

270
Química

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO
FACULTAD DE QUIMICA
ESPECIALIDAD: METALURGIA

Biblioteca Central
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO

RESISTENCIA DE MATERIALES
LIBRO DE PRACTICAS

TESIS PRACTICAS
Que para obtener el título de:

QUIMICO METALURGICO
PRESENTA
GUSTAVO PEDRAZA ABOYTES

QUERETARO, QRO.

1982

No. Reg. H53426

TS

Clas. 620.112

P3718

A . IS 240' IS:

PAULINE 260 J. 7a'
GUADALUPE ANTONIO 7. 2

INTRODUCCION

Viendo la necesidad de una guía para el laboratorio de Resistencia de Materiales tanto para los maestros como para los alumnos, y con la ayuda y asesoría de mi maestro y amigo I.Q.M. Antonio Ugalde Z., me fue factible realizar este libro, en el cual expongo una serie de prácticas las cuales cubren los objetivos deseados dentro del laboratorio de Resistencia de Materiales.

Como nos podemos dar cuenta al leer el libro, todos los trabajos y pruebas que aquí menciono se pueden realizar dentro del laboratorio, por lo que creo que nos va a ser de mucha utilidad para el estudio de la Resistencia de Materiales.

Cabe hacer notar que algunas de las prácticas se realizan en más de una sesión. Esto se debe a que estas prácticas tienen el mismo principio teórico y no tiene objeto estar repitiendo tantas veces lo mismo.

Un agradecimiento muy especial al I.Q.M. Antonio Ugalde Z. y a todos aquellos que de una manera u otra me ayudaron a realizar este libro.

Creo que nunca he vendido un libro, pero sí recuerdo haber quemado uno. Era un libro de Metalurgia.

PREFACIO

Sobrevivió hasta nuestros tiempos una antigua leyenda, vieja como el propio mundo.

Erase una vez un potentado oriental, sabio e ilustrado, que tuvo deseos de conocer todo sobre los pueblos que habitaban la Tierra.

Llamó el rey a sus visires y declaró su voluntad:

-Ordeno que se escriba la historia de todos los pueblos y que se exponga en ella cómo estos pueblos vivieron antes y cómo la pasan ahora: de que se ocupan, qué guerras han librado y dónde pelean en estos momentos; cuales son las artes y oficios que prosperan en distintos países.

El rey concedió el plazo de un lustro para que se hiciera su voluntad.

Los visires atendieron en silencio e inclinados en profundas reverencias. Luego reunieron a los sabios más doctos y les transmitieron la voluntad del soberano.

La gente dice que en aquellos tiempos creció en proporciones inauditas la preparación de canario.

Pasaron cinco años y los visires volvieron a presentarse ante los ojos del rey.

-Se ha cumplido tu voluntad o Gran e. Asómate a la ventana y verás...

El rey, extasiado, se frotó los ojos. Una enorme caravana de camellos, cuyo fin apenas se divisaba en la lejanía, se alineaba ante el palacio. Cada camello iba cargado con dos grandes fardos. Cada fardo contenía diez gruesísimos infolios encuadernados en maravilloso cordobán y solícitamente empaquetados.

-¿Qué es eso?-presuntó sorprendido el rey.

-Es la historia del mundo- contestaron los visires. Cumpliendo tu voluntad, sabios sapientísimos escribieron esta historia durante cinco años, sin dar se tregua.

-¡Qué! ¿Queréis ponerme en ridículo? -exclamó enfadado el monarca-. ¡No podré leer hasta el final de mi vida ni la décima parte de lo que han escrito! ¡Que se escriba para mí una historia breve, pero que contenga los acontecimientos más importantes!

Y concedió el plazo de un año.

Pasado el año, volvió a presentarse ante los muros del palacio la caravana. Mas esta vez constaba tan solo de diez camellos que llevaban dos fardos cada uno, y cada fardo contenía diez volúmenes.

La ira del soberano fue enorme.

-¡Que solamente se escriba lo primordial e importantísimo de lo acaecido en la historia de los pueblos en todas las épocas! ¿Cuánto tiempo se necesita para hacerlo?

Entonces se adelantó el más docto de los sabios y dijo:

-Majestad, mañana tendrás lo que deseas.

-¿Mañana? -se asombro el rey-. Bien, pero si mientes, perderás la cabeza.

Apenas en el cielo matutino hubo aparecido el Sol y las flores despiertas de su somnolencia se abrieron en el pleno esplendor, el rey ordenó que se presentara el sabio.

Este entró con una arquilla de sándalo en las manos.

-Majestad, en esta arquilla encontraras lo principal e importantísimo de lo que hubo en la historia de los pueblo en todos los tiempos- profirió el sabio, inclinándose ante el rey.

El monarca abrió la arquilla. En la almohadilla terciopelada yacía un pequeño trocito de pergamino en que estaba trazada una sola frase: "Ellos nacían, vivían y morían".

Así dice la antigua leyenda. Esta leyenda - llegó involuntariamente a mi, cuando se me propuso escribir un libro de prácticas sobre Resistencia de Materiales, añadiendo, además, que el volumen del mismo debe ser reducido. Por consiguiente hace falta escribir sólo lo principal. Pero ¿qué es lo principal en Resistencia de Materiales?

¿Cómo no recordar aquí el trocito de pergamino en el fondo de la arquilla de sándalo?

Después de largas cavilaciones, llegué a una decisión. En Resistencia de Materiales, todo es importante. Una cosa más, otra menos, y eso depende, además del punto de vista del que habla.

Si a alguien se le ocurre la idea de escribir sobre Resistencia de los Materiales abarcando todos - sus aspectos multifacéticos y su lozanía, correría el riesgo de agotarse los recursos de papel, incluso de un Estado altamente desarrollado. Por fortuna nadie se le ha ocurrido emprender algo semejante. Pero una tarea de esta índole fue la planeada para realizar - este libro de prácticas.

Sin embargo hemos encontrado una salida. Decidimos escribir en pocas palabras sobre muchas cosas. Esta claro que en cierto grado es cuestión de gusto. Unos, probablemente, hablarían de otras cosas; y otros de cosas más distintas aún. No obstante, como nosotros los que tuvimos que redactar este libro, por lo tanto, no se quejen de nosotros si de pronto no encuentran en él lo que ustedes, precisamente, quisieran saber.

I N D I C E

Introducción.....	I
Prefacio.....	II
Práctica # 1	
Problemas de electrones y uniones.....	1.1
Práctica # 2	
Ordenamiento atómico.....	2.1
Práctica # 3	
Nucleación.....	3.1
Práctica # 4	
Indices de Miller y nociones de cristalografía	4.1
Práctica # 5	
Microscopía.....	5.1
Práctica # 6	
Fases en sólidos.....	6.1
Práctica # 7	
Metalografía.....	7.1
Práctica # 8	
Pulido y ataque electrolítico en celda	8.1
Práctica # 9	
Ensayo de Dureza.....	9.1
Práctica # 10	
Ensayo de Tracción.....	10.1

PRACTICA # 1

PROBLEMAS DE ELECTRONES Y UNIONES

PROBLEMA 1. Calcular la longitud de onda de la radiación emitida cuando un electrón en el átomo de hidrógeno salta desde un estado excitado $n = 2$ hasta un estado $n=1$

PROBLEMA 2. Cuando un único electrón se mueve en el campo de un núcleo de carga Ze , siendo e la carga elemental, su energía total

$$E = -\frac{2\pi^2 m z^2 c^4}{n^2 h^2} = -\frac{13.6 z^2}{n^2}$$

Las energías de los niveles 1S en los átomos libres neutros de He y de Li son aproximadamente -24 y -65 eV respectivamente. Calcular las energías para el caso de un electrón único en He ionizado, y en Li doblemente ionizado. Dar una razón de la discrepancia entre los valores dados y los calculados.

PROBLEMA 3. Los espectros de rayos X indican que los electrones más profundos en los elementos pesados no se afectan intensamente por la presencia de los electrones periféricos.

La tabla siguiente da valores muy aproximados de la energía de los electrones 1S, 2S y 3S en los átomos libres de varios elementos.

	Mg	Cu	Mo	Xe	Hg	U
1S	-1300	-19000	-20000	-35000	-85000	-115000
2S	-85	-1100	-2800	-5500	-15000	-23000
3S	-7.5	-110	-500	-1150	-3500	-5700

Usar la ecuación dada en el prob. 2 para calcular los valores en los niveles 1S, 2S y 3S de cada uno de los elementos de la tabla anterior. Comparar los valores de dicha tabla con los calculados para determinar para cuales electrones y elementos la ecuación es razonablemente correcta.

- PROBLEMA 4. Los elementos con números atómicos 21 a 28, 39 a 46, 57 a 78 y 89 en adelante, son conocidos como elementos de transición. Teniendo en cuenta las configuraciones electrónicas dadas en el apéndice I B (Vol. I Ciencia de los Materiales. Estructura. Moffat. Pág 201) determine la característica común.
- PROBLEMA 5. Usando los conceptos de la mecánica cuántica, la mecánica ondulatoria, discuta porque una unión covalente tiende a ser más intensa en las direcciones en que ψ^2 es un máximo.
- PROBLEMA 6. Explique por que un "gas inerte" como el Xe puede reaccionar con el fluor para formar un compuesto estable. ¿Por que no reacciona con el nitrógeno?
- PROBLEMA 7. Para una molécula aislada, formada por iones univalentes, la ecuación será:
- $$V = \frac{e^2}{r} + \frac{B}{r^m}$$
- donde e es la carga electrónica y como estado de referencia se considera el de

dos iones separados por una distancia infinita (es decir $E = 0$), ya que e es una constante, podemos reemplazar B por Ce^2 , donde C es otra constante; entonces:

$$V = -\frac{e^2}{r} + \frac{Ce^2}{r^m}$$

Obtenga una expresión para la distancia de equilibrio de los iones en función de C y m solamente.

PROBLEMA 8. Empleando la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

demuestre que si un electrón de valencia metálico tiene, en un sólido, mayor longitud de onda que un átomo libre, tendrá menor energía cinética.

PROBLEMA 9. La fuerza es la derivada de la energía potencial con signo negativo respecto a la distancia radial:

$$F = -\frac{dV}{dr}$$

Una fuerza con dicho signo se define como de atracción, y una positiva como de repulsión. Con referencia a la figura 1.11 (Vol. I. Ciencia de los Materiales Estructura. Moffat, pag 30) demuestre que cuando dos iones se mueven hacia su distancia de equilibrio, realizan trabajo y que la energía potencial mínima corresponde a una fuerza nueva.

PROBLEMA 10. Explique de que manera el tamaño pequeño del protón ayuda a racionalizar el hecho de que las uniones hidrógeno son

más intensas que otras dipolares. ¿Podría la unión hidrógeno clasificarse como iónica? ¿Como metálica? ¿Como covalente?.

PROBLEMA 11. ¿Porqué los átomos de los gases inertes forman fases condensadas (sólida y líquida), a temperaturas muy bajas pero no a temperatura ambiente?

BIBLIOGRAFIA

CIENCIA DE LOS MATERIALES
ESTRUCTURA. TOMO I
MOFFATT, PEARSALL, WULFF.

PRACTICA # 2

ORDENAMIENTO ATOMICO

El ordenamiento de los átomos depende principalmente de si la unión entre dos átomos es direccional o no-direccional.

UNIONES DIRECCIONALES

Ejemplos de ellas son las uniones covalentes y las de dipolo permanente. Con uniones covalentes encontramos por ejemplo el fósforo, arsénico, antimonio, bismuto, etc. Las uniones de dipolo permanente normalmente ligan grupos de átomos entre sí, más que átomos individuales.

En general, en las uniones direccionales, el ordenamiento atómico está determinado por los ángulos de enlace entre los átomos y se representan estas uniones por un poliedro cuyos vértices representan las direcciones de intensidad máxima de unión.

Es solo la unión covalente que presenta un ordenamiento local significativo, siendo su carácter discreto y su dirección espacial los que determinan el ordenamiento.

Los ángulos de unión covalente son próximos a 90° (debido al ángulo que forman entre sí los orbitales p), por ejemplo, el fósforo tiene un ángulo de enlace de 99° y el bismuto uno de 94° .

TRABAJO PRACTICO

De acuerdo a los datos anteriores y con el material adecuado, construya, de acuerdo a su imaginación el poliedro de unión con enlaces covalentes del fósforo o bismuto o algún otro material covalente que usted conozca.

UNIONES NO-DIRECCIONALES

En este caso, el ordenamiento atómico depende del tamaño relativo de los átomos. Geométricamente

se puede describir este ordenamiento haciendo uso de poliedros de coordinación los cuales se construyen conectando los centros de átomos o iones vecinos los cuales están tocando a un átomo central. Ejemplos de uniones no direccionales son las uniones metálicas, las iónicas y las de Van der Waals.

Los átomos unidos no-direccionalmente pueden considerarse que se comportan esferas fuertemente empaquetadas, las cuales obedecen ciertas reglas geométricas que dependen de las diferencias en tamaño de los átomos presentes.

De acuerdo con las reglas geométricas, el número máximo de esferas que se pueden acomodar alrededor de una central y de tal manera que todas se toquen simultáneamente, son doce. De esta manera al hacer un empaquetamiento con esferas rígidas, podremos acomodar seis esferas alrededor de una central y otras tres por encima y tres por debajo del plano central en que se encuentran nuestras esferas.

A) Si las tres esferas del plano superior quedan en posiciones alineadas directamente encima de las esferas del plano inferior, tendremos un empaquetamiento llamado HEXAGONAL COMPACTO (HC), o sea, una secuencia ABABABAB...

B) Si las tres esferas del plano superior no están alineadas con las esferas del plano inferior, sino en posiciones alternadas, tendremos un empaquetamiento CUBICO DE CARAS CENTRADAS (CCC), o una secuencia ABCABCABC...

Si se unen los centros de las esferas entre sí, se verá que en el caso del Hexagonal Compacto nos formará un prisma hexagonal; en el caso del cúbico de caras centradas, nos formará un cuadrado con un átomo

en el centro. Si estas formas geométricas se repiten en el espacio, nos formarían respectivamente un prisma hexagonal y un cubo. Ejemplos de estructuras de empaquetamiento compacto pueden ser los gases nobles solidificados y la mayor parte de los elementos metálicos.

C) Los metales alcalinos como el sodio, potasio, etc. y los metales de transición (hierro, cromo, tungsteno, etc.) tienen un arreglo de átomos que no es tan compacto como los Hexagonales y el CCC, pero que es un arreglo de átomos que relativamente tienen baja energía de configuración. Este nuevo arreglo, es llamado Cúbico de Cuerpo Centrado (CC). Se cree que este arreglo se debe a la existencia de algunas uniones covalentes que dan un carácter direccional a las uniones. Este nuevo arreglo consiste de un átomo central rodeado de cuatro átomos en un plano superior y cuatro en un plano inferior.

TRABAJO PRACTICO

Haciendo uso de esferas rígidas, construya modelos de los tres empaquetamientos mencionados arriba.

UNIONES NO-DIRECCIONALES. ATOMOS DE DIFERENTES TAMAÑOS.

