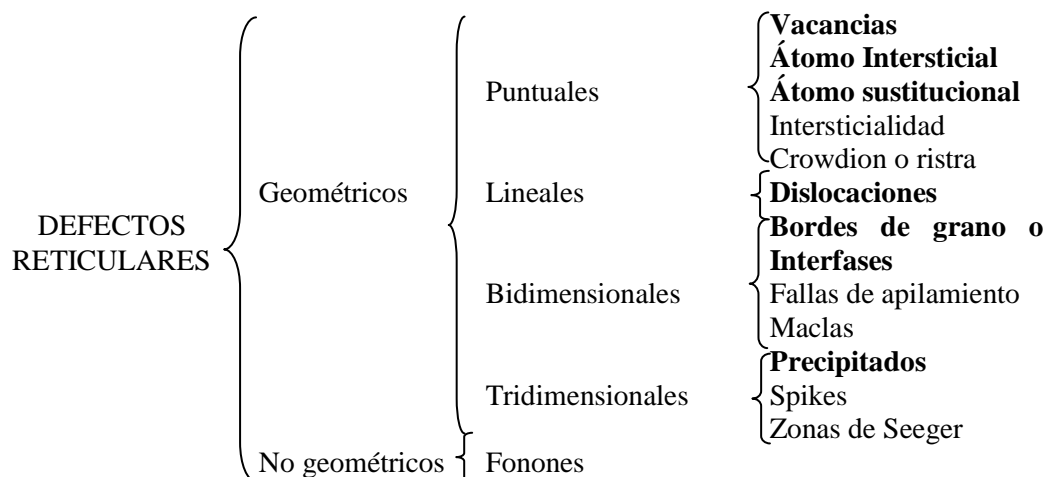


## II. DEFECTOS RETICULARES

En el tema anterior se supuso a las redes ideales y perfectas. Sin embargo esto no es así: las estructuras reales se ven afectadas por la presencia de gran número de defectos, los que, posiblemente, sean el factor que tiene mayor peso e influencia en las propiedades de los materiales, aún reconociendo la influencia de los enlaces atómicos y del tipo de red cristalina.

### II.1 Clasificación



Se señalaron en negrita los más importantes y frecuentes en los metales y aleaciones.

### II.2. Defectos Geométricos

Los defectos se clasifican según su geometría, aunque siempre generan una distorsión o alteración que afecta un volumen de la red. Así, un defecto puntual tiene la geometría de un punto reticular, pero hay un volumen de simetría esférica perturbado de la red; y uno lineal provoca una perturbación de simetría cilíndrica.

#### II.2.1 Defectos puntuales

**Vacancia.** Es el más simple de los defectos puntuales, se trata de un hueco debido a la ausencia del átomo que se encontraba en esa posición de la red (Fig. II.1a). Las vacancias se pueden producir durante el proceso de solidificación debido a perturbaciones locales durante el crecimiento del cristal, o como resultado de vibraciones que facilitan el desplazamiento de los átomos de sus posiciones reticulares. Es un defecto de equilibrio; el número de vacancias presentes depende de la temperatura a la que se encuentre el material:

$$N_v = N \cdot e^{\frac{-Q_v}{kT}}$$

donde  $N_v$  = nº de vacancias

$N$  = nº de puntos reticulares

$Q_v$  = energía de activación (energía vibracional requerida para la formación de una vacancia)

$T$  = temperatura absoluta

$K$  = cte. de Boltzmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/átomo.K, o  $8,61 \cdot 10^{-5}$  eV/átomo.K

En la mayoría de los metales, la concentración de vacancias,  $\left(\frac{N_v}{N}\right)$ , es del orden de  $10^{-4}$  a temperaturas cercanas a la de fusión: 1 vacancia cada 10000 puntos reticulares.

Vacancias adicionales pueden producirse por deformación plástica del metal, por enfriamiento rápido desde temperaturas altas, y por bombardeo con partículas energéticas (neutrones). Éstas, que no son de equilibrio, tienen tendencia a agruparse formando clusters, por ejemplo trivacancias.

Las vacancias pueden trasladarse dentro del sólido, intercambiando sus posiciones con los átomos vecinos; este mecanismo es una de las formas de *difusión* en el estado sólido, de gran importancia particularmente a altas temperaturas cuando la movilidad de los átomos es mayor.

**Átomo intersticial.** Se trata de un átomo de pequeño tamaño que se ubica en los huecos o intersticios de las redes, como muestra la Fig. II.1b. En general, a pesar de su tamaño reducido, son más grandes que el hueco que han de ocupar, por lo que distorsionan la red generando campos elásticos de compresión. Los elementos que pueden ocupar estas posiciones en las redes son los de menor diámetro y se reducen a C, N, O, B o H.

**Átomo sustitucional.** Un ion o átomo de especie distinta a los de la red reemplaza a uno de éstos en un punto reticular. Puede ser de mayor o menor diámetro. En el primer caso, introduce una perturbación también de simetría esférica que se muestra en la Fig. II.1c; los iones de la red en esa región están a distancias menores que la de equilibrio con lo que se genera un campo elástico de compresión. Cuando el átomo sustitucional es de menor diámetro, el efecto en la red es similar al que provoca una vacancia, pero de menor intensidad, generándose también un campo elástico de tracción.

