

# TECNOLOGIA MECANICA

## «EL ESTADO CRISTALINO»

Por JOSE MARIA CORTES DIAZ

*Profesor de Tecnología del Metal del Centro Nacional de Formación Profesional de Dos Hermanas*

El comenzar esta serie de temas de tecnología de la rama del metal con el estudio del ESTADO CRISTALINO y del ESTADO METALICO está fundamentado en que el CONOCIMIENTO DE LOS MATERIALES ha de constituir y constituye, en todo proceso tecnológico, un papel primordial.

Por otra parte, el comportamiento de un material ante un determinado tipo de esfuerzos, su capacidad de deformación, su capacidad para modificar sus propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos, elevado número de sus propiedades físicas y químicas, etc., son explicadas a partir del conocimiento del estado cristalino y del estado metálico.

En lo sucesivo se irán alternando en esta sección, indistintamente, temas de CONOCIMIENTO DE MATERIALES, METROTECNICA y PROCESOS DE CONFORMACION.

### EL ESTADO CRISTALINO

De todos es conocido cómo el estado sólido presenta dos formas fundamentales: el estado cristalino y el estado amorfo.

Durante el enfriamiento lento de un material desde el estado líquido, y a medida que desciende la temperatura, decrece la energía cinética de los átomos o moléculas que lo forman y aumenta la viscosidad del fluido. En este intervalo de solidificación, los átomos pueden optar por pasar a un estado sólido aparente, en el que persiste el desorden, estado vítreo o "amorfo" o pasar a constituir una ordenación definida y simétrica, estado "cristalino".

Consecuencia de esta distribución continua es la isotropía del estado amorfo y la anisotropía del estado cristalino.

### 1. ESTRUCTURA CRISTALOGRAFICA

La estructura de los cristales se caracteriza porque sus átomos o moléculas se encuentran ordenados de forma regular, repetitiva y simétrica. Este apilamiento es propio de cada elemento y se denomina "red cristali-

na". Junto con el tipo de red, las distancias entre las posiciones medias de los centros de los átomos (constantes reticulares) determinan la estructura cristalográfica.

En la red cristalina, el más pequeño elemento geométrico que permite reproducir por traslación, toda la red, se denomina "celdilla elemental" o "celdilla unidad", que es el elemento definidor de la estructura cristalina de cada elemento en particular.

#### 1.1. SISTEMAS CRISTALINOS.

Las distintas formas de agruparse los átomos, definidos por tres ejes y los ángulos que forman entre sí, reciben el nombre de "sistema cristalino".

Así, pues, cada sistema cristalino estará definido por estos seis parámetros: Tres versores,  $a$ ,  $b$  y  $c$ , y tres ángulos,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , formados por cada dos ejes (fig. 1).

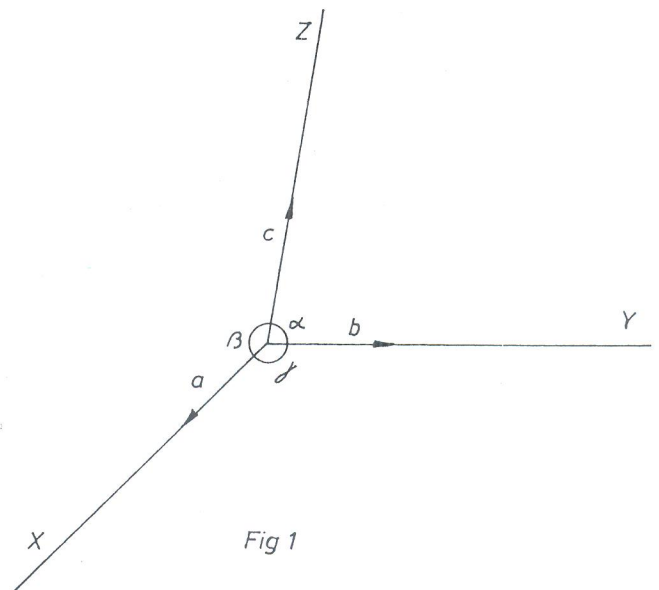


Fig 1

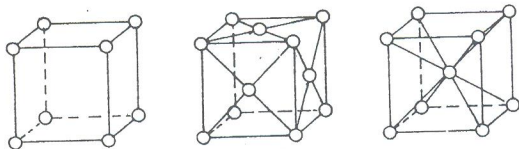
Como se comprende, con las variaciones de los seis parámetros indicados existirán infinitos sistemas cristalinos, no obstante, teniendo en cuenta su simetría, éstos han podido ser reducidos a catorce tipos de redes, que son los conocidos como sistemas de Bravais, los

cuales pertenecen a los siete sistemas cristalográficos, indicados en el cuadro y figuras siguientes.