Este caso es posible cuando hay una diferencia apreciable de tamaño entre los átomos. El ejemplo más evidente de ellos son los sólidos iónicos, ya que aniones y cationes generalmente difieren bastante en tamaño, lo cual se debe a la transferencia de electrones de uno hacia el otro, lo que hace que los aniones resultantes sean más grandes que los cationes.

Número de coordinación es el número de iones del elemento "A" que rodean a un ión menor del elemento "C". Este número es una función de la diferencia -

de tamaños entre "A" y "C"; a mayor diferencia de tamaños, menor número de coordinación.

Los poliedros que resultan de conectar los centros de los aniones que rodean a un catión central se llaman "Poliedros aniónicos" o si se trata de átomos en lugar de iones, se llamarán "Poliedros de Coordinación".

TRABAJO PRACTICO

Con la ayuda de su modelo de HC y CCC que ha construido con esferas rígidas, construya los poliedros de coordinación para cada uno de los dos casos.

ESTRUCTURA CRISTALINA

Una vez que hemos visto que el tipo de enlace determina que tipo de ordenamiento atómico vamos a tener, diremos que los materiales cristalizan en ciertos tipos de estructuras cristalinas que son diagramas tridimensionales regulares de átomos en el espacio. Las estructuras cristalinas se describen en términos de un concepto geométrico idealizado llamado RED ESPACIAL que se describe como un conjunto de puntos en el espacio en el que se apilan los poliedros de coordinación de tal manera de minimizar la energía del sólido.

Idealmente, la ordenación más estable de los poliedros de coordinación en un cristal, será aquella que haga mínima la energía por unidad de volumen o sea aquella que:

- 1) Preserve la neutralidad eléctrica
- 2) Satisfaga la direccionalidad y el carácter discreto de todas las uniones covalentes.
- 3) Minimice la fuerte repulsión ión-ión.
- 4) Apile los átomos tan compactamente como -

Para los metales y elementos nobles, las estructuras más comunes son la CCC, CC y HC. El arreglo CC es simplemente un apilamiento de cubos.

TRABAJO PRACTICO

Con el material adecuado, construya una celda unitaria y una celda primitiva de un arreglo, CCC, CC y HC.

PLANOS COMPACTOS

Los arreglos CCC y HC son difíciles de visualizar haciendo uso de sus poliedros de coordinación y por ello se acostumbra a describirlos en función de planos atómicos compactos que es una ordenación bidimensional de átomos agrupados tan estrechamente como sea posible a fin de minimizar el volumen. El orden en que se apilen estos planos determinará la estructura resultante, por ejemplo, se coloca un plano encima de otro y si se coloca un tercer plano, de tal manera que los átomos de éste estén exactamente encima de los átomos del primer plano, tendremos un apilamiento HC o sea una secuencia de apilamiento ABABAB... Pero si se coloca el tercer plano de tal manera que sus átomos queden exactamente encima de los agujeros del primero y segundo planos, la estructura será CCC, con una secuencia de planos ABCABC...

TRABAJO PRACTICO

Usando esferas rígidas construya planos compactos y apílelos en una secuencia que forman las tres diferentes estructuras cristalinas: CC, CCC y HC.

GRUPOS DE ATOMOS

En cada punto de la red puede haber no solo un átomo sino también un grupo de átomos, pero por cada átomo o grupo de átomos idénticos, con la misma orientación, en todo otro punto de la red a fin de sa

tisfacer la definición de red espacial.

Por ejemplo tomemos los elementos que tienen más de tres electrones de valencia. Ejemplo, el Br, I ó Cl, en los que dos átomos similares se unen para formar una molécula diatómica y éstas moléculas se unen a otras mediante enlaces secundarios débiles. Estas moléculas van a posiciones de redes espaciales de Bravais. Por ejemplo el I, cristaliza con una estructura ortorómbica.

TRABAJO PRACTICO

Usando esferas rígidas, construya un modelo de celda unitaria ortorómbica para el yodo:

Otro ejemplo de este caso son los elementos del grupo VI (S, Se, Te) que forman moléculas en cadena o anillos que después se unen mediante uniones secundarias débiles y cristalizan en alguna de las redes de Bravais. Por ejemplo el Te, cristaliza en la forma hexagonal.

TRABAJO PRACTICO

Construir un modelo de la celda unitaria del telurio.

Los elementos del grupo IV tienen estructuras cristalinas en las que todas las uniones son covalentes dando como resultado una estructura cúbica de diamante. Por ejemplo, el Si, Ge y Sn gris.

TRABAJO PRACTICO

Construir un modelo de estructura cúbica de diamante.

En otros casos del grupo IV, algunas de las uniones pueden ser no covalentes sino secundarios débiles, por ejemplo el grafito, los átomos se unen covalentemente para dar planos de estructura hexagonal, pero los planos entre sí tienen uniones secundarias

débiles.

TRABAJO PRACTICO

Construir un modelo de estructura de grafito

CRISTALES IONICOS

Los cristales puramente iónicos no son comunes, sin embargo algunos contienen un gran porcentaje de unión iónica y pueden considerarse como tales. En ellos, los poliedros de coordinación se apilan de tal manera que se mantenga la neutralidad eléctrica y se minimice la energía de ligadura por unidad de volumen sin que causen repulsiones fuertes entre iones de igual carga. La repulsión es máxima entre cationes ya que tienen menor volumen y luego sus poliedros deben apilarse de tal manera que los cationes en el centro estén bastante alejados como para que la repulsión entre ellos sea despreciable.

En el caso de cationes altamente cargados que tienen poliedros de coordinación pequeños (triángulos y tetraedros) se ha visto que en general estos poliedros se unen solo por los vértices, maximizando así la distancia entre los cationes. Menos probable es que se unan por las aristas y nunca se encuentran compartiendo sus caras.

Si el número de coordinación aumenta y la carga catiónica disminuye, los poliedros de coordinación se apilan más compactamente o sea que comparten aristas y aún caras.

Sin embargo, no es muy común observar una coordinación triangular en los cristales iónicos ya que se requeriría una diferencia muy grande en el tamaño de los iones.

Por su parte los poliedros de coordinación tetraédrica u octaédrica al apilarse, por ellos mis-

mos no llenarán el espacio, pero una combinación de - ambos si lo hará. Esto equivale a colocar aniones en los puntos de una red CCC ó HC y cationes en los espacios tetraédricos u octaédricos que hay entre ellos.

TRABAJO PRACTICO

Haciendo uso de esferas rígidas, forme planos compactos y apilamientos e indique los sitios tetraédricos y octaédricos. Demuestre que un apilamiento de octaedros sobre octaedros equivale a una estructura HC (lo mismo para tetraedros). Pero si se apilan tetraedros sobre octaedros, la estructura será CCC: - demuéstrelo.

Cuando se representa una estructura cristalina con tetraedros y octaedros hay que recordar que los vértices de estos, serán sitios que ocuparían átomos si la estructura se rerepresenta con esferas.

TRABAJO PRACTICO

A fin de aclarar lo anterior, haga una representación de la estructura CCC y HC con esferas y con poliedros.

La sílice SiO_2 es un caso especial en el cual el Si tiene una carga catiónica de 4 y estará coordinado tetraédricamente 4 oxígenos y los tetraedros formados tendrán en común solamente los vértices. De esta manera es posible tener diferentes arreglos tridimensionales de los tetraedros unidos por los vértices. Por ello es que la sílice presenta varias formas alotrópicas. El caso del TiO_2 es algo similar al sílice, en que la carga catiónica es 4, pero la coordinación será octaédrica, pero en este caso, como los octaedros son mayores, estos pueden ser apilados de manera suficientemente compacta como para compartir las aristas sin que los cationes se acerquen demasiado en

tre sí, pero no se llegará al caso ideal en que los octaedros compartan las caras para formar una estructura compacta. Por ello es que el bióxido de titanio puede tener varias formas alotrópicas.

TRABAJO PRACTICO

El TiO_2 en la forma rutilio tiene una coordinación octaédrica, en la cual los octaedros comparten varias aristas, pero no todas. También se comparten algunos vértices. La celda unitaria de Bravais en este caso, es tetragonal. Construya esta celda usando octaedros.

CRISTALES MOLECULARES

Dos especies atómicas pueden unirse entre sí mediante enlaces iónicos o covalentes para formar una molécula. Pero estas moléculas pueden unirse entre sí con uniones secundarias débiles para formar Cristales Moleculares. Si la ligadura primaria es principalmente iónica, se formarán moléculas discretas si la carga catiónica es igual al producto de la carga aniónica por el número de coordinación. Por ejemplo el F_4Si (coordinación tetraédrica del F alrededor del Si).

También puede suceder que la unión primaria sea covalente y que la secundaria débil sea iónica. Esto sucede en el hielo, en el cual el oxígeno y el hidrógeno están unidos covalentemente, pero las moléculas de agua están unidas entre sí por uniones iónicas débiles entre los átomos de hidrógeno o sea uniones de hidrógeno dipolar. Las moléculas así unidas se acomodarán en una estructura hexagonal y de ahí provendrá la simetría hexagonal de los copos de nieve.

Pero el grupo más numeroso de cristales moleculares es aquel en el cual la unión primaria es covalente y la unión secundaria entre moléculas será hecha a través de uniones débiles de Van der Waals. Por

ejemplo los cristales de CH_4 y NH_3 a bajas temperaturas.

Los cristales moleculares de cadena larga - son los que más importancia tienen en la práctica. Si las moléculas tienen una sección transversal que sea razonablemente simétrica, esto es generalmente un indicio de que pueden llegar a cristalizar en una red - ortorrómbica o monoclinica.

Si las cadenas son paralelas entre sí pero - inclinadas con respecto a la base de la celda unitaria, se tendrá un sistema monoclinico.

Si los ejes de la cadena son paralelos entre sí pero sus planos están inclinados en dos direcciones diferentes, se tendrá el sistema ortorrómbico.

Ejemplo de este tipo de cristales son los polímeros que aunque normalmente son no cristalinos por ser sus cadenas tan largas que fácilmente se enredan y se pierde el orden cristalino, si es posible encontrar en regiones, ordenamientos locales y ha sido posible obtener monocristales crecidos de la solución. Ejemplo, el polímero polietileno que cristaliza en el ordenamiento ortorrómbico.

TRABAJO PRACTICO

La molécula del polietileno formada por un - átomo de carbono y dos de hidrógeno (formando un ángulo de 90°), se une a otras moléculas a través de uniones $\text{C}=\text{C}$ que forman un ángulo de 45° , formando cadenas rectas cuya sección transversal es rectangular. Construya un modelo de esferas e imagine como se acomodarán estas cadenas en un sistema ortorrómbico.

BIBLIOGRAFIA

ESTRUCTURA. Ciencia de los materiales, Vol I,

W. G. Moffatt, G. W. Pearsall and J. Wulff

PRINCIPIOS DE METALURGIA FISICA. R. E. Reed-

Hill.

INTRODUCTION TO SOLID STATE PHYSICS. Ch. -

Kittel.

PRACTICA # 3

NUCLEACION

IMPERFECCIONES EN CRISTALES

Cualquier desviación de una red o estructura periódica perfecta es considerada como una imperfección. En general, los cristales reales presentan imperfecciones de uno u otro tipo.

Muchas veces las propiedades de los sólidos dependen tanto de las imperfecciones así como de la naturaleza del cristal en que estas se encuentran; en casos extremos, el cristal huésped de las imperfecciones solo sirve como vehículo o solvente o matriz para las imperfecciones; por ejemplo la conductividad de algunos semiconductores depende enteramente de las pequeñas trazas de impurezas químicas. El color que presentan algunos cristales proviene de las imperfecciones. Luminiscencia es otra característica que en general está ligada a las impurezas. La lista podrá ser mayor y podemos mencionar, la difusión de átomos que depende de átomos extraños y vacancias; propiedades mecánicas y plasticidad que están controladas por imperfecciones.

DEFECTOS PUNTUALES

Los defectos puntuales más comunes son en general; las impurezas químicas, los sitios vacantes en la red o vacancias y los átomos intersticiales (que son átomos extras que se encuentran en posiciones no regulares de la red).

VACANCIA

Es el tipo de defecto puntual más simple y tendremos una vacancia en el caso cuando en la red de átomos o iones, uno de ellos esté faltando. Se creará una vacancia cuando podamos transferir un átomo de un

sitio interior de la red, a un sitio de la red en la superficie del cristal.

Puede suceder que en lugar de un átomo transferamos dos o tres átomos a la superficie del cristal y en estos casos tendremos respectivamente una di y una tri-vacancia.

Si el cristal que estamos estudiando es un cristal iónico, podemos tener vacancias o defectos Schottky cuando un ión esté faltando en la red, ya sea un anión o catión o la combinación de ambos. En general, en un cristal iónico es más favorable desde el punto de vista energético el tener igual número de iones positivos e iones negativos faltantes; de esta manera el cristal se mantiene electrostáticamente neutro a escala local.

INTERSTICIALES

Cualquier átomo de la red o una impureza que entre en la red y ocupe una posición que no es normalmente ocupada por los átomos de la red, se llama intersticial.

En el caso de un cristal iónico es posible transferir un ión de una posición de la red a una posición intersticial, dejando una vacancia en la posición antigua ocupada por el ión. Al par intersticial-vacancia se le conoce como defecto Frenkel. Se ha encontrado que en los haluros de plata de gran pureza, las vacancias más comunes son los defectos Frenkel, lo cual se ha determinado a través de mediciones de densidad; la formación de un defecto Frenkel no cambia el volumen del cristal y luego la densidad permanece constante.

SUSTITUCIONALES

Si un átomo extraño o de impureza entra en -

la red y ocupa un lugar que normalmente es ocupado por un átomo de la matriz, tendríamos un caso de impureza sustitucional. Ejemplo de ellos son las aleaciones o soluciones sólidas sustitucionales. Existen ciertos requisitos llamados de Hume-Rothery, que un átomo sustitucional debe llenar para entrar en solución.

TRABAJO PRACTICO

Haciendo uso de esferas rígidas y el material adecuado, forme planos compactos de estructuras conocidas y en ellos simule e identifique todos los defectos puntuales mencionados.

DEFECTOS LINEALES

Cuando se deforma un metal se ha visto que la cantidad de esfuerzo necesario para iniciar la deformación es asombrosamente más pequeño que la cantidad de esfuerzo que se calcula teóricamente a partir de las fuerzas de cohesión entre átomos de cristales perfectos.

La explicación de la discrepancia entre el valor computado y el valor real se debe al hecho de que los cristales reales no son perfectos sino que contienen una gran cantidad de defectos o imperfecciones. El tipo de defecto que hace posible la explicación para el valor tan bajo de esfuerzo por deslizamiento en el caso de un material real, es el llamado dislocación.

Existen dos tipos básicos de dislocaciones, dependiendo de su orientación: de borde y de tornillo.

DISLOCACION DE BORDE

En la fig 1 se muestra esquemáticamente una dislocación de borde.

Podría decirse que se tiene una dislocación de borde cuando un plano de la red cristalina, termina en el interior del cristal. Si pensamos que la fig 1 representa la cara frontal del cristal debemos decir que la dislocación de borde es un defecto lineal que corre desde el frente hasta la cara posterior del cristal.