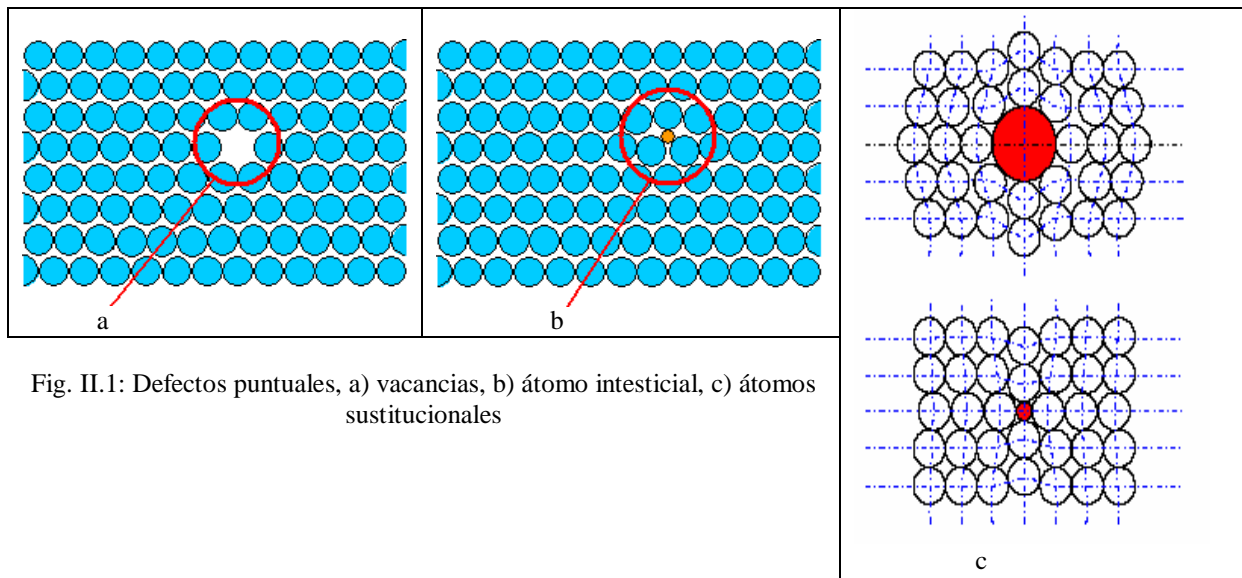


Fig. II.1: Defectos puntuales, a) vacancias, b) átomo intersticial, c) átomos sustitucionales

**Interstitialidad.** Dos intersticiales de la misma especie que los de la red, dispuestos simétricamente respecto de una vacancia.

**Crowdion o ristra.** Cuando en una dirección en la que hay  $n$  puntos reticulares existen  $n + 1$  átomos, todos fuera de los puntos reticulares. Es energéticamente inestable, y en presencia de una vacancia, rápidamente desaparece.

## II.2.2 Defectos lineales: Dislocaciones

Por su enorme influencia en las propiedades mecánicas, las dislocaciones son uno de los defectos más importantes de las redes cristalinas, especialmente en el caso de los metales y sus aleaciones. Salvo situaciones especiales, están compuestas por dos componentes: uno de borde o cuña y otro helicoidal.

**Dislocación de borde o cuña.** En la Fig. II.2a se puede visualizar un retículo en el que existe una dislocación de borde; puede pensarse como la introducción de un semiplano cristalográfico extra. Como consecuencia de ella, la red se distorsiona tal como se aprecia en la figura. La T invertida es el símbolo con

el que se indica la presencia de la dislocación.