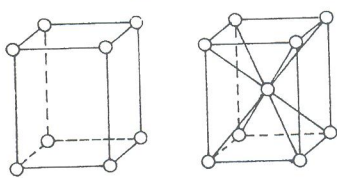
SISTEMAS CRISTALINOS Y REDES CRISTALINAS

Sistemas cristalinios	Valor de sus parámetros	Redes espaciales
Cúbico ... ..	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple. Caras centradas. Centrada.
Tetragonal ... ..	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple. Centrada.
Monoclínico ... ..	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Simple. Base centrada.
Ortorrómico .....	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple. Base centrada. Caras centradas. Centrada.
Triclínico ... ..	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$	Simple.
Romboédrico (trigonal) ... ..	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Simple.
Hexagonal ... ..	$a_1 = a_2 = a_3 = c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	Simple.

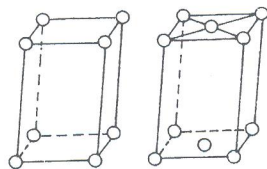
CUBICO



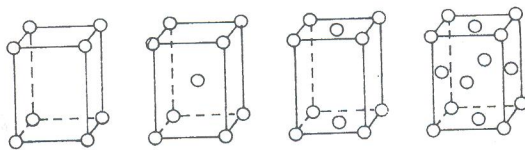
TETRAGONAL



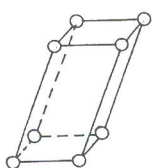
MONOCLINICO



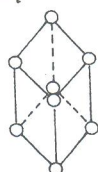
ORTORROMBICO



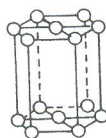
TRICLINICO



ROMBOEDRICO



EXAGONAL



De las catorce redes espaciales estudiadas, puede decirse que la mayoría de los metales cristalizan según tres únicas agrupaciones: cúbica centrada, cúbica de caras centradas y hexagonal compacta, las cuales serán estudiadas ampliamente en el siguiente tema.

1.2. REPRESENTACIÓN DE RECTAS Y PLANOS CRISTALOGRAFICOS.

1.2.1. Sistema de ejes rectangulares.

Para designar un plano o una dirección dentro de una red cristalina hace falta hacer uso de una notación. Esta notación es la de los índices de Miller.

Supongamos tres ejes coordenados, X, Y, Z, y sus correspondientes parámetros, a, b, c, representados en la figura 2, y un plano cristalográfico que intercepta a estos ejes en los puntos M, N y P.

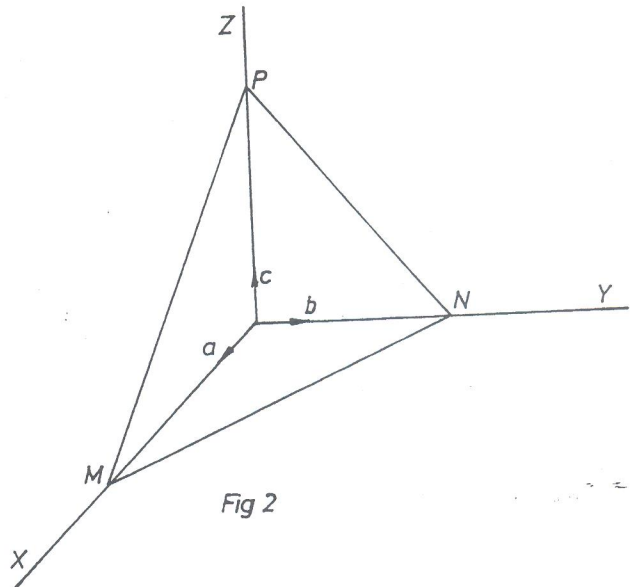


Fig 2

Para estos puntos se verifica que:

$$\overline{OM} = ma; \overline{ON} = nb; \overline{OP} = pc$$

Los valores inversos de m, n y p, 1/m, 1/n y 1/p, de resultar enteros constituirían los I. M. del plano cristalográfico MNP; caso contrario, se determinará el mínimo común múltiplo de m, n y p (A), con lo que se obtendrán los valores enteros:

$$h = \frac{A}{m}, k = \frac{A}{n}, l = \frac{A}{p}$$

que son los I. M. del plano.