En la fig 2 se muestra el movimiento de una dislocación de borde a través de un cristal, cuando se le aplica un esfuerzo de corte (el esfuerzo está representado por el vector S) debido al esfuerzo aplicado al átomo "c" se moverá a una posición "c'" (fig. 2b). Esto significa que la dislocación se mueve una distancia atómica hacia la izquierda. Veremos entonces que el medio plano X de la fig 2a es ahora un plano completo y el medio plano será ahora el plano Y, en la fig 2b si se continúa aplicando el esfuerzo, el medio plano irá cambiando de posición hasta que llegue a la superficie del cristal, en donde formará un escalón de una altura igual a la distancia atómica.

En la fig 1 tenemos una dislocación de borde en el cual el plano extra queda encima del plano de deslizamiento, pero también es posible tener un plano extra en la parte inferior.

Al caso en que el plano extra queda en la parte superior se le denomina dislocación de borde positiva y se le representa con el signo \uparrow con el cual la línea vertical indica el plano incompleto y la línea horizontal el plano de deslizamiento.

El otro caso es el de una dislocación de borde negativa y se representa como \downarrow .

DISLOCACION DE TORNILLO

Otro tipo de dislocación que se ha definido

es la dislocación de tornillo. En la fig 3 se representa una dislocación de este tipo. Suponemos que cada cubo pequeño representa un átomo.

En la fig 3b se representa el mismo cristal pero mostrando la línea de dislocación. El plano ABCD será el plano de deslizamiento. Aquí también vemos que bajo la acción de un esfuerzo, la línea de dislocación se ha movido y que la parte superior del cristal ha sido deslizado una distancia atómica respecto a la parte inferior.

Se le denomina dislocación de tornillo por el hecho de que los átomos o planos cristalinos forman una hélice alrededor de la línea de dislocación.

Existen también dos casos de dislocación de tornillo: de hélice izquierda o de hélice derecha, dependiendo de como se enrosca la hélice alrededor de la línea de dislocación. Los signos con que se representan son: 

DISLOCACIONES MIXTAS

Es una condición en el tratamiento de dislocación que estas no pueden terminar dentro del cristal, por lo tanto estas deben terminar en alguna superficie o formar circuitos cerrados dentro del cristal.

De esta manera vamos a encontrar que en un circuito, una dislocación puede tener en cierto tramo una orientación de borde y en otro tramo una orientación de tornillo. Esto se muestra en la fig 4.

De esta manera encontramos que una línea de dislocación no tiene que ser completamente pura de tornillo o de borde sino que puede tener orientaciones intermedias entre las dos. Esto significa que la línea no tiene que ser recta sino que puede ser curva.

Encontramos así que las dislocaciones pueden ser mixtas. Esto se definirá después de hablar del vector de Burgers.

EL VECTOR DE BURGERS

Cuando tenemos un bucle de dislocaciones o una línea cerrada de dislocaciones, encontramos que se pueden describir estas dislocaciones en términos de dos vectores; un vector unitario t que es siempre paralelo a la línea de dislocación y además continuo y su sentido es arbitrario. El segundo vector será el llamado vector de Burgers, b , que nos indica la magnitud y la dirección del corrimiento de la red encima del plano de deslizamiento respecto a la parte inferior de la red. El vector de Burgers se mantiene idéntico a todo lo largo del bucle de dislocación mientras que el vector t si cambia constantemente de dirección.

Para determinar el vector de Burgers de una dislocación, se toma una red perfecta y se traza un circuito uniendo los átomos con líneas imaginarias; enseguida se toma la misma red, pero introduciendo ahora una dislocación se traza el mismo circuito. Se verá que en el caso de la red imperfecta, faltará siempre un vector para cerrar el mismo circuito y este será el vector de Burgers.

De esta manera, conociendo lo que son los vectores \vec{b} y \vec{t} , se pueden definir también las clases de dislocaciones. Una dislocación es de borde cuando el vector de Burgers b es perpendicular a la línea de dislocación o sea a \vec{t} ; y de tornillo será cuando b sea paralela a \vec{t} ; en una dislocación mixta el vector de Burgers y el vector t forman un ángulo que queda entre 0° y 90° .

DESPLAZAMIENTO DE DISLOCACIONES

En la fig 5 se muestra el desplazamiento de las dislocaciones bajo un esfuerzo cortante. Es posible ver que una dislocación de borde positiva, L , se mueve hacia la izquierda, cuando la mitad superior del cristal se corre hacia la izquierda. La de borde negativa, T , se desliza hacia la derecha, pero el corrimiento del cristal es el mismo que en el caso de la positiva.

Por otro lado, la dislocación de tornillo de mano izquierda se mueve del frente hacia el fondo y la de mano derecha lo hará en sentido inverso.

Cualquiera que sea el tipo o signo de la dislocación, el corrimiento que se produce en el cristal será siempre el mismo.

El plano de desplazamiento de una dislocación se define como el plano que contiene tanto a la dislocación así como a su vector de Burgers.

Para el caso de una dislocación de tornillo en el que el vector de Burgers es siempre paralelo a la dislocación, cualquier plano que contenga a la dislocación será también el plano de desplazamiento.

El vector de Burgers de una dislocación de borde es perpendicular a ella y por lo tanto hay un solo plano posible de desplazamiento.

Es por ello que una dislocación de tornillo se puede deslizar en cualquier dirección perpendicular a ella misma, pero una dislocación de borde solo puede deslizarse en un plano único.

SALTO DE DISLOCACIONES

Existe otro mecanismo diferente al desliza- miento mediante el cual una dislocación de borde po- dría moverse y es el llamado mecanismo de salto.

En la fig 6 vemos la representación del salto de una dislocación de borde. Para que el salto suceda, una vacancia debe de estar en posición vecina - al átomo del fondo del plano extra, de tal manera que este átomo pueda intercambiar de lugar con la vacancia y de esta manera, la hilera de átomos extra disminuyen un átomo y la dislocación habrá saltado de un plano inferior a uno inmediatamente encima de él. Esto es un caso de salto positivo en el cual el plano extra disminuye de tamaño; el caso contrario puede realizarse si un átomo de la red normal se une al plano extra, dejando una vacancia; en este último caso tendremos un salto negativo.

DISLOCACIONES PARCIALES

Para facilitar la descripción del vector de Burgers, en un cristal real, se acostumbra a describirlo mediante los índices de Miller de la dirección del vector de Burgers y se multiplica por una fracción que nos indicará la magnitud de cada componente de la dirección.

Por ejemplo en una estructura FCC, si tenemos una dislocación con un vector de Burgers paralelo a la dirección de mayor compactación de átomos o sea la $[101]$, entonces definimos el vector de Burgers como el $1/2[101]$, los índices dándonos la dirección y multiplicado por un medio, porque a esta distancia se encuentra el átomo más cercano.

Ahora bien, con una dislocación de este tipo en una estructura CCC, para mover la dislocación en una distancia atómica o un vector de Burgers, un átomo tendría que saltar por encima de otro, lo cual no es muy energéticamente favorable. Ver fig 7. De esta manera, será mucho más fácil hacer el salto en dos mo

vimientos, pasando primero el átomo al valle vecino y después a la posición final.

Así, el vector de Burgers se nos ha descompuesto en otros dos pequeños vectores que en el caso de la estructura CCC se encuentra que son: $1/6 [21\bar{1}]$ y $1/6 [12\bar{1}]$. La suma vectorial será: $1/2 [110] = 1/6 [21\bar{1}] + 1/6 [12\bar{1}]$.

A este tipo de descomposición de una dislocación en otras dos, se le llama dislocaciones parciales.

TRABAJO PRACTICO

Haciendo uso de esferas rígidas y de el material adecuado, construya:

- A) Un modelo de dislocación de borde y otro de tronillo.
- B) Un modelo de cristal en el cual haya habido un deslizamiento de dislocaciones.
- C) Construya circuitos alrededor de las líneas de dislocaciones y determine el vector de Burgers.
- D) Construya planos compactos del CCC con una dislocación de borde y usando esferas rígidas estudie el movimiento de dislocaciones parciales.
- E) Usando modelo de burbujas observe el movimiento de dislocaciones.

IMPERFECCIONES DE SUPERFICIE

En un cristal perfecto, los átomos ocupan ciertas posiciones de la red y van formando planos cristalinos con una cierta orientación y secuencia de apilamiento. Cuando por alguna causa se tenga una alteración en el orden de secuencia o en la orientación, ello dará como resultado una imperfección de superficie.

LIMITES DE GRANO

En un monocristal, las celdas elementales de la red cristalina se van apilando con una cierta orientación espacial que es la misma para todo el cristal. Pero durante el crecimiento del cristal puede suceder que otra zona con orientación muy diferente a la primera empiece a crecer al lado de la otra. Tendremos así un bicristal o si las zonas de diferente orientación son varias, tendremos un policristal. La zona que separa a las dos partes con diferente orientación se conoce como límite de grano.

Los átomos que se encuentran en el límite de grano no tienen el mismo número de átomos vecinos que el átomo normal en el interior del grano y resulta así que tendremos una región en la cual el empaquetamiento atómico no es perfecto.

En una red tridimensional esta zona de transición de una orientación hacia la vecina debe ser una superficie y por ello un límite de grano se clasifica dentro de estas imperfecciones superficiales.

LIMITES DE MACLA

Dentro de un mismo grano o cristal puede suceder que haya una zona con diferente orientación a la orientación general del grano; si esta orientación diferente es un reflejo, especular de la orientación de la matriz, se le denomina macla. La región que separa la matriz y la macla será una superficie que se denomina límite de macla. Las maclas pueden originarse ya sea durante el crecimiento del cristal o por de formación del mismo.

En la fig 8 se ve un modelo bidimensional de formación de macla por deformación en una red tetragonal.

ERRORES DE APILAMIENTO

Cuando realizamos la práctica de estructuras cristalinas vimos que una estructura CCC tiene una secuencia de planos ABCABC... por lo que los átomos se acomodan en tres posiciones diferentes; y que el sistema HC tiene un apilamiento ABABAB... Puede suceder que en un apilamiento CC haya 2 o 3 planos que vayan a posiciones equivocadas y la nueva secuencia será: ABCABABC... y como resultado tendremos una capa delgadísima de estructura HC incluida en una CCC. A esto se le llama una falla de apilamiento.

Tales defectos se originan durante el crecimiento del cristal o por la separación de dos dislocaciones parciales.

SUBLIMITES DE GRANO

Si la diferencia de orientación entre dos granos no es muy grande sino que es una diferencia en orientación angular de solo unos cuantos grados, se dice que se tiene un sublímite de grano o un límite de ángulo pequeño.

El modelo que se da para explicar estos límites está basado en la ordenación de dislocaciones de borde, yacentes una sobre la otra a lo largo del límite y entonces tendremos un límite de flexión. Si las dislocaciones son de tornillo, paralelas y yacentes en el límite de pequeño ángulo, se tendrá un límite de torsión.

TRABAJO PRACTICO

Usando esferas rígidas simule:

- A) Un límite de grano.
- B) Un límite de macla.
- C) Un error de apilamiento en el sistema CCC
- D) Un límite de grano de ángulo pequeño.

PROBLEMAS

1.- Defínase que es un sólido. El vidrio no se considera un sólido verdadero ¿por qué?

2.- La ecuación para la fracción de sitios atómicos en equilibrio que están vacantes es:

$$N = e^{-H/RT}$$

donde: H = calor molar de reacción que acompaña la formación de vacancias.

R = contenido de gas

T = temperatura absoluta en °K

usando H = 20 000 cal/mol para aluminio

y R = 2 cal/mol-grado

calcúlese la fracción de sitios reticulares que están vacantes a 300, 500, 1 000 y 1 300 °K.

3.- Cuando los átomos sustitucionales no ocupan posiciones al azar en una estructura cristalina, resulta una estructura ordenada. Por ejemplo, aun cuando el Cu y la Ag muestran solubilidad total a temperaturas elevadas, a inferiores se produce ordenamiento a las concentraciones de 25 % atómico de Au y de 50 % atómico de Au. Dibuje una celda unitaria CCC e indique los sitios más probables para los átomos de Au en la aleación Cu₃Au. Haga lo mismo para la estructura ordenada con 50% atómico de Au. ¿Qué estructura tiene más imperfecciones puntuales, la ordenada o la desordenada?

4.- Calcule el máximo diámetro que puede tener un átomo intersticial en un cristal de cobre, sin distorcionarlo. La longitud de la arista de la celda unitaria CCC del Cu es 3.61 Å.

5.- Calcular el radio del átomo más grande que puede existir en los intersticios del hierro de

-CCAC, sin amontonamiento.

6.- a) ¿Cuál es la longitud en el vector de Burger en la dirección 112 del hierro?

b) ¿Para el níquel?

BIBLIOGRAFIA

- ESTRUCTURA. Ciencia de los materiales, Vol I
W. G. Moffatt, G.W. Pearsall and J. Wulff.
Physical Metallurgy Principles. R. E. Reed-
-Hill.
Introduction to Solid State Physics. Ch. Kittel
Introducción a la Metalurgia Física. Sidney
H. Avner.
Materiales Para Ingeniería. Lawrence H. Van
Vlack.