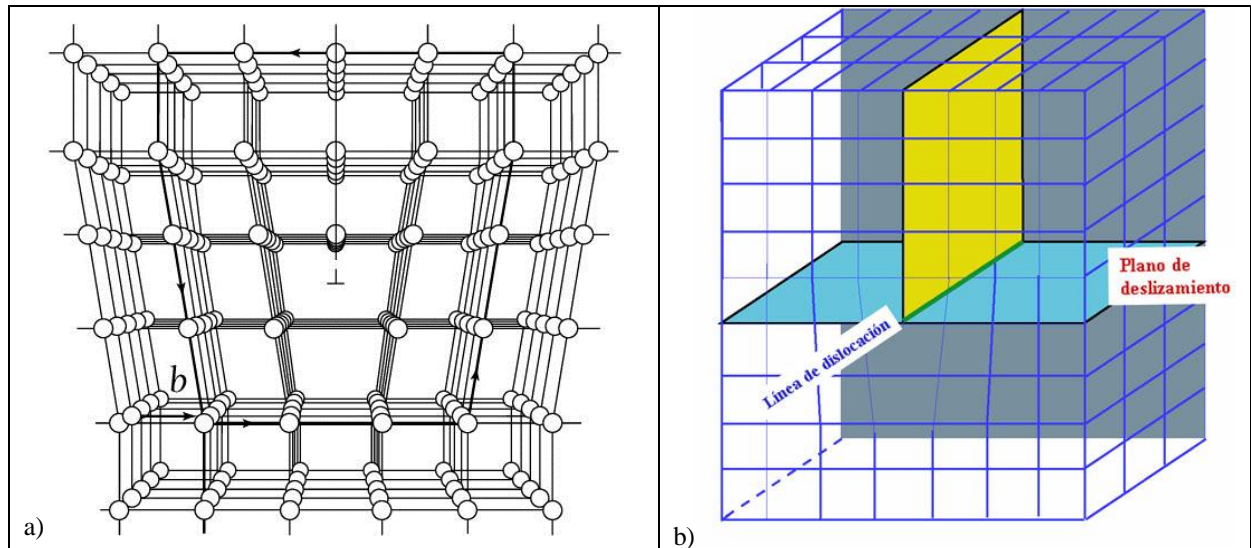


Fig. II.2: Dislocación de borde

Una dislocación en general se pone en evidencia si se traza el denominado “circuito de Burgers”. Para su trazado, comenzando en cualquier punto reticular, se cuentan  $n$  puntos reticulares para arriba, luego  $m$  puntos reticulares hacia la derecha, concluyendo con  $n$  hacia abajo y  $m$  hacia la izquierda. El circuito no se cierra, y para que esto ocurra se lo complementa con un vector  $b$  (el vector de Burgers), cuyo módulo es la distancia interatómica en esa dirección. Este vector define la dirección en la que un esfuerzo de corte, de magnitud adecuada provocará el deslizamiento de la dislocación, sobre el plano de deslizamiento.

En la Fig. II.2b se ha señalado la dirección que coincide con el borde inferior del semiplano extra; es la línea de dislocación (LD). El plano que contiene a esta dirección y al vector de Burgers, es el plano de deslizamiento (PD). Cuando se aplica una tensión de corte ( $\tau_r$ ) en la dirección del vector  $b$ , y por lo tanto en el plano de deslizamiento, la dislocación desliza como se puede apreciar en la secuencia de figuras II.3. Para deslizar, (Fig. II.3a) se rompen enlaces y los iones del semiplano inferior los restablecen con iones del semiplano extra en la Fig. II.3b. Como consecuencia, la dislocación se habrá desplazado un espaciado interatómico hacia la derecha. Si la tensión  $\tau_r$ , sigue actuando, se producirán sucesivos deslizamientos de forma similar, hasta que la dislocación encuentre un obstáculo o aflore en la superficie externa del cristal. Esta última posibilidad se refleja en la Fig. II.3c, en la que la dislocación ha desaparecido, dejando un escalón en la superficie del cristal.

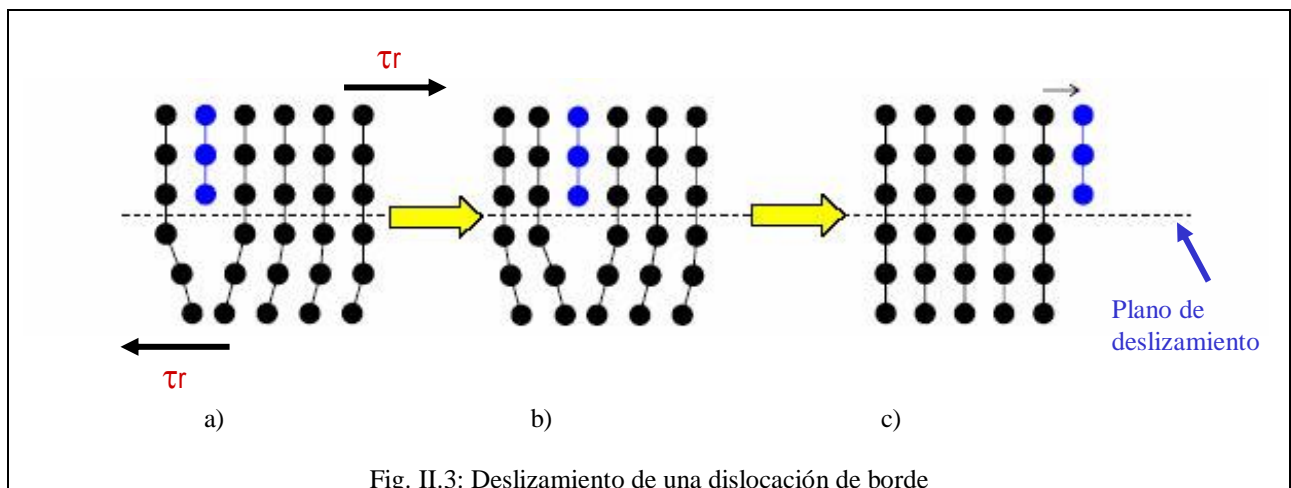


Fig. II.3: Deslizamiento de una dislocación de borde

Por debajo del plano de deslizamiento, como consecuencia de que falta un semiplano y de que el enlace es elástico, los iones están a distancias mayores que las de equilibrio por lo que la red se relaja procurando que los átomos o iones recuperen la distancia de equilibrio. Por otra parte, por encima del plano de deslizamiento, la presencia del semiplano extra provoca el efecto contrario, los átomos están a distancias menores que la de equilibrio. Como se advierte en la Fig. II.4, en las proximidades de la LD, la red se

distorsiona, generando campos de tracción por debajo, y de compresión por encima del plano de deslizamiento, que son más intensos cerca de la LD y disminuyen alejándose de ella.

En consecuencia, la dislocación tiene una cierta cantidad de energía por unidad de longitud, por lo que en ciertas circunstancias se comporta como una cuerda elástica. Por otra parte en los espacios anormalmente grandes de la zona traccionada, la energía reticular disminuiría si allí se alojasen átomos sustitucionales de mayor diámetro que los de la red. El mismo efecto se obtiene cuando se ubican en ella átomos intersticiales. Asimismo, la zona comprimida es susceptible de alojar vacancias y sustitucionales de menor diámetro, disminuyendo así la energía reticular.