Estos valores se representan entre paréntesis (h, k, l).

Veamos algunos ejemplos.

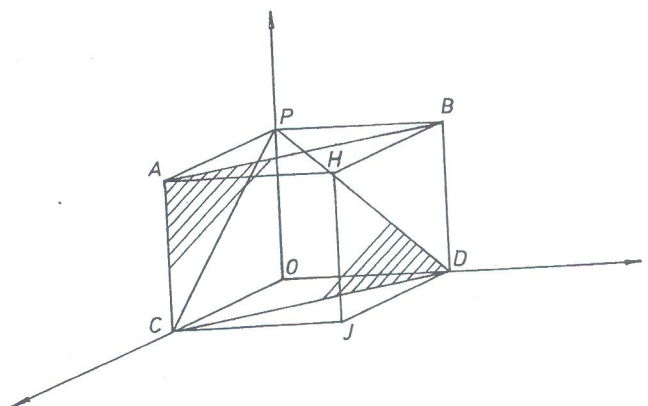


Fig 3

La determinación de los I. M. de los planos cristalográficos representados en la figura 3, *ABCD*, *CPD* y *AHCJ* se realizará de la siguiente forma:

- Determinación del corte con los ejes.
- Determinación de los valores inversos.
- Determinación, si fuese preciso, del mínimo común múltiplo de los valores obtenidos al cortar los ejes.
- Cálculo de los cocientes, resultado de dividir el mínimo común múltiplo por cada uno de los valores obtenidos en el corte con los ejes.

Así, pues, para los planos indicados, los I. M. serán:

Plano	Corte con los ejes	Valores inversos	Indices de Miller
ABCD ... ..	1, 1, ∞	$\frac{1}{1} \frac{1}{1} \frac{1}{\infty}$	(1 1 0)
CPD... ..	1, 1, 1	1, 1, 1	(1 1 1)
AHCJ ... ..	1, ∞, ∞	1, 0, 0	(1 0 0)

Para representar una determinada dirección en un cristal se traza por el origen de coordenadas una recta paralela a la dirección indicada y, sobre ella, se toma un punto arbitrario *M* (fig. 4) de coordenadas *x*, *y*, *z*:

$$x = ma, \quad y = nb, \quad z = pc.$$

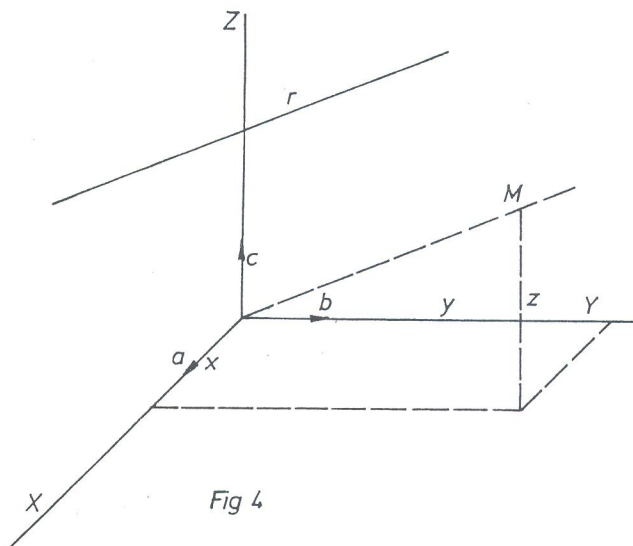


Fig 4

Los valores de *m*, *n* y *p* deben ser enteros y los I. M. de la recta serán los valores *u*, *v*, *w* obtenidos de las expresiones  $m/M = u$ ,  $n/M = v$ ,  $p/M = w$ , en las que *M* es el máximo común divisor de *m*, *n* y *p*.