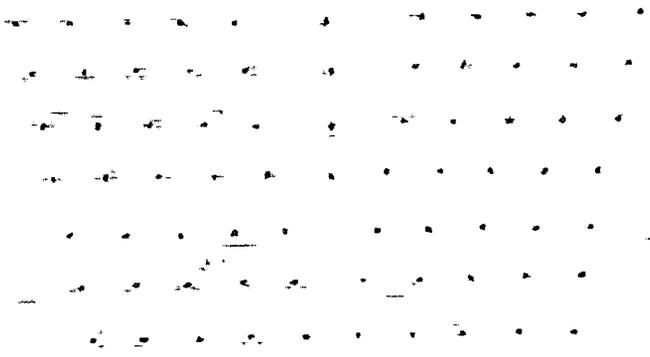
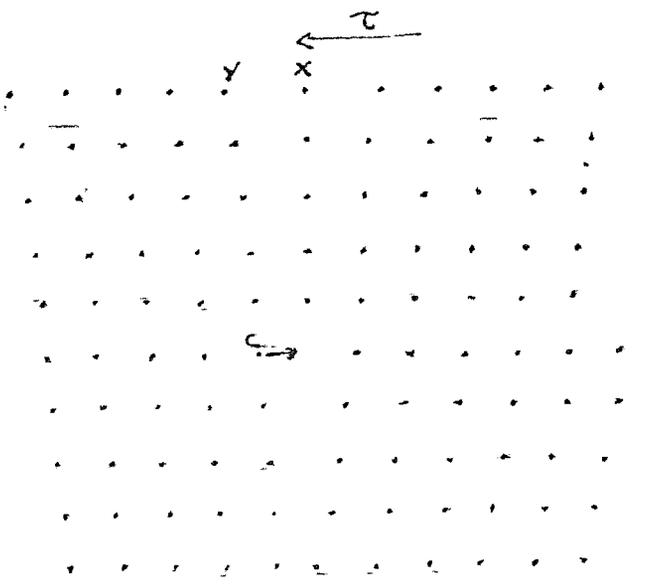
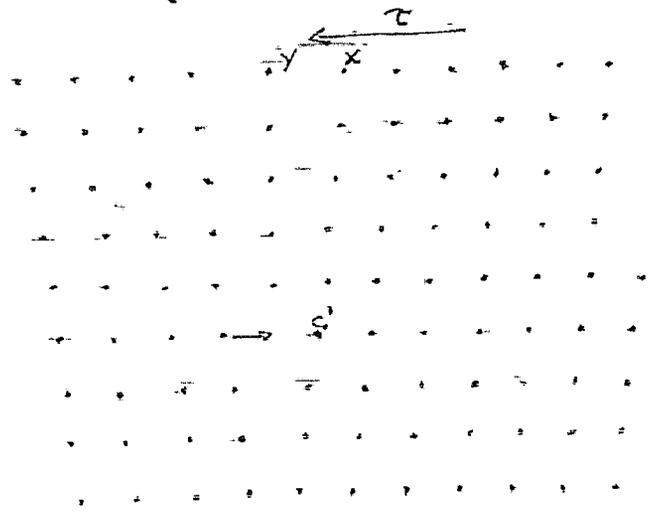


Fig 1



(A)



(B)

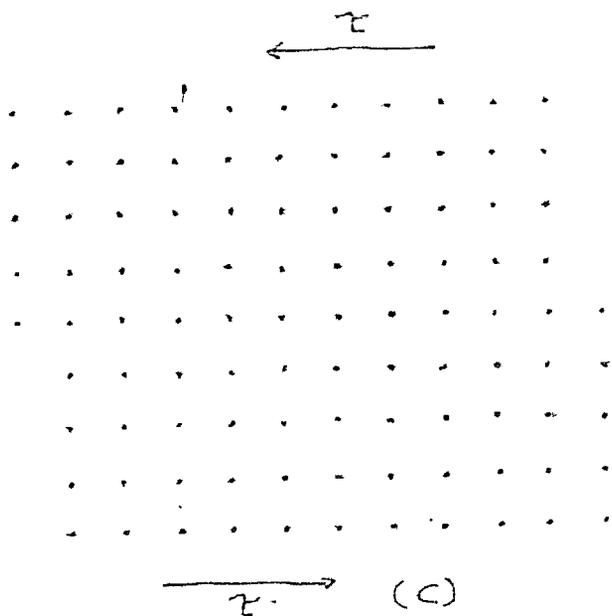
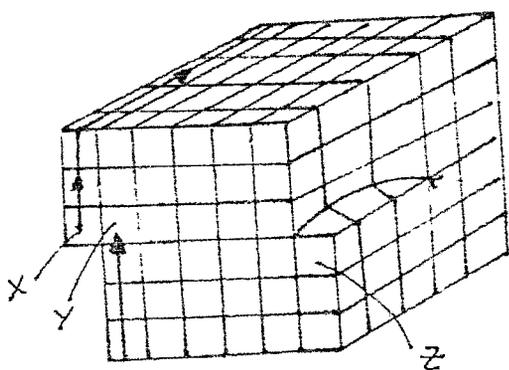
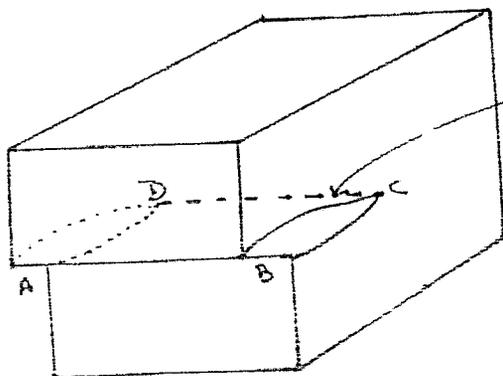


FIG. 2.



Dislocación
Helicoidal

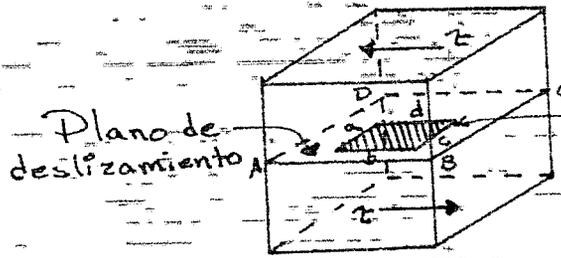
(A)



Dislocación
Helicoidal

(B)

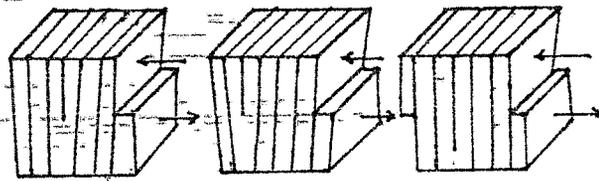
FIG. 3



Esta área cortada por ϕ .

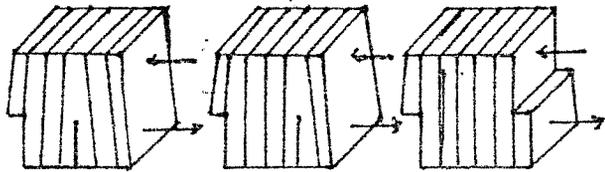
- A - Dislocación de borde Positiva
- B - Dislocación Helicoidal derecha
- C - Dislocación de Borde Negativa
- D - Dislocación Helicoidal izquierda

FIG 4



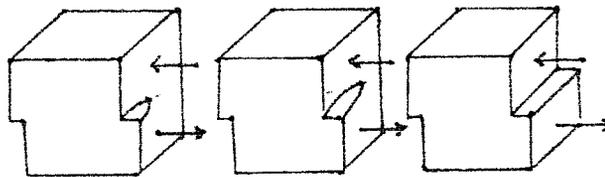
Borde Positivo

(A)



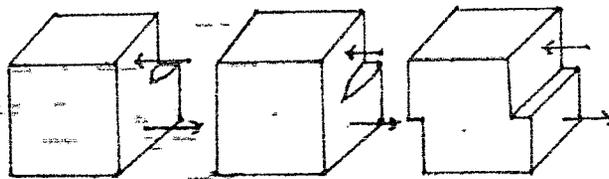
Borde Negativo

(B)



Helicoidal a la izquierda

(C)



Helicoidal a la derecha.

(D)

FIG 5

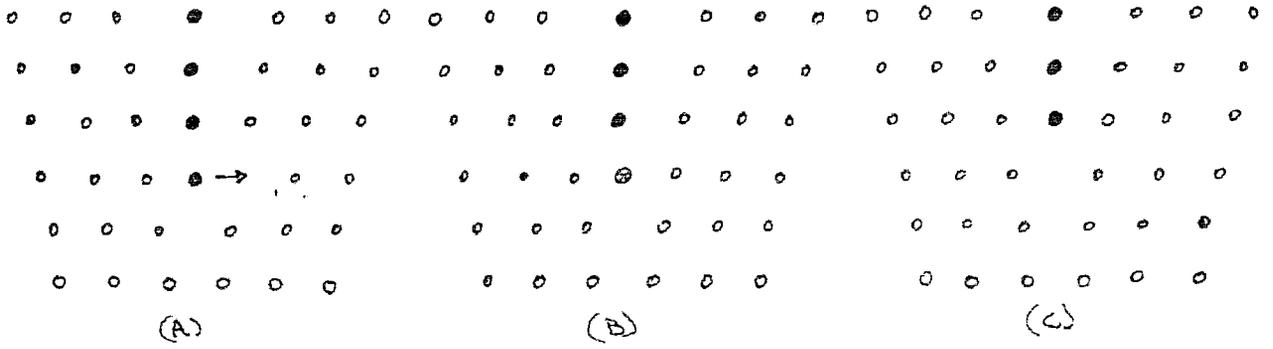


FIG. 6

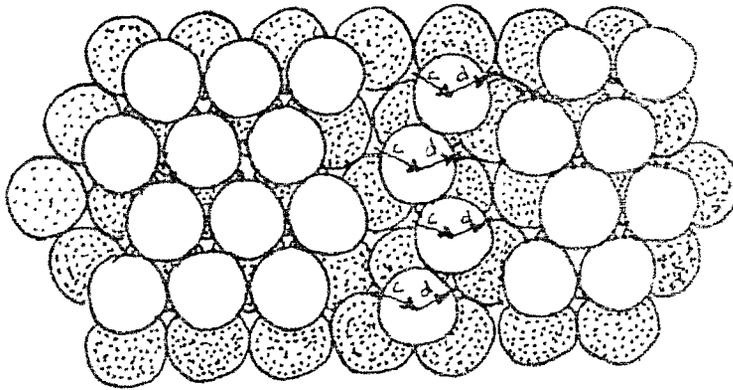


FIG. 7

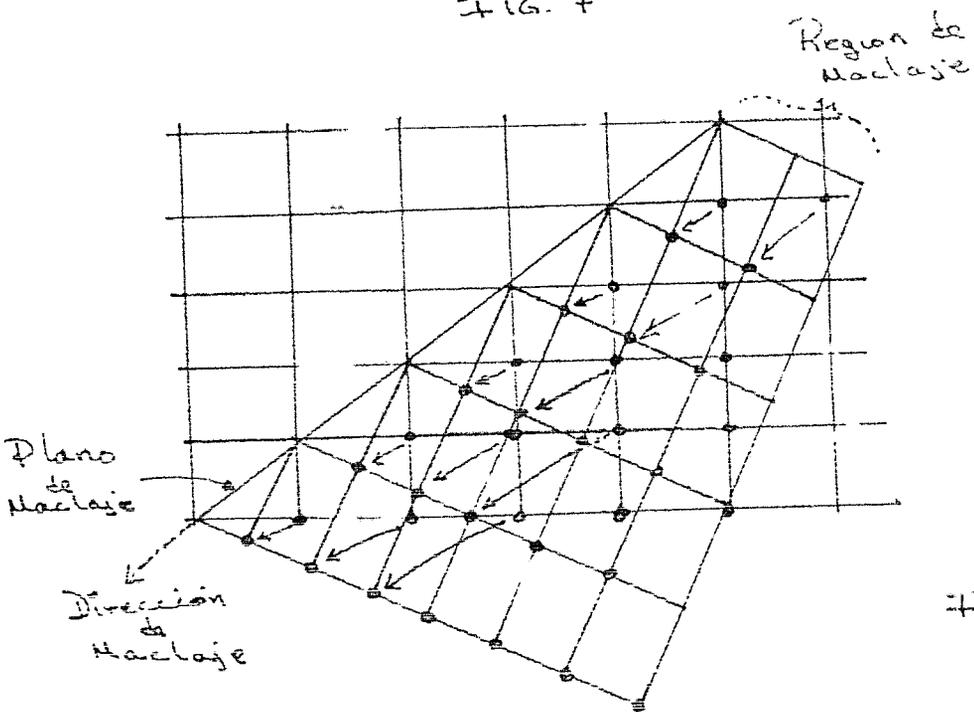


FIG. 8

PRACTICA # 4

INDICES DE MILLER Y NOCIONES DE CRISTALOGRAFIA

Ya hemos visto en la práctica anterior que un ^{*} cristal se define como un sólido en el cuál los átomos se ordenan en ciertas posiciones y siguiendo un motivo que se repite periódicamente en las tres direcciones. Los sólidos amorfos no poseen este ordenamiento regular. ^{*}

Supongamos que se tiene un motivo que se repite periódicamente en dos dimensiones p r ejemplo en un papel para tapizar en el cuál un cierto dibujo o motivo se repite lo mismo tanto a lo largo como a lo ancho. Para pasar de un dibujito a su vecino, deberá hacerse una translación \vec{a} que puede ser paralelo a su largura o bien por una translación \vec{b} que puede ser paralelo a su anchura. Cualquier otro motivo podrá ser alcanzado a partir del origen mediante una translación $u\vec{a} + v\vec{b}$, en donde u y v son enteros cualesquiera.

Un cristal será periódico en tres dimensiones. El externo deberá ser el mismo para todos los puntos, de tal manera que todos los sitios sean correspondientes o sea que alrededor de cada átomo se debe encontrar el mismo número de átomos, a la misma distancia y en la misma dirección que en cualquier otro átomo. Tales puntos quedarán definidos por translaciones como $u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$. El conjunto de todos los puntos forma una red que se construye sobre los vectores no coplanares \vec{a} , \vec{b} y \vec{c} .

Si se toma como origen uno de los puntos de la red como ejes de coordenadas los 3 vectores \vec{a} , \vec{b} y \vec{c} , un punto cualquiera de la red, donde las tres coordenadas sean $u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}$, se llamará, "Nudo de la Red". Las líneas que unen a los puntos de la red la dividen

en paralelepíedros que serán las Celdas Elementales.

La repetición de la Celda Elemental engendra la estructura del cristal.

Ya hemos visto que a cada punto de la red o a cada celda elemental puede corresponder un sólo átomo o un grupo de átomos; ya sea uno u otro caso, la condición que debe llevar la red es que la orientación y el orden de los átomos debe ser el mismo para cada nudo de la red o para cada celda elemental.

No se debe confundir el concepto de nudo de la red con el de posición atómica; por ejemplo en los elementos metálicos, en las cuales todos los átomos son idénticos, generalmente existe un átomo por nudo, y en este caso es muy fácil confundir nudo de red con posición atómica.

En la práctica No 2 se ha hablado de las estructuras cristalinas.

SIMETRÍA CRISTALINA

Normalmente se encuentra que la densidad de puntos de la red no es la misma en todas las direcciones, con lo cual tenemos un caso de anisotropía geométrica. Las propiedades del cristal van a variar según la dirección en que se midan. Sin embargo, en un cristal se encuentran direcciones para las cuales las propiedades y el arreglo geométrico son idénticos. El que existan estas direcciones equivalentes indica que existe una simetría en el cristal que debe ser idéntica a la simetría que se encontraría en la celda elemental. Por consiguiente todas las propiedades serán gobernadas por las mismas consideraciones de simetría.

La simetría de un cuerpo se puede definir en base de propiedades geométricas que permitan llevar en el cuerpo en coincidencia consigo mismo (posicio -

nes idénticas) o sea que lo conduzcan a posiciones equivalentes a aquella de que se partió. Las operaciones de simetría estarán ligadas a los conceptos de línea, plano y punto.

A) EJES DE ROTACION

Un eje de rotación de orden n indica que el cuerpo alcanza una posición equivalente después de una rotación de $2\pi/n$. Por ejemplo ejes de rotación binarios, ternarios, cuaternarios y senarios.

B) PLANOS DE SIMETRIA

En este caso, el orden o motivo de un lado del cristal es la reflexión de la parte vecina, tomándose como espejo un plano que corte al centro del cristal.

C) CENTRO DE SIMETRIA

Cada punto del cristal está relacionado a otro punto tal que el centro del cristal sea la mitad del segmento que une a los dos puntos. *

Al combinar todos los elementos de simetría macroscópica, se ha visto que es posible distinguir 32 clases de simetría o grupos puntuales.

Se debe tomar en cuenta que un movimiento de translación se puede considerar como el elemento de simetría fundamental sobre el cuál se construye el cristal y todos los cristales deberán por lo tanto, poseer este elemento de simetría. Este movimiento será un elemento de simetría microscópica ya que una translación se puede hacer a la escala atómica.