Dado que la movilidad por difusión de vacancias y átomos sustitucionales e intersticiales se incrementa notablemente con la temperatura, estas 'impurezas' son atraídas por los campos elásticos y se alojan a lo largo de la LD, generando una nube o atmósfera que la rodea, que se denomina "atmósfera de Cottrell"<sup>2</sup>.

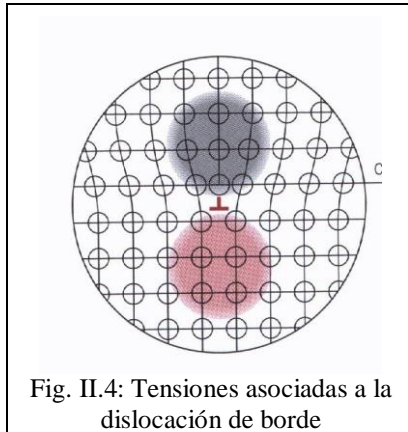


Fig. II.4: Tensiones asociadas a la dislocación de borde

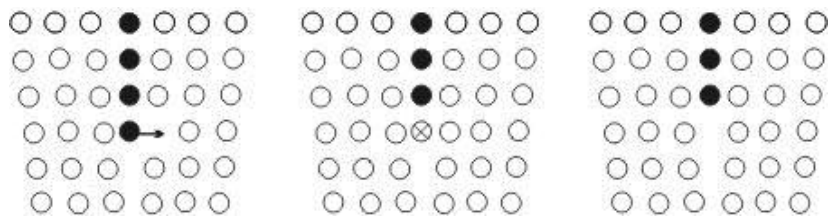


Fig. II.5: Trepado de una dislocación de borde

Un efecto colateral, hace que la componente de borde de una dislocación tenga otro grado de libertad: el trepado (Fig. II.5). Éste ocurre cuando al semiplano extra se agregan impurezas, vacancias o átomos propios del material. Cuando lo hacen vacancias, el semiplano extra "sube" y la dislocación yace sobre el plano superior (trepado positivo). Cuando se agregan sustitucionales, el semiplano extra se extiende hacia abajo produciendo el trepado negativo. Como se ha dicho previamente, esto requiere temperaturas elevadas para que haya buena movilidad atómica, y es bajo esas circunstancias que se produce el trepado. Este fenómeno adquiere mucha importancia en el comportamiento mecánico de metales y aleaciones ya que les permite superar obstáculos cambiando de plano.

**Dislocación helicoidal:** Se puede visualizar a la dislocación helicoidal como una distorsión que se produce cuando un semiplano se enlaza, a partir de cierto punto, con el semiplano vecino, debido a los efectos de una tensión de corte, Fig. II.6a.

En la Fig. II.6b, donde el plano de deslizamiento coincide con el plano del papel, se puede ver el ordenamiento atómico alrededor de la dislocación, siendo AB la línea de dislocación.

El área distorsionada corresponde a la zona deslizada del cristal. Los iones representados por círculos blancos son los que están arriba del plano de deslizamiento y su posición no coincide con los que están abajo del mismo. Los que están representados por los puntos negros, indican que hay coincidencia entre ambos.

Si se traza el circuito de Burgers, con el mismo método utilizado para las de borde, éste no cierra y resulta alabeado. Para cerrarlo es necesario introducir el vector de Burgers indicado en las figuras.

La parte superior del cristal, se ha desplazado con respecto a la inferior en la dirección del vector de Burgers por lo que es paralelo a la LD. El sector grisado muestra el escalón producido en el sector del cristal por la presencia de la dislocación. Se trata de una dislocación derecha, pues al recorrer el helicoides se gira a la derecha. Si el desplazamiento fuese en sentido contrario estaríamos en presencia de una izquierda. Si en la dirección del vector de Burgers  $\mathbf{b}$ , se aplica la tensión de corte resuelta  $\tau_r$ , tal como se indica en la Fig II.6a, la línea de dislocación desliza hacia la izquierda. Tensiones de sentido contrario la harían desplazar hacia la derecha.

<sup>2</sup> Las atmósferas de Cottrell son responsables del "aserrado" que se produce a la tensión de fluencia en los aceros de bajo carbono.

