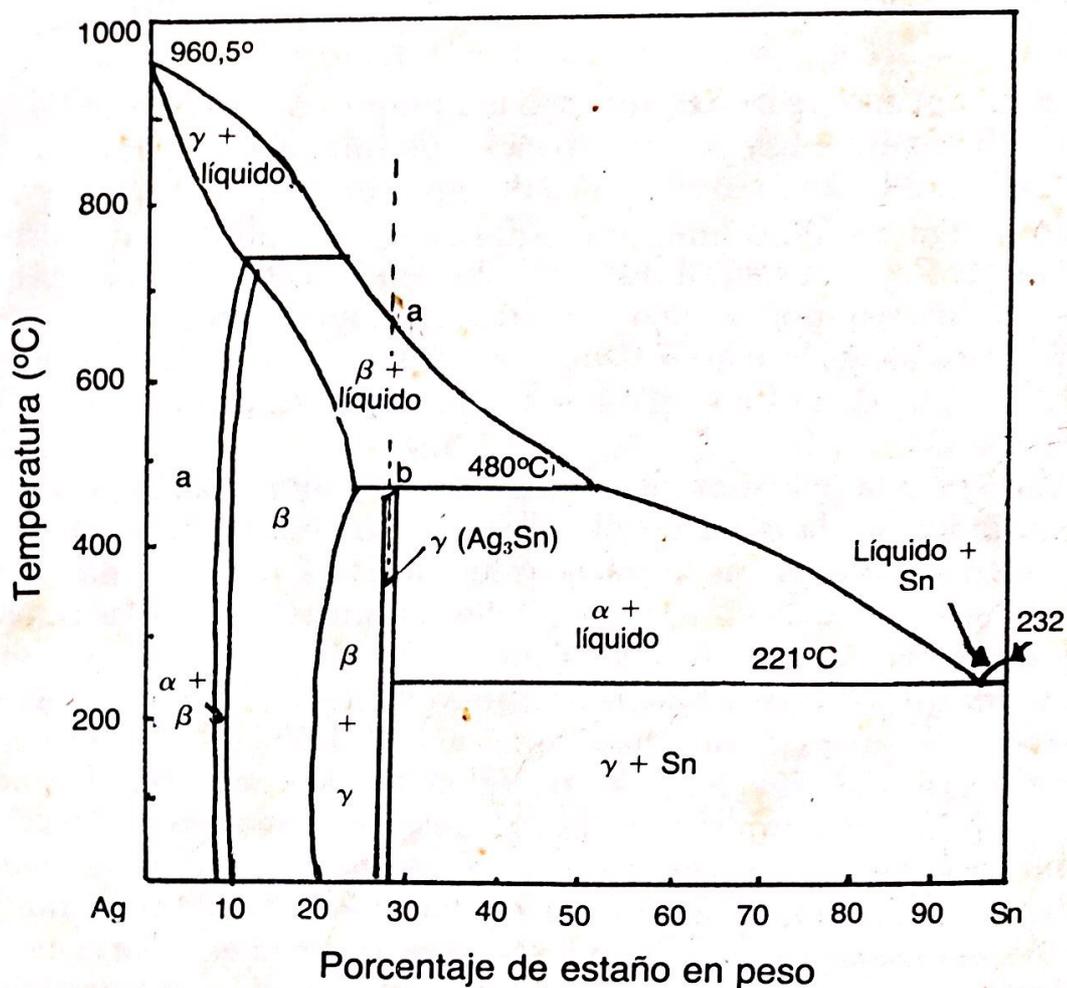


Fig. 4.15. Diagrama de equilibrio del sistema plata-estaño.

nes dentro de las soluciones sólidas, y así puede notarse que la primera fase presente en la zona izquierda del diagrama es la denominada (según la costumbre descrita) alfa. Esta fase es una solución sólida, como puede apreciarse con la observación de las líneas de liquidus y solidus en esa zona.