Estos valores se representan entre corchetes [*u*, *v*, *w*].

Veamos algunos ejemplos.

La determinación de los I. M. de las direcciones cristalográficas *OB*, *OC* y *UB*, representadas en la figura 5, se realizará de la siguiente forma:

- Se traza una recta paralela a la dada que pasa por el origen.
- Se determinan las coordenadas de un punto arbitrario de la recta que pasa por el origen.
- Se transforman en enteros si no lo son.

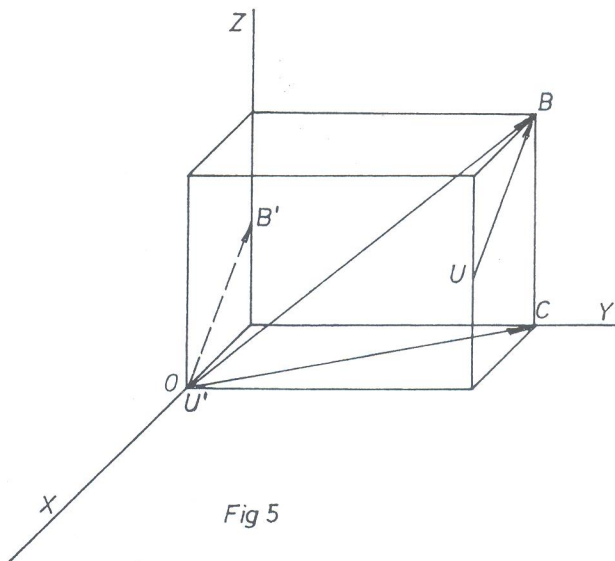


Fig 5

- Se simplifica dividiendo las tres coordenadas por el máximo común divisor si fuese preciso.

Así, pues, para las direcciones cristalográficas indicadas, tendremos:

Dirección	Valores de las coordenadas de un punto	Indices de Miller
OB ... ..	1, 1, 1	[1 1 1]
OC ... ..	1, 1, 0	[1 1 0]
UB ... ..	0, 1, 1/2 $\Rightarrow$ 0, 2, 1	[0 2 1]

### 1.2.2. Sistema de cuatro ejes.

En el sistema hexagonal se consideran cuatro ejes de referencia en lugar de los tres utilizados en el sistema cúbico *X*, *Y*, *Z* (fig. 6).

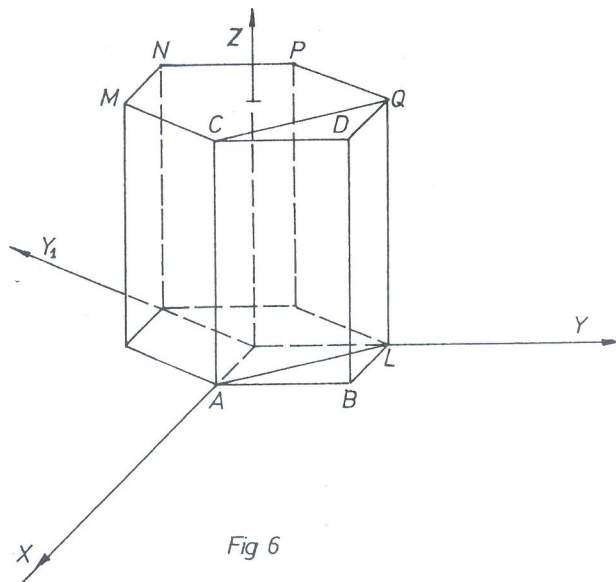


Fig 6

A los tres índices de Miller estudiados se introduce por Bravais un cuarto índice, con lo que la representación de un plano cristalográfico en este sistema será (*h*, *k*, *i*, *l*).

Una deducción elemental establece que los tres pri-

meros índices se hallan relacionados por la expresión:

$$h + k + i = 0$$

de la que se deduce que:

a) La suma de los tres primeros índices debe ser igual a 0.

b) Para el cálculo del tercer índice,  $i$ , bastará conocer los dos primeros, ya que  $i = -(h + k)$ .

Todo lo dicho anteriormente para el sistema de ejes rectangulares es igualmente válido para cuando se utilizan cuatro ejes.