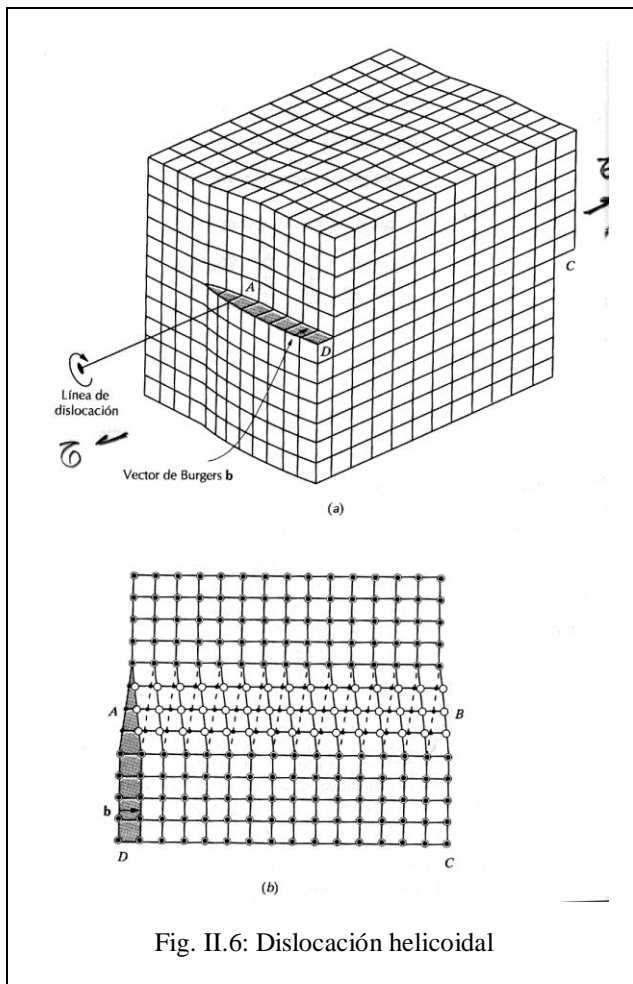


Fig. II.6: Dislocación helicoidal

Existen relaciones específicas entre la tensión de corte resuelta aplicada, el vector de Burgers, la dirección del deslizamiento y la línea de dislocación, que permiten identificar el tipo de componente que se trata.

Dislocación de borde		
$\tau$	//	<b>b</b>
$\tau$	$\perp$	LD
LD	$\perp$	<b>b</b>
Deslizam.	//	<b>b</b>

Dislocación helicoidal		
$\tau$	//	<b>b</b>
$\tau$	//	LD
LD	//	<b>b</b>
Deslizam.	$\perp$	<b>b</b>

Comparando las relaciones correspondientes a ambos tipos de componentes, se puede verificar que sólo hay coincidencia en la primera fila. La tensión que provoca el deslizamiento tiene la misma dirección

para ambas componentes, pero provoca el deslizamiento de las de borde en la dirección de ella, y en la helicoidal normal a ella, como se observa en la Fig. II.7. La tensión de corte es normal a LD para las de borde y paralela a LD para las helicoidales.

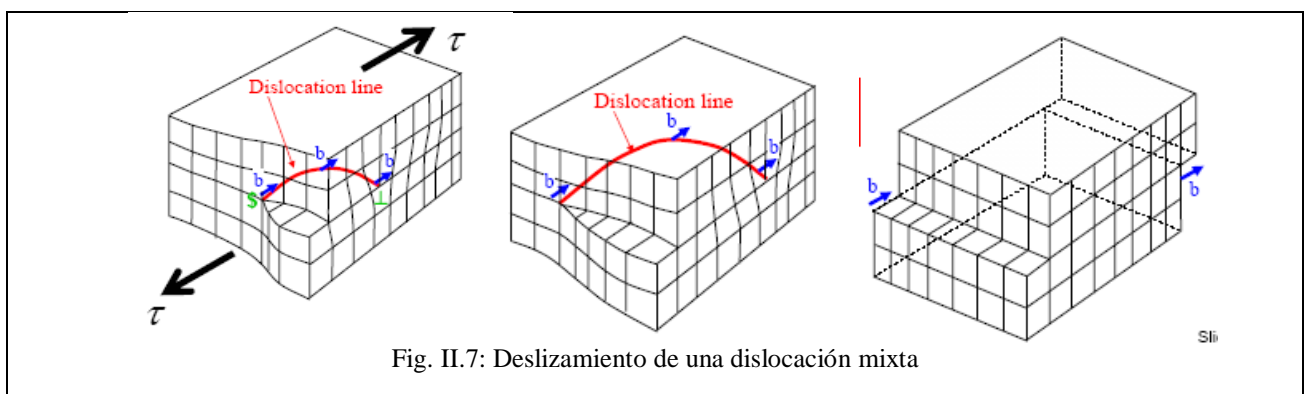


Fig. II.7: Deslizamiento de una dislocación mixta

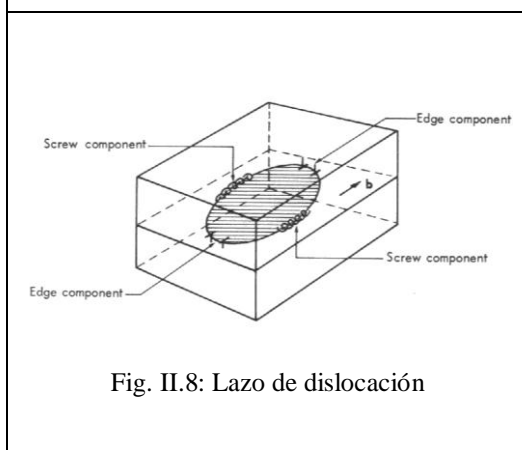


Fig. II.8: Lazo de dislocación

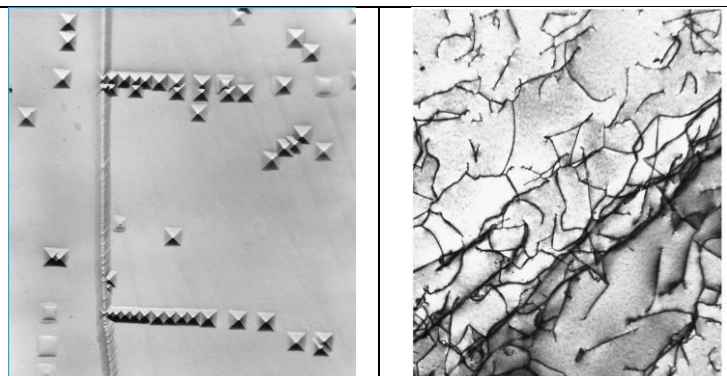


Fig. II.9: Observación de las dislocaciones, a) por microscopio óptico, b) por microscopio electrónico