La segunda fase es también una solución sólida, denominada beta. Entre las zonas donde sólo existen alfa y beta, hay, como es de esperar, una donde coexisten ambas fases.

La tercera fase es la denominada gamma, precedida en el diagrama por una zona donde coexisten beta y gamma. Esta fase es un compuesto intermetálico, ya que su análisis muestra que tiene un reticulado espacial con una distribución fija de los dos elementos en cada celda unitaria. Su fórmula es Ag_3Sn (tres iones de plata por cada uno de estaño en cada celda) y se forma cuando el contenido de estaño oscila entre 25 y 27 % aproximadamente y el de plata entre 75 y 73 %.

Si hay más de 27 % de estaño se forma, como ya se indicó, una serie de aleaciones eutécticas. El eutéctico, que será una mezcla íntima de granos de Ag_3Sn y estaño, se constituye con el 96,5 % de estaño y 3,5 % de plata. Si existe más o menos estaño, el componente en exceso se encontrará formando granos grandes separadamente del eutéctico.

Tal como se mencionó, una aleación que se utiliza en odontología contiene fundamentalmente el compuesto intermetálico Ag_3Sn . Es de interés analizar el comportamiento de una aleación que lo forme. Una de éstas está indicada por una línea de puntos en la figura 4.15.

Si se la enfría desde el estado líquido esa aleación comienza su solidificación al llegar a la temperatura indicada por la línea de liquidus (punto "a" en el diagrama). A partir de esa temperatura la estructura de la aleación es solución líquida y solución sólida beta. Al llegar a una temperatura de 480°C (punto "b" en el diagrama) la parte líquida reacciona con la solución beta y se transforma el todo en el compuesto intermetálico Ag_3Sn o fase gamma.

Reacciones de este tipo se conocen con el nombre de peritéticas y son esencialmente una inversión de la reacción que da lugar a la formación de un eutéctico. En esta última hay una transformación de una sola fase líquida en dos fases sólidas al enfriarse. En la reacción peritética, en cambio, hay una transformación de dos fases (líquida y sólida) en una al enfriarse. Como en todos los casos ya descritos, esa transformación se produce siempre y cuando el enfriamiento se realice en condiciones de equilibrio.

4.6.7 El sistema oro-cobre

El oro y el cobre son componentes de aleaciones con que se pueden realizar ciertos trabajos, por colado o forjado, en odontología. Si bien es