Si se combinan las operaciones microscópicas y macroscópicas se encuentra que hay 230 operaciones de simetrías.

Como ejemplo tomaremos algunas operaciones de simetría en el sistema cúbico, por ser el sistema más común en el cual cristalizan una gran parte de

los metales. En el sistema cúbico, existen diferentes ejes de rotación por ejemplo:

A) El eje que une los centros de dos caras opuestas. Las posiciones equivalentes se encontrarán a 90° y el eje será entonces un eje cuaternario, que en general se denomina como un eje A_4 . Existen tres ejes cuaternarios en este sistema ($3A_4$).

B) Rotación alrededor de una de las diagonales del cubo. Las posiciones equivalentes se denominan ejes binarios y existen 6 de ellos.

El cubo posee evidentemente un centro de simetría C y es posible demostrar en cristalografía que un eje de simetría de orden par es equivalente a la existencia de un plano de simetría (espejo) que pasa por el centro y que es perpendicular al eje.

Habrán por lo tanto 3 espejos correspondientes a los tres ejes A_4 y 6 espejos correspondientes a los $3A_2$.

IDENTIFICACION DE LOS PLANOS Y DIRECCIONES EN UN CRISTAL.

Cuando quiera que se hace un estudio de las diferentes estructuras cristalinas, es necesario siempre referirse a los diferentes planos y direcciones, por lo cual es muy conveniente el poder distinguirlos unos de otros.

IDENTIFICACION DE PLANOS

El método que se acepta en todos los países para identificación de planos son los llamados índices de Miller. A fin de explicar como se obtienen dichos índices, es mucho más fácil un ejemplo.

Supongamos que tenemos un sistema de 3 ejes X, Y y Z, los cuales son paralelos a 3 aristas de alguna celda elemental de una de las estructuras crista

linas. Dividimos estos ejes en segmentos cuya longitud es igual a la arista o parámetro de red de la celda. Fig 1. *

Por ejemplo tenemos que la longitud de las aristas en cierto sistema son a , b , y c , entonces podemos graduar los ejes usando estas cantidades como unidad. Si escogemos un plano que corte a los ejes en P , Q y R tendremos que:

$$\frac{OP}{a} = \frac{2a}{a} = 2 \quad \frac{OQ}{b} = \frac{2b}{b} = 2 \quad \text{y} \quad \frac{OR}{c} = \frac{3c}{c} = 3$$

De acuerdo con el sistema de Miller el plano quedará definido, por la inversa de sus intersecciones con los tres ejes.

Es posible admitir que en los planos cristalográficos principales, los valores recíprocos de las intersecciones son fracciones racionales que tienen un mínimo común denominador (Ley de los índices racionales).

Entonces podríamos escribir los valores recíprocos bajo la forma: $\frac{h}{P}$, $\frac{k}{P}$ y $\frac{l}{P}$ donde P es el denominador común y h , k y l , son los números enteros. Los tres números enteros h , k y l definen entonces a un plano que se denotará (h, k, l) . A estos números se denominan índices de Miller de un plano.

En el ejemplo escogido, se tiene que el plano corta al eje X en 2; 2 sobre el eje Y y 3 sobre el eje Z . Las inversas son $1/2$, $1/2$ y $1/3$ y el denominador común es 6. De ahí se deduce:

$$h = 6 \times \frac{1}{2} = 3 \quad k = 6 \times \frac{1}{2} = 3 \quad l = 6 \times \frac{1}{3} = 2$$

y el plano será el (332)

En el sistema cúbico los ejes se construyen sobre la red cúbica. Por ejemplo algunos de los pla -

Los principales del sistema cúbico son (100) , (110) , (111) y (112) . Fig 2

Un plano que sea paralelo a un eje cortará a este en el infinito y por consecuencia su índice será cero. Si un plano corta a uno o varios ejes en la parte negativa, para indicar que el índice es negativo se dibujará una barrita encima del número. Por ejemplo $(\bar{h}\bar{k}\bar{l})$ cuando el corte es en el lado negativo de Y.

La notación $(h k l)$ se utiliza para designar todos los planos paralelos a un plano particular, el cual sirve como referencia. Cuando queremos referirnos a todos los planos de un mismo tipo, por ejemplo a todos los planos octaédricos del tipo (111) , encerraremos los índices entre llaves $\{111\}$ y esto nos indica que nos estamos refiriendo a los planos (111) , $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, $(1\bar{1}\bar{1})$, $(\bar{1}1\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(1\bar{1}1)$ y $(\bar{1}11)$.

INDICES DE UNA DIRECCION

Los índices para direcciones se determinan de manera diferente. Consideramos un punto de la red situado en el origen de coordenadas y transportémoslo en una dirección mediante translaciones paralelas a los tres ejes. Supongamos que el desplazamiento es equivalente a la suma de tres translaciones: una translación $\vec{u}\vec{a}$ a lo largo del eje X, una translación $\vec{v}\vec{b}$ a lo largo del eje Y y una translación $\vec{w}\vec{c}$ a lo largo del eje Z. Si u , v y w son los tres enteros más pequeños que nos pueden dar el desplazamiento buscado, estos serán los índices de la dirección buscada. Estos índices se encierran en paréntesis cuadrados $[u v w]$. Por ejemplo si tenemos translaciones: $X = 3a$, $Y = 2b$, $Z = c$, luego los índices serán $[3 2 1]$ si $a=b=c$.

Para el eje X se tienen los índices $[100]$,

para Y [010] y para Z [001].

Una diagonal de la cara xy será [110] y una diagonal de la celda cúbica será [111].

El conjunto de direcciones equivalentes se encerrará entre paréntesis quebrado $\langle uvw \rangle$.

Se debe hacer notar que para encontrar los índices de una dirección, no se usan los números inversos y también que es incorrecto decir que una dirección es perpendicular a un plano que tenga sus mismos índices. Esto último no es cierto más que en el sistema cúbico.

Es posible calcular la distancia entre dos puntos de una red. Por ejemplo si a partir de un origen tenemos una translación $\vec{ON} = p\vec{a} + q\vec{b} + r\vec{c}$, si calculamos:

$$\vec{ON} \cdot \vec{ON} = |\vec{ON}| \cdot |\vec{ON}| \cdot \cos \alpha = |\vec{ON}|^2$$

de donde:

$$|\vec{ON}| = \sqrt{\vec{ON} \cdot \vec{ON}} = \sqrt{(p\vec{a} + q\vec{b} + r\vec{c}) \cdot (p\vec{a} + q\vec{b} + r\vec{c})}$$

y por consiguiente:

$$|\vec{ON}| = \sqrt{2p^2a^2 + 2 \sum p \cdot q \cdot a \cdot b \cos(\vec{a} \cdot \vec{b})}$$

En el caso del sistema cúbico esta expresión se reduce a:

$$|\vec{ON}| = \sqrt{p^2 + q^2 + r^2}$$

También se puede evaluar el ángulo entre dos direcciones. Si las direcciones están definidas por:

$$\vec{OP} = p\vec{a} + q\vec{b} + r\vec{c}$$

$$\text{y } \vec{ON} = p'\vec{a} + q'\vec{b} + r'\vec{c}$$

$$\vec{OP} \cdot \vec{ON} = |\vec{OP}| |\vec{ON}| \cos \alpha$$

de donde:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{OP} \cdot \vec{ON}}{|\vec{OP}| \cdot |\vec{ON}|} = \frac{\sum p p' a^2 + \sum (p q' + q p') a b \cos(\vec{a} \cdot \vec{b})}{\sqrt{\sum p^2 a^2 + 2 \sum p q a b \cos(\vec{a} \cdot \vec{b})} \sqrt{\sum p'^2 a^2 + 2 \sum p' q' a b \cos(\vec{a} \cdot \vec{b})}}$$

Para el sistema cúbico:

$$\cos \alpha = \frac{pp' + qq' + rr'}{\sqrt{p^2 + q^2 + r^2} \sqrt{p'^2 + q'^2 + r'^2}}$$

Las direcciones $[pqr]$ y $[p'q'r']$ serán perpendiculares si:

$$pp' + qq' + rr' = 0$$

La última fórmula es análoga a aquella que da el ángulo entre dos planos cristalinos (h, k, l) (h_2, k_2, l_2) en el sistema cúbico. En este caso se tendrá:

$$\cos \phi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}}$$

Veamos el cálculo de la distancia entre dos planos. Supongamos que la distancia entre dos planos $d = OH$ es la distancia del plano (hkl) a un plano paralelo pasando por el origen. Si a , b y c son los vectores unitarios tendremos al aplicar las consideraciones geométricas que en el caso de coordenadas rectangulares:

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

y en el caso del sistema cúbico se reduce a:

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

para el sistema hexagonal:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{h^2 + k^2 + hk}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

INDICES EN EL SISTEMA HEXAGONAL

Normalmente en este sistema se utilizan 4 índices para definir un plano o una dirección. De acuerdo con la figura 3 estos índices serán definidos por las intersecciones en los ejes: a_1 , a_2 , a_3 y C . En ge

neral estos índices se conocen como de Miller-Bravais. Estos índices son del tipo $(hkil)$, sin embargo existe una relación: $i = -(h + k)$ o sea que el tercer índice queda completamente determinado por los dos primeros. Es una manera muy normal el escribir un punto en lugar del tercer índice $(hk.l)$. De esta manera, los planos equivalentes se explican mediante permutaciones en la posición y signo de tres índices.

Ejemplo, las caras prismáticas del tipo I tienen los índices: $(\bar{1}\bar{1}00)$, $(\bar{1}100)$, $(10\bar{1}0)$, $(\bar{1}010)$, $(0\bar{1}10)$, $(01\bar{1}0)$. Los planos prismáticos del tipo II tendrán los índices $(11\bar{2}0)$. Fig 3

Los índices de las direcciones representan las translaciones paralelas a los cuatro ejes que den por adición, un desplazamiento en la dirección de que se trate. Se reducen estas translaciones a los enteros más pequeños y el tercero será la suma de los dos primeros cambiado de signo. Como podemos ver de la fig 4, las direcciones en el sistema hexagonal se pueden expresar por dos clases de índices y ambos serán equivalentes. Las direcciones son aquí mejor expresadas con tres índices $(a_1 a_2 C)$; en el caso de 4 índices, se rompe la dirección requerida en 4 vectores paralelos $a_1 a_2 a_3$ y C y se escogen de tal manera que el tercer índice es el negativo de la suma de los dos primeros

PROBLEMAS

PROBLEMA 1. Demuestre que con los planos de empaquetamiento compacto $\{111\}$ de la red CCC, es posible formar tanto un tetraedro como un octaedro.

PROBLEMA 2. Dibuje la posición espacial de las direcciones cúbicas: $[113]$, $[123]$ y $[403]$.

PROBLEMA 3. Dar los índices de todas las direcciones $\langle 112 \rangle$ en un cristal cúbico.

PROBLEMA 4. Dibujar la posición en el espacio de los siguientes planos cúbicos: (112) , $(11\bar{2})$ y $(20\bar{3})$.

PROBLEMA 5. ¿Cuántos planos $\{123\}$ existen? Dar sus índices.

PROBLEMA 6. De acuerdo con la fig 4 el eje a de la estructura hexagonal tiene índices $[2\bar{1}\bar{1}0]$. Determine los índices de todas las direcciones de empaquetamiento compacto, o sea, $-a_1$, a_2 , $-a_2$, a_3 y $-a_3$.

PROBLEMA 7. Determinar los índices de todas las seis caras verticales de la celda unitaria hexagonal. Fig 3.

PROBLEMA 8. Dibuje los planos $(10\bar{1}0)$ y $(10\bar{1}3)$ en una celda unitaria hexagonal. Fig 3.

PROBLEMA 9. Dibuje los planos $(11\bar{2}0)$ y $(11\bar{2}1)$ en una celda unitaria hexagonal. Fig 3.

PROBLEMA 10. Calcule la relación teórica c/a para el apilamiento hexagonal compacto. Para poder establecer una comparación se señalan a continuación los valores medidos para algunos de los metales hexagonales más comunes: Be: 1.58, Cd: 1.89, Mg: 1.62, Ti: 1.60, Zn: 1.85, Zr: 1.60. Ver la fig III.3 (Estructura. Ciencia de los materiales, Vol I, Cap 3) para las dimensiones de c y de a de la celda unitaria hexagonal.

PROBLEMA 11. Determine los índices de Miller de la familia de planos compactos en un cristal cúbico de caras centradas. Determine los índices de Miller de la familia de direcciones compactas en un cristal cúbico de caras centradas. Determine los índices de Miller de la familia de direcciones compactas en un cristal cúbico centrado en el cuerpo.

PROBLEMA 12. Dibuje los siguientes planos y direcciones en celdas unitarias cúbicas: (123), 123, (112), 112, (110), 110, Demuestre que cada uno de dichos planos contiene la dirección 111.

PROBLEMA 13. a) Dibuje un plano (111) en una celda unitaria tetragonal.

b) Dibuje un plano (110) en una celda unitaria ortorrómbica.

c) Dibuje un plano (100) en una celda unitaria monoclinica.

PROBLEMA 14. Considerando los átomos como esferas duras en contacto, calcular:

a) El volumen de la celda cúbica unitaria en términos de un diámetro atómico D ,

b) El número de átomos por celda unitaria,

c) La densidad en términos del número de átomos/ D^3 ,

para los empaquetamientos cúbicos de caras centradas, cúbico centrado y cúbico simple.

BIBLIOGRAFIA

Principios de Metalurgia Física. R. E. Reed-Hill.

Elementos de Difracción de Rayos "X". E. D. Cullity.

Introduction to Solid State Physics. Ch. Kitell.

Estructura. Ciencia de los Materiales, Vol I, W. G. Moffatt, G. J. Pearsall and J. Wulff.