Una característica destacable de las dislocaciones (válida para ambas componentes), es que no pueden terminar en el interior de un cristal. Pueden formar un lazo o bucle cerrado, como se muestra en la Fig. II.8, aflorar en la superficie externa del cristal, o concurrir o emerger de un nodo. Además, una dislocación puede describir cualquier curva en el interior de un cristal, para lo cual sólo debe disponer de tramos helicoidales y de borde. En la Fig. II.7 se ha mostrado un tramo de dislocación que tiene componentes de borde y helicoidal, pero siempre un vector de Burgers común a toda la línea, normal a las de borde y paralelo a las helicoidales. La forma habitual de visualizarlas es por su envolvente.

La Fig. II.9a es una muestra metalográfica que permite observar cómo las dislocaciones afloran a la superficie. La probeta ha sido atacada por un reactivo adecuado que provoca pequeñas marcas, debido a la energía acumulada alrededor de las líneas de dislocación. Esta técnica permite verlas indirectamente, ya que la visualización directa sólo es posible con microscopios electrónicos de transmisión, como muestra la Fig. II.9b. Utilizando estas técnicas es posible contar las dislocaciones. En un metal o aleación no deformado se detectan entre  $10^6$  y  $10^8$  / $\text{cm}^2$ . Si el mismo material fuera fuertemente deformado, se encontrarían  $10^{11}$  a  $10^{13}$  / $\text{cm}^2$ . Este cambio en la densidad de dislocaciones significa que por cada una en la muestra sin deformar, habrá cien mil luego de la deformación. El principal mecanismo por el cual las dislocaciones se multiplican durante la deformación plástica, es la Fuente o manantial de Frank-Read.

### Fuente o manantial de Frank-Read

Sea un plano cristalográfico, Fig. II.10a, en el cual actúa una tensión de corte resuelta de magnitud suficiente como para que una dislocación deslice.

La dislocación *abcd* tiene un tramo, el *bc* (se denomina *codo*), que yace sobre el plano. Los tramos *ab* y *cd* yacen sobre planos en que la tensión de corte no tiene la magnitud suficiente. Por lo expuesto, sólo está en condiciones de deslizarse el codo, y de éste, los puntos *b* y *c* no pueden hacerlo por ser parte de los tramos que no deslizan por falta de la tensión adecuada.

En estas condiciones, el codo, que como toda línea de dislocación se comporta como una cuerda elástica, debido a su energía por unidad de longitud, se arquea como muestra la posición 1. Si observamos que el vector de Burgers es normal a toda la línea, entonces se trata originalmente de la componente de borde (incluido el codo), y recordando que una LD curva contiene tramos de borde (positivos y negativos) y helicoidales (derechas e izquierdas), ésta será la geometría del mismo. Si la tensión sigue actuando, el codo deslizará, expandiéndose y adoptando sucesivamente las configuraciones indicadas por 2, 3, 4, ... en la figura. En la última posición dibujada entran en contacto dos dislocaciones helicoidales (punto *z*) de distinto signo que, por lo tanto, se anulan. El resultado final (ver la Fig. II.10b), es un bucle o lazo cerrado que constituye una dislocación nueva, mientras al codo se restablece en la posición original, quedando dispuesto para seguir generando nuevas dislocaciones.

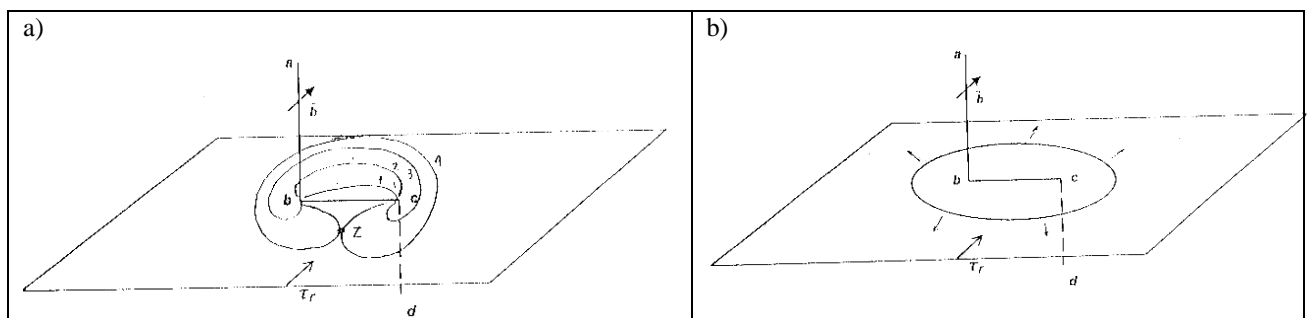


Fig. II.10: Fuente de Frank-Read

## II.2.3 Defectos bidimensionales

### II.2.3.1. Bordes de grano o interfases.

En general se puede aceptar, que cada grano o cristal de una muestra se ha originado en un núcleo de fase sólido, estabilizado como tal en el seno del líquido, y que luego, ha crecido hasta encontrarse con sus vecinos, Fig. II.11. Como en su origen y luego al crecer tienen sus redes orientadas al azar, no es posible que las redes de dos granos vecinos empalmen al encontrarse. Esta superficie de encuentro entre dos granos no puede tener el orden del sólido; allí los átomos están a distancias distintas a las de equilibrio, tanto mayores como menores, por lo tanto la región del borde es de mayor energía que los granos, y más inestable. Esto es muy importante y es la razón por la cual, las transformaciones de equilibrio comienzan en los bordes de