El lector comprobará fácilmente que los planos  $ABCD$ ,  $MNPQDC$  y  $CQAL$ , indicados en la figura 6, tienen por I. M.  $(10\bar{1}0)$ ,  $(0001)$  y  $(11\bar{2}0)$ , respectivamente.

Para el cálculo de las direcciones cristalográficas se seguirá el mismo criterio que para el caso de ejes rectangulares, obteniéndose  $[h, k, i, l]$  y cumpliéndose también que  $i = -(h + k)$ .

### 1.2.3. Espacio interplanar.

El conocimiento del espacio interplanar o distancia entre planos cristalográficos es de la mayor importancia para vaticinar el comportamiento de los materiales en determinados procesos de conformación, ya que como veremos en tema posterior, guarda una estrecha relación con la densidad atómica y con las direcciones de cizallamiento.

Es fácil comprender que la distancia entre planos cristalográficos viene dada igualmente por la distancia del origen de coordenadas al primero de los planos (figura 7).

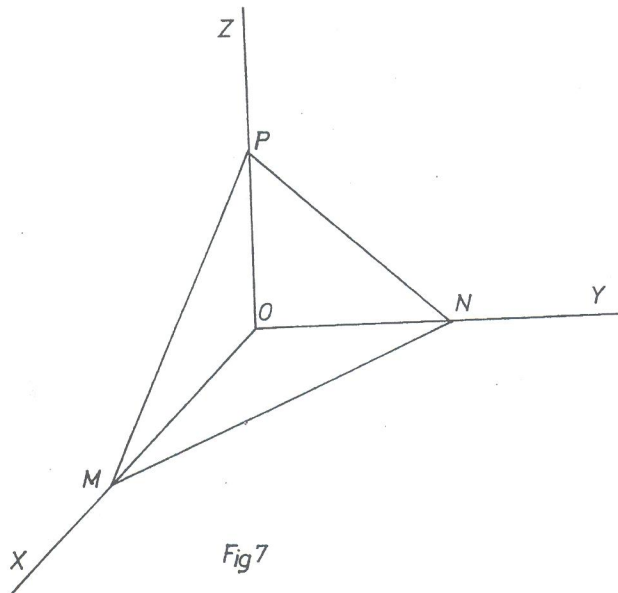


Fig 7

A partir de la ecuación del plano  $MNP$ :

$$\frac{X}{OM} + \frac{Y}{ON} + \frac{Z}{OP} = 1$$

y teniendo en cuenta lo dicho en el apartado 1.2.1:

$$OM = m \cdot a = \frac{A}{h} a$$

$$ON = n \cdot b = \frac{A}{k} b$$

$$OP = p \cdot c = \frac{A}{l} c$$

la ecuación del plano será:

$$\frac{h}{a} X + \frac{k}{b} Y + \frac{l}{c} Z = 1, \text{ ya que } A \text{ en el sistema de ejes rectangulares es } 1.$$

El valor del espacio interplanar vendrá, pues, dado por la expresión:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2}}$$

que para el sistema cúbico al ser  $a = b = c$ , queda reducida a:

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

### 1.2.4. Factor de empaquetamiento y densidad atómica.

Ya hemos indicado anteriormente cómo la distribución de los átomos en el metal constituye factores determinantes de su capacidad de deformación. Los factores que determinan esta distribución atómica son:

- Factor de empaquetamiento.
- Densidad atómica lineal.
- Densidad atómica superficial.

Se define el factor de empaquetamiento como la relación entre el volumen ocupado por los átomos de una celdilla elemental y el volumen de la celdilla.

La densidad atómica lineal y superficial viene determinada por el número de átomos por centímetro para una determinada dirección o por centímetro cuadrado en un plano cristalográfico determinado, respectivamente.

El conocimiento de los planos de máxima densidad atómica es fundamental en el estudio de la deformación plástica de los metales.

### 1.2.5. Análisis de los cristales.

Sin entrar en el estudio del tema, sólo quiero indicar que las técnicas de análisis de cristales utilizadas están basadas en la reflexión que experimenta un haz monocromático de Rayos X cuando atraviesa una red espacial habiéndose desarrollado, fundamentalmente, los métodos de Bragg, Laue y Debye-Scherrer.