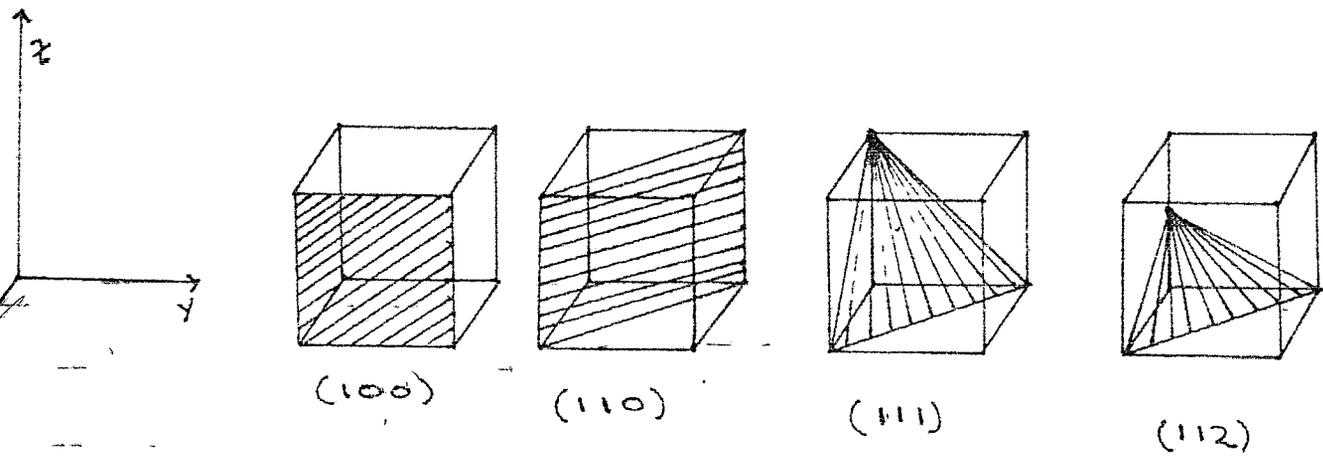
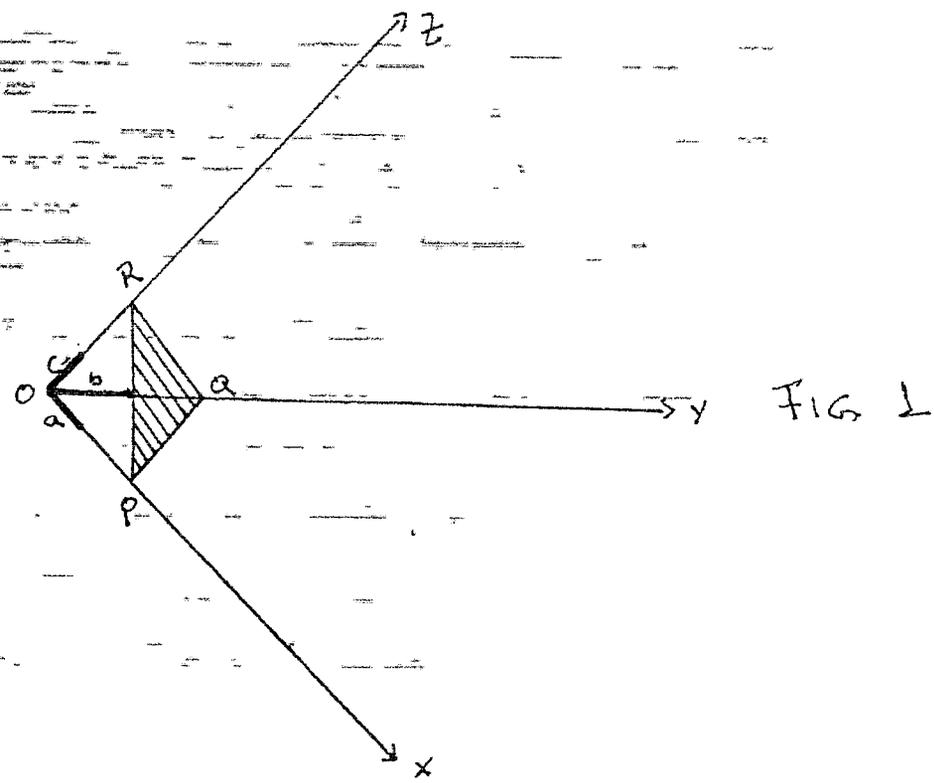


FIG. 2

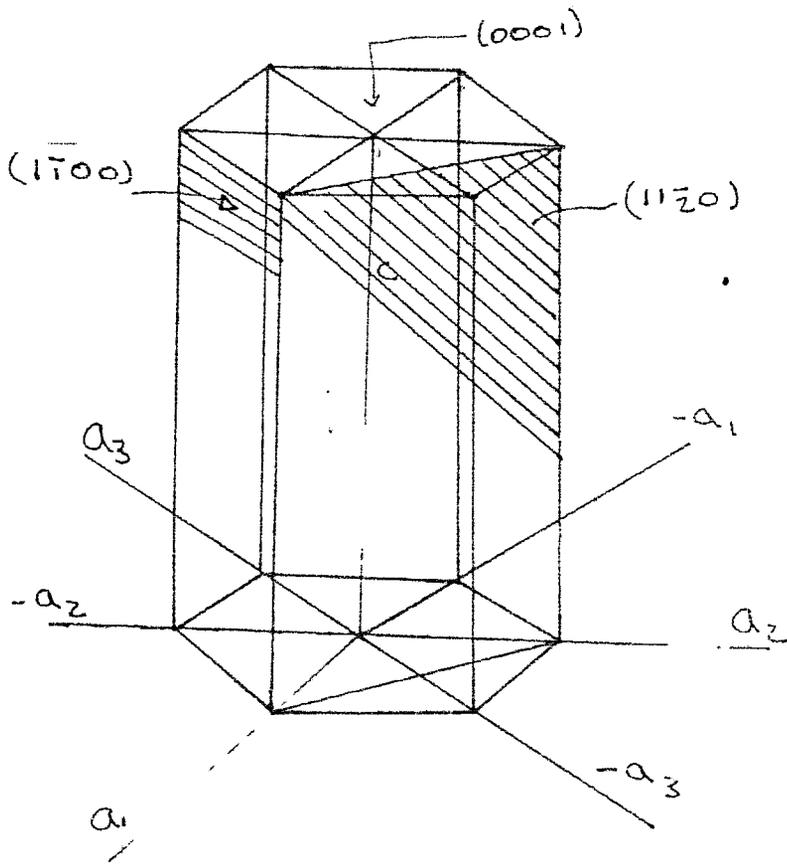


FIG 3

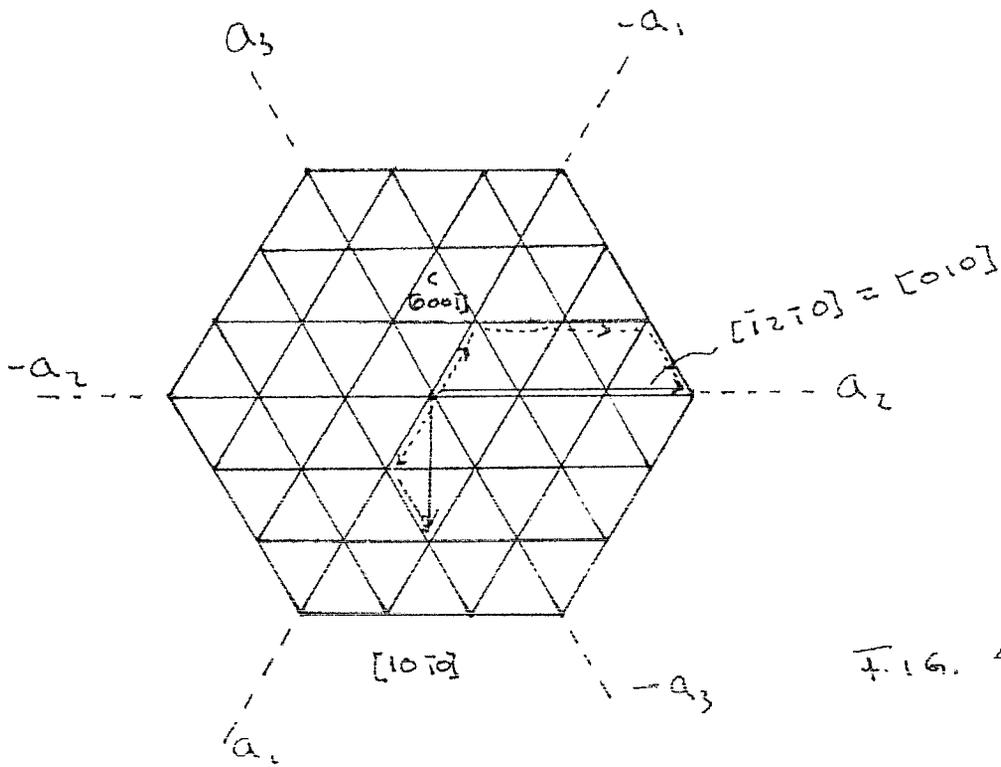


FIG. 4

PRACTICA # 5

MICROSCOPIA

Uno de los instrumentos más útiles en el estudio de los metales, desde el punto de vista de la metalografía, es el microscopio óptico. Con este instrumento es posible estudiar la microestructura de metales y aleaciones y relacionarla con las propiedades físicas y mecánicas de los mismos.

Algunas propiedades mecánicas tales como dureza, tenacidad, ductilidad, etc., se correlacionan constantemente con la microestructura. Las aleaciones y metales comerciales pueden contener anomalías que invariablemente se asocian a la microestructura. Por supuesto que el estudio de metales y aleaciones no se hace solamente con la microscopía, sino que ella es parte de un conjunto entre los que debemos incluir a las mediciones eléctricas, rayos X, etc.

El sistema óptico de un microscopio metalúrgico comprende 2 lentes compuestas, uno cercano al objeto a examinar (que se conoce como el objetivo) y el otro cercano al ojo del observador (el ocular). La distancia entre los lentes varía entre 15 y 25 cm. El objetivo produce una imagen real engrandecida de una pequeña área del objeto examinado. Si el examen es solo visual, el ocular se arregla de tal manera que se produzca un aumento en el tamaño de la imagen virtual la cual es producida por el objetivo.

Los metales son opacos bajo la luz ordinaria y por lo tanto deben examinarse con luz reflejada.

ILUMINACION

El objeto examinado debe estar perfectamente iluminado, pues de otra manera la imagen observada puede ser completamente errónea. En la mayoría de los

microscopios se pueden encontrar principalmente 2 sistemas de iluminación: el vertical y el oblicuo.

ILUMINACION OBLICUA

El haz de rayos luminosos se hace incidir sobre la superficie de la muestra desde una o varias direcciones a un ángulo menor de 90° . Como los rayos inciden sobre una superficie que ha sido perfectamente pulida a espejo, serán reflejados en una dirección igualmente inclinada a la normal y por tanto los rayos no regresan al objetivo y la superficie aparecerá negra. Como de todas formas pueden existir irregularidades en la superficie, estas si reflejan la luz en el objetivo y por lo tanto ellas aparecerán brillantes; o sea tendremos regiones brillantes en un campo oscuro.

La iluminación oblicua se puede obtener de diferentes maneras: si la observación se hace a muy bajos aumentos, se puede usar la luz del día o bien una lámpara cuya luz se enfoca sobre la superficie mediante un lente o enfocada sobre la muestra mediante un reflector parabólico que se adapta al objetivo.

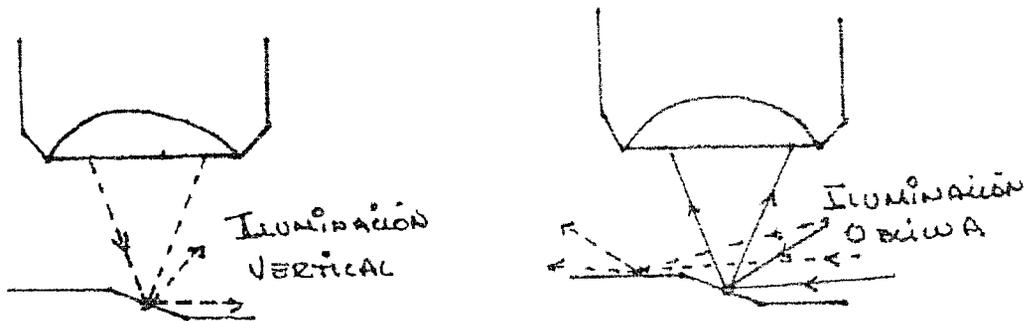
Si la observación se hace a aumentos altos se usaría un cono de luz hueco de gran ángulo que se enfoca sobre la muestra desde un reflector anular o un prisma anular que rodea al objetivo.

Generalmente a los objetivos que poseen la lente anular se les conoce como objetivos de Campo Oscuro. Este tipo de iluminación se usa generalmente para el estudio de irregularidades sobre la superficie o cuando se tiene una microestructura que no es muy contrastada.

ILUMINACION VERTICAL

En este caso, un cono de luz se hace incidir

perpendicularmente a la superficie de la muestra, las partes planas de la superficie reflejan la luz y entran en el objetivo nuevamente; sin embargo las irregularidades reflejan la luz fuera de la entrada del objetivo. De esta manera se produce un campo claramente iluminado con detalles oscuros. Es por ello que se le conoce como iluminación de Campo Claro.



El rayo de luz incidente y el rayo de luz reflejado van a recorrer el mismo camino a lo largo del eje óptico del microscopio. Esto es debido a que la distancia entre el objetivo y el objeto es más pequeña, sobre todo a altas magnificaciones y entonces no es posible meter un iluminador entre ellos, y la iluminación deberá meterse entonces entre el objetivo y el ocular, en una dirección normal al eje del tubo del microscopio. Una vez que la luz entra al microscopio es reflejada sobre la superficie de un prisma o espejo semirreflector o semitransparente y se hace de ahí incidir sobre la muestra. Fig 1.

El prisma reduce en parte la cantidad de rayos reflejados que entran al objetivo y por lo tanto la calidad de la imagen formada no es de lo mejor. Con el espejo se tienen muchos reflejos indeseables y por lo tanto se reduce el contraste de la imagen, pero si se usa un ajuste correcto del haz de luz y los objetivos adecuados, este defecto puede iluminarse: -

en general es preferible usar un espejo.

ILUMINACION CRITICA.

Las características mecánicas del objetivo nos fijarán sus constantes ópticas o sea su distancia focal y su apertura; los requerimientos de la formación de imágenes nos fijan a su vez la distancia entre objeto-objetivo.

Entonces la única variable que podemos controlar nosotros para mejorar la imagen será el rayo de luz que entra al tubo del microscopio. Por ello, a fin de tener una imagen clara y segura de la microestructura debemos tener lo que se llama Iluminación Crítica, o Iluminación Kohler.

Brevemente podríamos decir que la iluminación crítica significa la provisión de un cono de luz iluminante con el cual se hace uso eficiente de la apertura del objetivo; comprende también el centrado preciso de este cono de luz y la remoción de todos los rayos laterales que no toman parte en la formación de la imagen.

Para conseguir la iluminación crítica se consigue proyectando sobre el plano de la probeta la imagen del foco o de un foco secundario. De esta manera la lente posterior del objetivo queda bañada por la luz. En la práctica esto se consigue mediante condensadores y diafragmas tal como nos lo muestra la fig 2.

OBJETIVOS.

Este estará compuesto de varias lentes que se agrupan para formar un sistema óptico positivo y convergente. Si se coloca un objetivo a una distancia mayor que la distancia focal del objetivo, los lentes de este formarán una imagen primaria real que será mayor que el objeto y que quedará situada en la parte posterior del objetivo.

El tamaño y la distancia a que se forma la-

imágen primaria depende de la distancia objetivo-objeto y de la longitud focal del objeto.

En general, los objetivos se dividen en 4 grupos: acromáticos, semiapocromáticos, anocromáticos y monocromáticos. Esta clasificación se hace de acuerdo con el tipo y la cantidad de aberraciones que tengan las lentes del objetivo.

ABERRACIONES DE LAS LENTES

Aberración Cromática.- Una lente presenta aberración cromática cuando descompone la luz blanca que pasa a través de ella en una serie de imágenes de diferentes colores situadas a lo largo del eje óptico. Entonces según esten más o menos corregidas para evitar esta aberración. En la fig 3 vemos los 3 grupos de lentes; el 4^o o sea el monocromático se clasifica como tal por usarse generalmente con luz de una sola longitud de onda, por ejemplo ultravioleta.