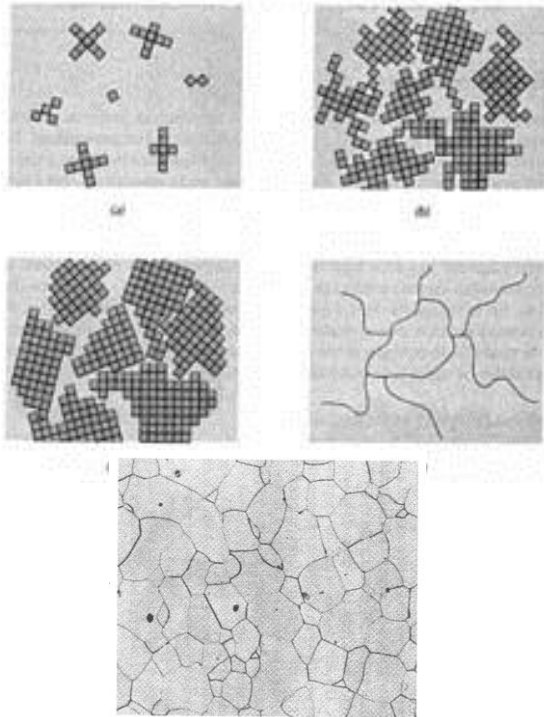


Fig. II.11: Crecimiento de cristales desde el líquido y formación de bordes de grano

grano.

En los espacios anormalmente grandes o pequeños de los bordes, tienden a alojarse los átomos de impurezas y de esa forma reducir las distorsiones de las redes. Por estas características se los define como fuente y sumidero de defectos puntuales. Otra característica de los bordes de grano es que a bajas temperaturas son más resistentes que los granos, propiedad que se invierte cuando la temperatura se eleva.

Además, por su desorden inherente, como así también porque las redes de los granos tienen orientaciones diferentes, son obstáculos insalvables para el movimiento de las dislocaciones.

### II.2.3.2. Fallas de apilamiento

Son regiones que presentan una estructura cristalina diferente a la del metal original. Aparecen en las redes FCC cuando se interrumpe la secuencia *ABCABCABC...* de apilamiento de planos compactos. Si el ordenamiento a partir de un cierto plano, pasara a ser *ABABABA...*, esa región tendría una estructura HCP. Como los bordes de grano, las fallas de apilamiento son zonas de desorden atómico, y por lo tanto, acumulan energía.

### II.2.3.3. Maclas

Cuando los metales se deforman por aplicación de cargas estáticas, la deformación plástica procede casi exclusivamente por el movimiento de las dislocaciones. Sin embargo, a medida que los esfuerzos aplicados son progresivamente dinámicos, y aun predominando el mecanismo de deslizamiento de las dislocaciones, adquiere creciente importancia el maclado.

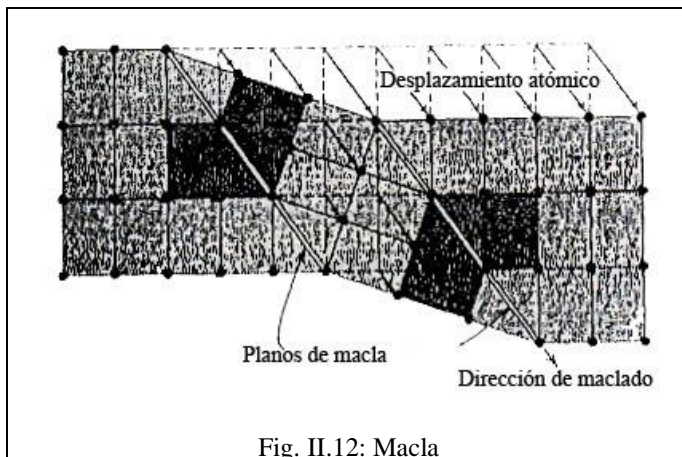


Fig. II.12: Macla

En la Fig. II.12 se presenta una porción de red tetragonal, en la que se puede observar el desplazamiento atómico y los planos de maclado o de macla. También se señala la dirección de maclado.

El defecto es bidimensional porque está localizado en los planos de macla. Entre ellos, la red está girada pero sana, y lo mismo sucede fuera de los mismos. También se los denomina planos especulares porque a cada lado de ellos está la imagen especular de la red del otro lado. Tanto en la zona derecha del cristal como en la izquierda los átomos ocupan puntos reticulares

aunque en la segunda han sufrido un desplazamiento de un espaciado atómico en la dirección de maclado. En la zona central cada átomo se ha desplazado una fracción de dicha distancia, el primero  $1/3$ , el segundo  $2/3$  y el tercero  $3/3$  de la misma.