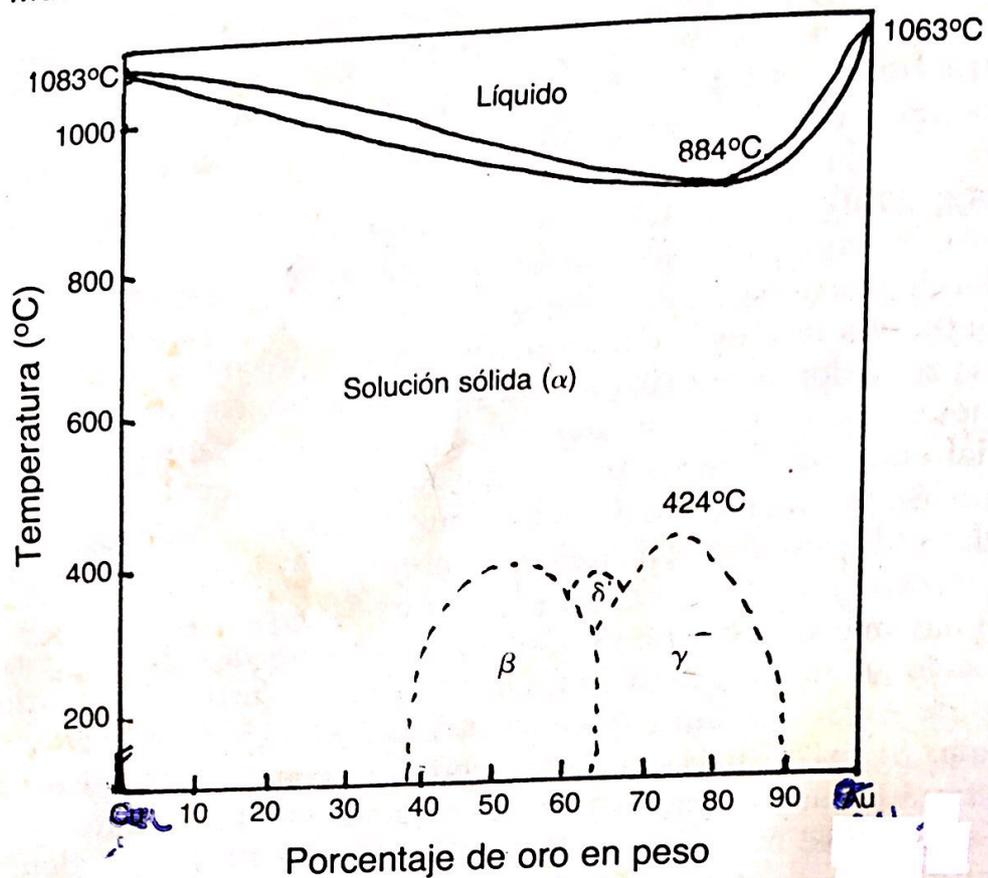


Fig. 4.16. Diagrama de equilibrio del sistema oro-cobre.

dable que otros metales intervengan en la composición de esas aleaciones, son el oro y el cobre los que más influyen en sus propiedades así como los que permiten introducir modificaciones en ellas según sean las necesidades.

El diagrama de equilibrio de las aleaciones del sistema oro-cobre se muestra en la figura 4.16. Entre ambos elementos se forma una serie continua de soluciones sólidas con intervalo de temperaturas de fusión sumamente corto, lo que hace que en el diagrama se observe que las líneas de liquidus y solidus se encuentren próximas. Incluso hay composiciones en que las dos líneas son prácticamente coincidentes.

Otro detalle de interés es que el intervalo de temperaturas de fusión de todas las aleaciones del sistema es inferior a las de fusión de ambos metales.

Si bien todas las combinaciones posibles de oro y cobre forman soluciones sólidas, no todas ellas se mantienen inalterables hasta temperatura ambiente. Tal como se puede apreciar en el diagrama, las aleaciones que tienen entre 39 % y 88 % de oro, aproximadamente, experimentan transformaciones al enfriarse. Como resultado de ellas las soluciones sólidas ordenan sus átomos de modo tal que cada uno ocupa una posición definida y puede incluso indicarse una fórmula para describir

cada celda unitaria. Estos ordenamientos se conocen con el nombre de *superreticulados*.

Según la composición de la aleación es posible obtener superreticulados distintos. Cada uno de ellos constituye una fase dentro del sistema y por ello se los puede denominar beta, gamma y delta, siendo alfa la solución sólida. Como en todos los casos, separando las zonas donde existen cada una de estas fases hay zonas donde coexisten dos fases vecinas.

Si el contenido de oro oscila entre aproximadamente 39 % y 64 %, se forma el superreticulado beta con fórmula AuCu_3 . Éste tiene un reticulado espacial igual al de la solución sólida oro y cobre y, por ello, no trae modificaciones apreciables en las características y propiedades de la aleación.

Si el contenido de oro oscila entre aproximadamente 64 % y 88 %, se forma el superreticulado delta con fórmula AuCu . Éste tiene un reticulado espacial distinto al de la solución sólida (tetragonal en lugar de cúbico) y su aparición determina cambios en las propiedades de la aleación.

El superreticulado gamma, de fórmula AuCu_2 se forma durante el enfriamiento de unas pocas aleaciones del sistema. Es sólo estable durante un breve intervalo de temperaturas y se transforma, al continuar el enfriamiento, en las fases beta y/o delta. Por tanto, no tiene interés práctico desde el punto de vista de las propiedades de las aleaciones a temperatura ambiente.