Aparte de la aberración que se ilustra en la fig 3 y que se llama aberración cromática longitudinal existe la aberración cromática lateral, ya que las imágenes que se forman no son todas del mismo tamaño.

La imágen que se forma debido a esta aberración tendrá halos coloreados y la imágen perdería nitidez y contraste. Para evitarlo, se forman los objetivos con lentes de diferentes propiedades ópticas (índices de refracción). Así los objetivos acromáticos corrigen 2 regiones del espectro, generalmente el rojo y verde; los apocromáticos tres, rojo, verde y violeta, siendo por lo tanto superiores a los acromáticos.

Aberración Esférica.- La luz que pasa cercana a los bordes de la lente se refracta más que la que pasa cercana al centro o al eje óptico. Por tanto

los rayos laterales formarán una imagen más cercana a la cara de salida de la lente que los rayos centrales. Esto sucede cuando se usa luz monocromática o sea de una sola longitud de onda. Si se usa luz policromática o luz blanca la cosa se complica aún más a causa de la aberración cromática.

También ésta aberración se puede corregir en parte usando un grupo de lentes de diferentes propiedades ópticas como índice de refracción o poder dispersivo y con diferentes radios de curvatura. Los objetivos apocromáticos están mejor corregidos que los acromáticos en este aspecto. Sin embargo es imposible eliminar completamente la aberración esférica pero su efecto sobre la calidad de la imagen no es muy grande y su efecto perjudicial puede evitarse usando otro tipo de objetivos llamados de Compensación. Esta aberración se ilustra en la fig 4.

PROPIEDADES DE LOS OBJETIVOS

Aumentos.- El aumento propio de un objetivo depende del No de lentes y de la calidad de las lentes que lo forman y será la capacidad del objetivo para dar una imagen un número determinado de veces mayor que su objeto.

Apertura Numérica.- Podríamos decir que la apertura numérica de un objetivo depende principalmente de su construcción. La apertura numérica se define como:

$$A.N. = n \sin \mu$$

siendo n el índice de refracción entre la muestra y la lente frontal del objetivo y μ será el ángulo que los rayos reflejados en la superficie de la muestra y que entran en el objetivo formen con el eje óptico del mismo. Fig 5.

Poder Resolvente.- Es la capacidad del objetivo para producir imágenes separadas de dos detalles del objeto que estén muy próximos uno del otro. Es función de la apertura numérica del objetivo y de la longitud de onda de la luz empleada en la iluminación.

Así tenemos que:

$$d = \frac{\lambda}{A.N.}$$

siendo d la distancia mínima entre dos detalles observable distintamente, expresada en las unidades de longitud que se empleen para medir la longitud de onda.

λ = longitud de onda de la luz iluminante

A.N = apertura numérica del objetivo

Cuando la luz reflejada baña completamente al objetivo, se tendrá un máximo de resolución, que será:

$$d' = \frac{\lambda}{2A.N.}$$

Por lo tanto los objetivos con mayor apertura numérica tendrán mayor poder de resolución para una longitud de onda dada y a menor λ se incrementará el poder resolutivo.

Profundidad de Foco.- También llamada penetración a resolución vertical, es la capacidad del objetivo de dar imágenes nítidamente enfocadas, aún cuando la superficie posea desniveles.

La p. de f. es inversamente proporcional a la apertura numérica y a los aumentos propios del objetivo no existe manera de corregir este defecto pero se pueden emplear diafragmas que lo disminuyan, disminuyendo al mismo tiempo la a. n. y por lo tanto la resolución.

Curvatura de Campo.- La imagen que produce el objetivo es más o menos curvada y por lo tanto el centro puede ser plano y estar enfocado mientras que

el borde queda desenfocado. Este defecto es más notable en los objetivos de gran apertura numérica. Puede iluminarse en parte usando oculares especiales. También puede iluminarse en parte cerrando el diafragma de apertura, pero esto no es recomendable pues se pierde resolución.

OCULARES

El ocular es también un sistema de lentes al igual que el objetivo, cuya finalidad es agrandar o aumentar la imagen primaria producida por el objetivo y convertirla en una virtual visible o proyectarla como real como sucede en la fotomicrografía. También puede compensar algunas aberraciones residuales del objetivo. También poseen un número de aumentos propios. En general se dividen en: negativos, positivos y fotográficos o ampliadores.

Oculares Negativos.- Los términos negativos o positivos son más bien para diferenciar una clase de otra y porque las construcciones son diferentes. El negativo está formado por dos lentes no acromáticas y plano convexas montadas de tal manera que la cara convexa está dirigida en la misma dirección, existiendo un diafragma entre las dos lentes. Su característica principal es que el punto focal equivalente queda situado entre las dos lentes y como consecuencia, este tipo de oculares no pueden usarse como lupas.

Existen oculares de este tipo que están poco corregidos como los Huygens y otros corregidos por errores de aberración, tales como los Hiperplan y Periplan. En ambos casos, se deben usar con la combinación correcta de objetivo, de tal manera de obtener la mejor imagen posible.

Oculares Positivos.- Formados también por varias lentes. La característica principal es que el foco principal del sistema se encuentra adelante de la lente de campo (la más próxima al objetivo) y por eso, el sistema puede funcionar como una lupa.

El sistema más sencillo es el de Ramsden, formado por dos lentes plano-convexas, con las caras curvadas una frente a la otra. Esta peor corregido cromáticamente que el de Huygens, pero mejor corregido en errores esféricos.

Oculares Compensadores.- Construidos en el mismo sistema que el positivo o negativo, pero compensados en exceso por aberraciones cromáticas de tal manera que se compensen las aberraciones de los objetivos acromáticos y anocromáticos.

Oculares Amplificadores o fotográficos.- Es un sistema de varias lentes construidos de tal manera que la imagen formada pueda ser proyectada a una distancia relativamente corta. La pupila de salida, queda entre sus lentes y el objetivo y por ello no se puede emplear para la observación visual o como lupa. Funcionan como parte integrante del objetivo porque entre ellos dos forman una imagen real que es la que se proyecta sobre la pantalla.

Oculares de Medida.- Si un ocular positivo o negativo se le influye una escala o retículo que se coloque en el plano focal de la imagen real primaria, será posible observar en la imagen final, la escala. De esta manera se podrán hacer mediciones.

OTROS ELEMENTOS DEL MICROSCOPIO

En general, un microscopio comprenderá: una base o estativo al que vá unido mediante un brazo el tubo del microscopio (en el cual van montados el ocular, objetivo y prisma o espejo reflector y algunas -

veces, la fuente luminosa) y además una platina porta objetos.

El foco luminoso es en general una lámpara de tungsteno de 6 a 8 V; aunque para usos más especializados pueden usarse lámparas de Xenón, de arco de C, etc. también aquí se incluye la lente condensadora y un filtro luminoso.

Generalmente existe un diafragma de apertura que regula la cantidad de luz que la unidad de iluminación envía al microscopio y que tan importante es para obtener una iluminación crítica.

Tanto el tubo como la platina pueden ser desplazables en el sentido vertical. Algunas platinas poseen tornillos micrométricos que permiten mover la muestra en sentido horizontal. La platina puede ser de tipo normal o invertida de Le Chatelier, sobre la cual es posible colocar muestras de mayor tamaño.

Filtros.- El objeto de los filtros es absorber toda la luz visible, menos una banda estrecha de longitudes de onda que debe corresponder a la máxima corrección óptica de los objetivos. De esta manera se logrará mayor resolución y mejor contraste. En general, los filtros preferibles son hoja de vidrio coloreadas, pero también pueden emplearse filtros líquidos u hojas de vidrio incoloro con una capa de gelatina coloreada uniendo dos hojas de vidrio.

Diafragmas.- Ya hemos visto que existe un diafragma de apertura, el cual al abrirse o cerrarse, enviará mayor o menor cantidad de luz al objetivo y por lo tanto, su buen ajuste es muy importante para obtener una imagen de buena calidad.

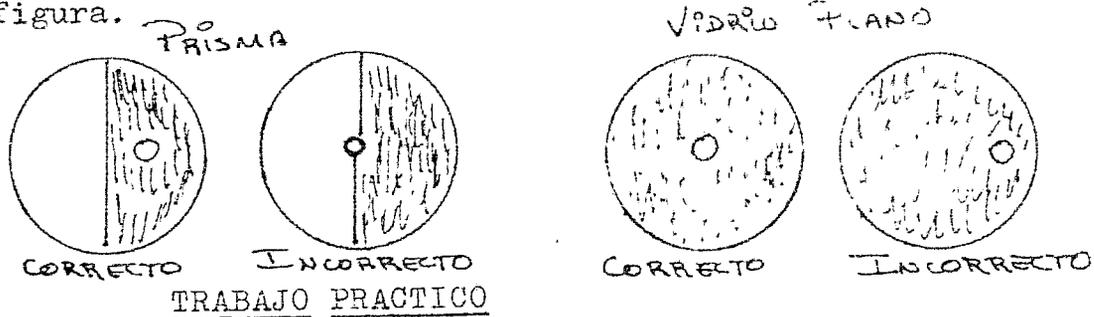
El otro diafragma es el de campo, cuya misión principal es disminuir las difusiones y reflecciones

nes internas de la luz, aumentando de ésta manera, el contraste de la imagen. Su localización en el microscopio varía pero siempre su imagen es visible en el plano de la superficie de la probeta. Se debe ajustar de tal manera que su borde sea justamente visible en el campo de la imagen.

AJUSTE DE LA ILUMINACION

Para que la iluminación sea uniforme en todo el campo, el reflector (prisma o espejo) debe estar bien orientado y alineado con relación a la iluminación incidente. Lo anterior se logra observando la imagen y girando el reflector ligeramente hasta que todo el campo esta igualmente iluminado.

Otro procedimiento consiste en observar una superficie perfectamente pulida, enfocar y enseguida retirar el ocular. La huella luminosa definida por el diafragma de apertura será vista a través del tubo y su posición correcta, para cada caso está dado en la figura.



Le serán provistas probetas metalográficas ya preparadas. Uselas para conocer su microscopio. - Ajuste iluminación, abra y cierre diafragmas, use diferentes filtros, note aberraciones, observe sus muestras a bajos y altos aumentos, etc.

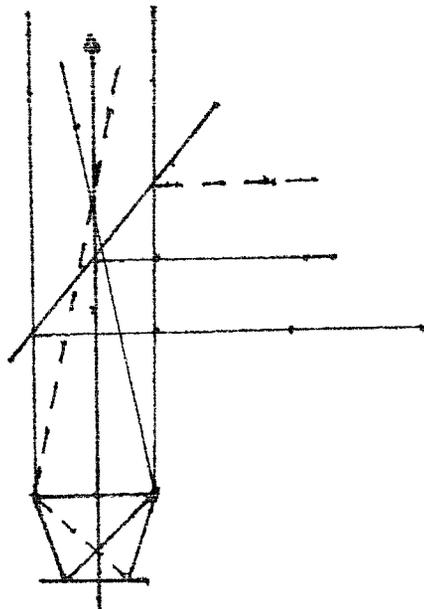
BIBLIOGRAFIA

Fundamentos de la Práctica Metalográfica. G.

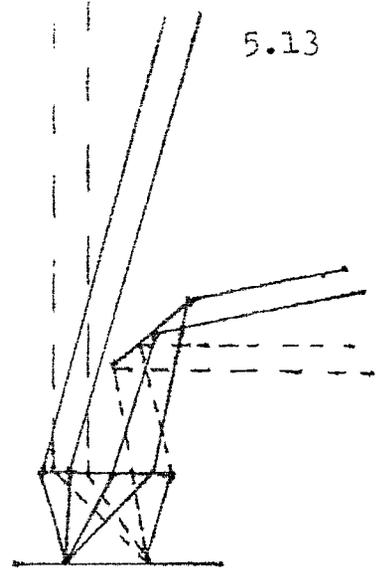
L. Kehl.

Practical Microscopical Metallography. R.H.

Greaves, H. Wrighton.