Si la superficie superior fuese la externa del cristal, al producirse el maclado aparecería en ella un desnivel o escalón observable, incluso a simple vista, en la medida en que la macla tuviese un ancho mucho mayor que las cuatro distancias interatómicas del esquema.

También existen maclas por fallas de apilamiento y maclas de recocido.

### II.2.4 Defectos tridimensionales

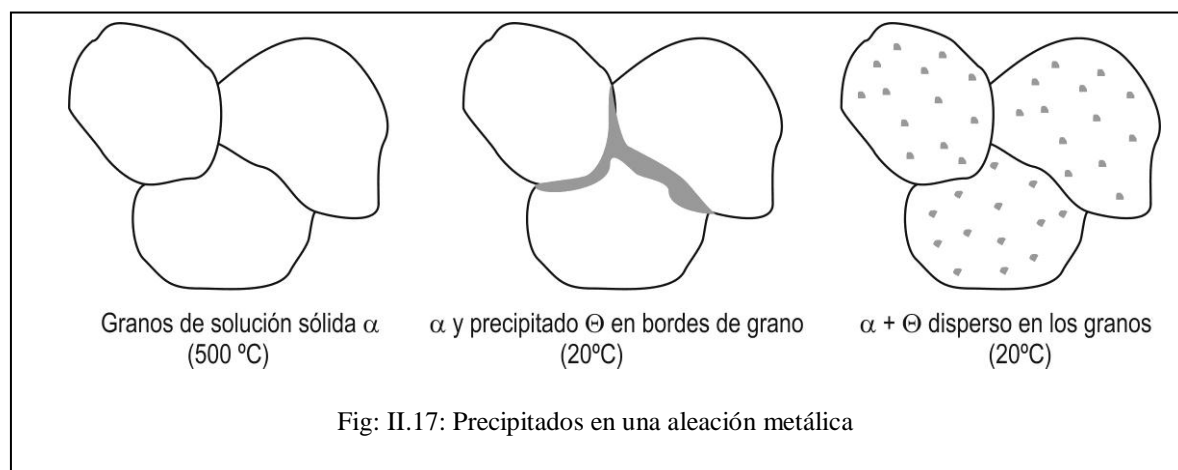
En los materiales sólidos también pueden encontrarse otros defectos de mayor tamaño que los descritos anteriormente. Son los poros, grietas, inclusiones no metálicas y segundas fases (o *precipitados*),

que normalmente se introducen durante el proceso de fabricación.

Los poros y grietas son huecos debidos a oclusión de gases, contracción durante la solidificación o tensiones producidas en los procesos de fabricación de las piezas. Las inclusiones no metálicas se forman por reacción de impurezas provenientes de la materia prima, por ejemplo, fósforo, azufre, silicio. En el caso del SMn, óxidos y silicatos, que se encuentran en los aceros comerciales, la cantidad y tamaño de estas inclusiones, está normalizado por la ASTM.

### Precipitados

Los precipitados son segundas fases que se forman en las aleaciones metálicas debido a la disminución de solubilidad de las soluciones sólidas. Por ejemplo: a 500° C el aluminio disuelve 4,5% de Cu, proporción que disminuye con la temperatura, llegando a los 20° C a sólo 0,2%; durante el enfriamiento los átomos de Cu difunden hacia el borde de grano, donde se constituye una fase nueva, el precipitado, que en este caso es el aluminiuro de cobre. El precipitado posee una red cristalina propia, distinta de la del cristal, por lo tanto, la interfase matriz-precipitado tiene una alta energía acumulada. Mediante tratamientos térmicos, se puede lograr que esos precipitados se dispersen uniformemente en la matriz mejorando las propiedades de la aleación.



### Spikes

Es un defecto que se produce en metales y aleaciones debido a la irradiación con partículas de alta energía, un neutrón por ejemplo. Cuando la partícula ingresa al metal con elevada energía cinética, la pierde por sucesivos choques con los iones metálicos y les comunica su energía, superior a la que se les puede comunicar técnicamente. Los átomos comunican la energía recibida a sus vecinos, lo que produce la fusión localizada en una pequeña zona aproximadamente cilíndrica (25 a 10 Å de diámetro y unos 1000 Å de longitud). Como la masa metálica que rodea la zona es mucho mayor y tiene excelente conductividad térmica, "congela" ese sector impidiendo el restablecimiento del orden cristalino.

### Zonas de Seeger

Se produce cuando la partícula que incide sobre el metal es de masa mayor, una partícula alfa (el núcleo de un átomo de hidrógeno). Por su elevada masa y energía cinética, al chocar con los iones de la red los desplaza fuera de sus puntos reticulares quedando alojados en las proximidades como intersticiales. La forma y magnitud de la zona es similar a la de los spikes y su núcleo está empobrecido en átomos.

## II.3. Defectos no geométricos

**Fonones.** Reciben este nombre por cierta similitud con los fotones, ya que se trata de un cuanto vibracional de la red cristalina. Cuando se perturba la superficie de una muestra metálica, por ejemplo un golpe, una onda elástica se propaga por toda la muestra. Los átomos perturbados comunican la perturbación a sus vecinos, y estos a los suyos. La onda elástica se propaga por cuantos.