Espejo Reflector

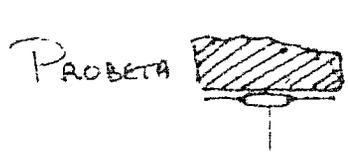


Prisma

5.13

Iluminación Vertical

FIG. 1

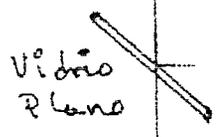


Imágenes del foco luminoso condensador y diafragma de campo



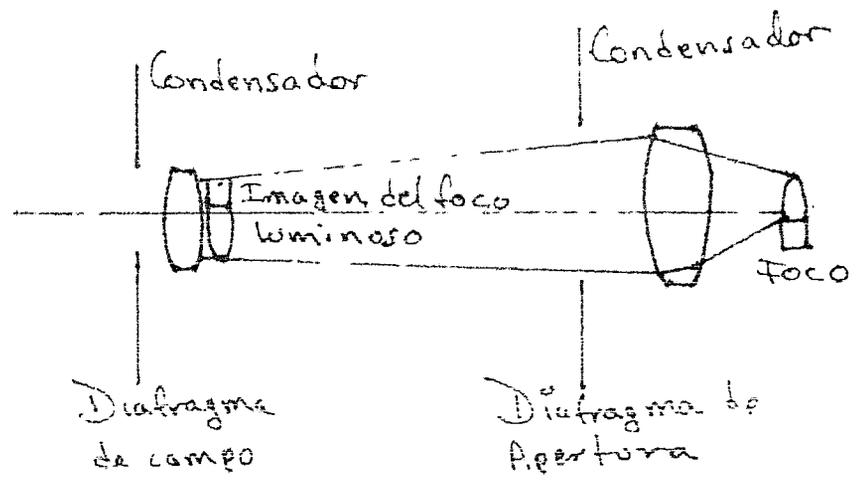
OBJETIVO

Imagen del condensador y diafragma de apertura



Reflector

Ocular



Esquema de Iluminación Crítica

FIG. 2

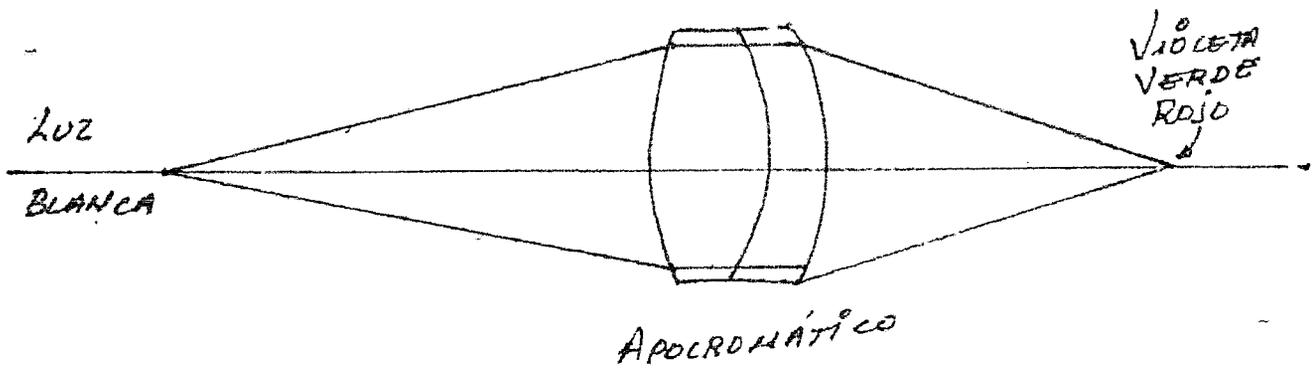
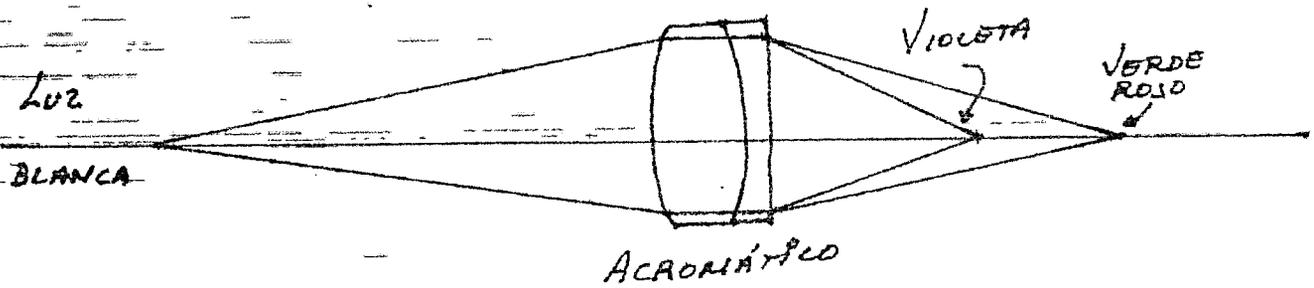
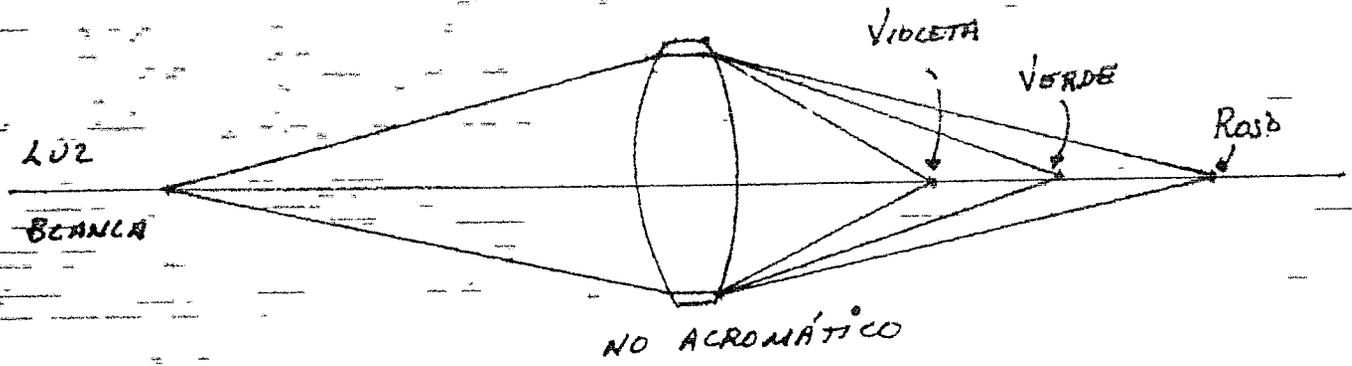
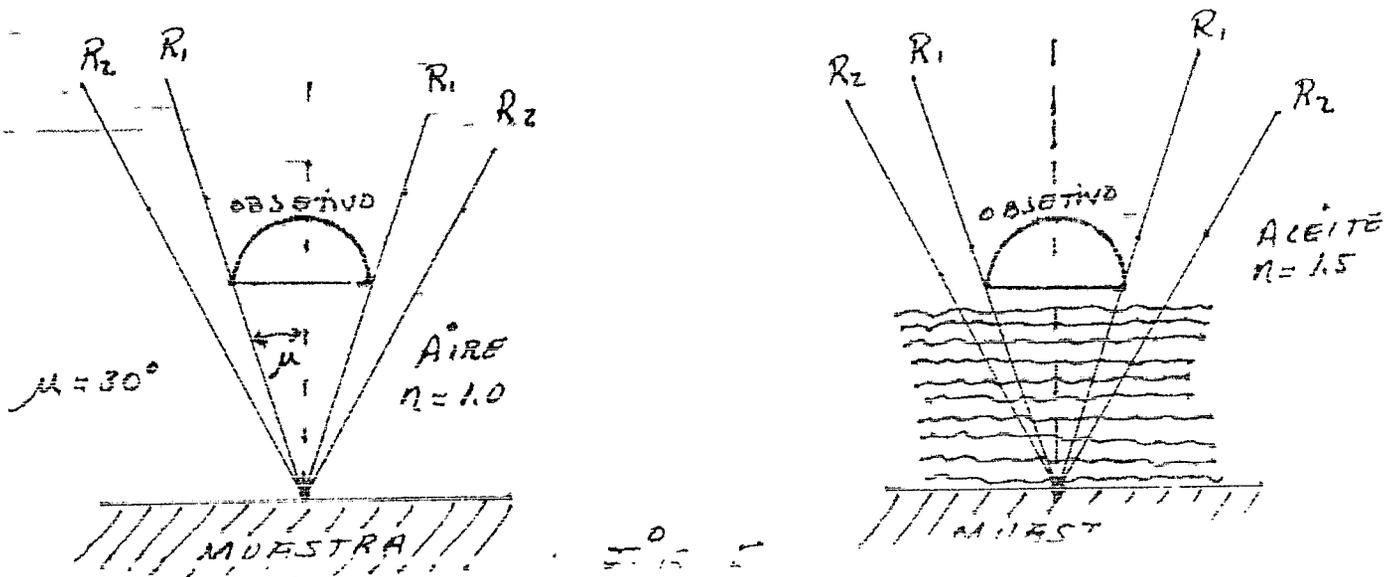
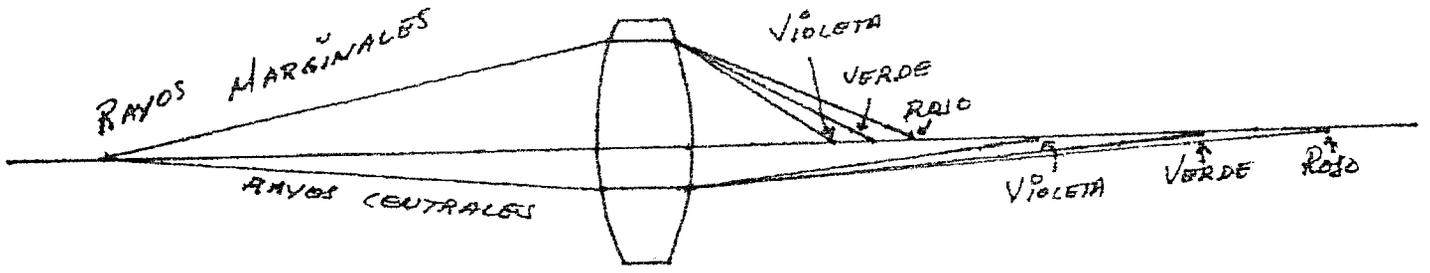
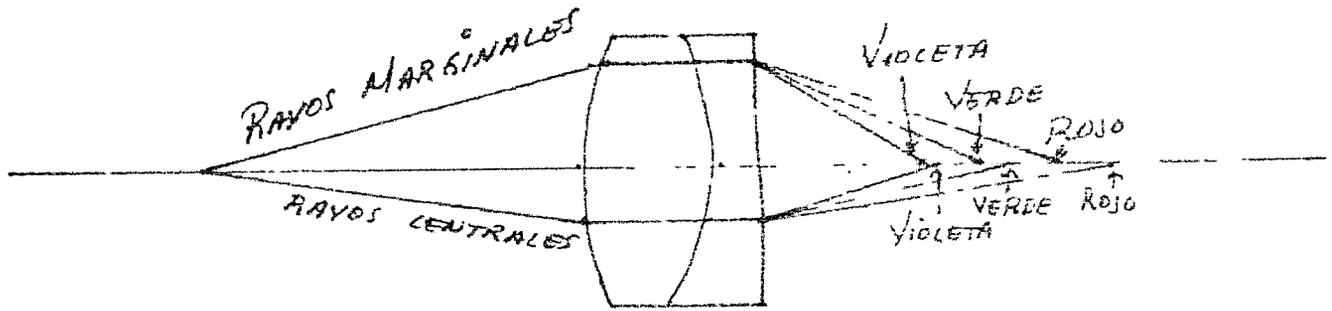


FIG. 3 ABERRACIÓN CROMÁTICA

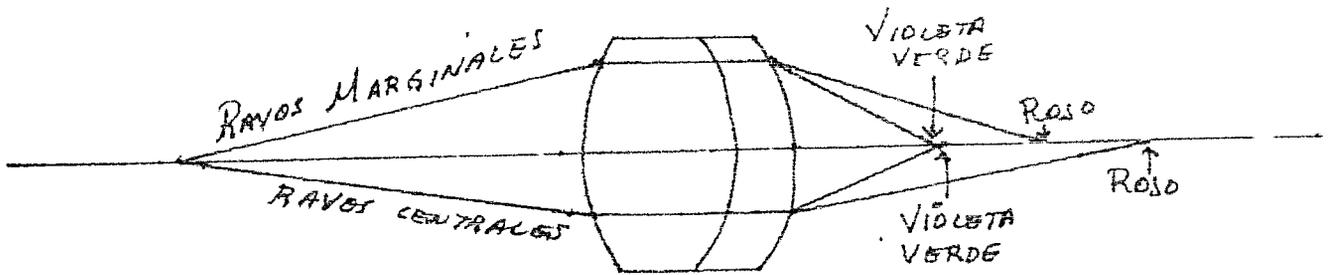




NO ACROMÁTICO



ACROMÁTICO



APOCROMÁTICO

FIG. 4

ABERRACIÓN ESFÉRICA

PRACTICA # 6

FASES EN SOLIDOS

En la práctica de defectos cristalinos hemos visto que las celdas elementales de una cierta estructura se pueden orientar todos con un cierto orden formando un grano o cristal de un cierto material; y que si la orientación cambiaba en cierto momento, tendríamos otro grano y un límite de grano entre ellos. La manera como estas unidades cristalinas se ordenen van a ser las responsables de muchas de las características estructurales de los materiales.

Si todas las celdas elementales se arruman o crecen con la misma orientación tendremos un sólido - cristalino homogéneo que no presentará grandes diferencias de estructura en todo su volumen. Existen los sólidos homogéneos no cristalinos como por ejemplo el vidrio en el cual hay orden pero solo en ciertas regiones.

También puede suceder que un sólido esté formado por 2 ó más elementos y que cada elemento o la combinación de ellos tengan una cierta estructura - cristalina. Entonces tendremos un sólido inhomogéneo, con regiones en las cuales la estructura cristalina - (atómica o molecular) es diferente a otras regiones. Tendremos así que a estas regiones se les denomina fases y al límite entre ellas Límite de Fase.

MONOCRISTALES

Cuando las celdas cristalinas se ordenan de tal manera que la orientación es la misma en todo el volumen del sólido formado, vamos a tener la manifestación más obvia y simple del orden cristalino o sea un monocristal.

Algunas de las manifestaciones de cristalinidad pueden ser la forma geométrica con que crece el -

crystal o que se puede obtener mediante el corte o clivaje de monocristales en ciertos planos; otra sería las figuras de corrosión que se forman al someter el monocristal a ciertos reactivos químicos; ellos nos pueden mostrar la distribución de dislocaciones y la orientación de las caras de clivaje. Una última manifestación de la cristalinidad serán las líneas de dislocaciones que se obtienen al deformar el monocristal. Estas son en realidad escalones cristalinos producidos por el deslizamiento de dislocaciones, pero su altura siendo tan pequeña, se observan al microscopio como líneas.

TRABAJO PRACTICO

Se le entregarán monocristales de KCl. Observelos al microscopio con luz transmitida. Clive algunos de ellos y si es posible haga algún ataque para formar figuras de corrosión.

MATERIALES POLICRISTALINOS

A. Monofásicos

En la práctica de defectos cristalinos hemos visto como se forman los granos y límites entre ellos. La estructura cristalina puede ser la misma en todos los granos, aunque con orientaciones diferentes. Pero en todo caso no tendremos un sólido inhomogeneo, con diferentes estructuras cristalinas o diferentes fases. La única inhomogeneidad que encontraremos serán los límites de grano. Dentro de éste caso estarán los metales puros y algunas aleaciones que caen dentro de ciertas composiciones.

Es posible observar los granos que forman los sólidos de este tipo, observando un sólido fracturado a bajos aumentos o sometiendo la superficie del sólido a ciertos reactivos químicos que disolverán

preferencialmente al material que se encuentra en la región de los límites de grano; de ésta manera, al observar la superficie al microscopio, por diferencia de niveles y por diferencia de orientación entre los granos, nos producirán contrastes.

No solo en los metales se presenta una estructura de granos, sino en algunos polímeros policristalinos se presenta una estructura similar, aunque no absolutamente igual a aquella de los sólidos policristalinos. La orientación de las cadenas largas que forman los polímeros toman diferentes orientaciones en diferentes regiones del polímero. En este caso no se denominan granos, sino esferulitas, pues las cadenas parecen presentar una simetría aproximadamente esférica.

TRABAJO PRACTICO

Se le entregarán muestras de material monofásico. Observelas con luz reflejada. Observe los límites de grano.

También recibirá una muestra de polietileno. Observela con luz transmitida y polarizada. Observe las esferulitas.

B. Polifásicos

La mayoría de los sólidos contienen dos o más fases y la forma, cantidad, naturaleza y distribución de cada fase les dá propiedades útiles e interesantes.

Ejemplos de materiales polifásicos en escala macroscópica pueden ser las rocas que estén formadas por dos o más minerales, o sea, dos o más fases. También algunos materiales cerámicos como el ladrillo, concreto, etc.

Otro ejemplo serán las aleaciones metálicas

en las cuales tenemos una matriz metálica con otra fase metálica distribuida en la matriz. Esta matriz puede ser metal puro, solución sólida o compuestos químicos.

Aleaciones muy importante polifásicas son el acero y las fundiciones de hierro. Es bien conocido - el hecho de que un acero es esencialmente una aleación de hierro con una pequeña cantidad de carbono (menos de 2 % de C) sin otros elementos aleantes excepto impurezas. Si se añaden otros elementos tendremos aceros que se clasifican de muy diferentes maneras.

Cuando la concentración de C es muy baja (0.02 % C) tendremos una solución sólida intersticial de C en Fe, llamada ferrita. Entre 0.02 y 0.8 % C tendremos además una 2a fase llamada Cementita que es un carburo de hierro (Fe_3C). La combinación, de la minillas de ferrita y cementita nos formará la perlita. Entre 0.8 y 2 % tendremos una matriz de cementita y algo de perlita.

Las fundiciones son aleaciones de Fe-C-Si con un 2 a 4 % de C y la misma cantidad de Si. El Si promueve la formación de grafito en lugar de cementita ; aunque dependiendo de la velocidad de enfriamiento se podrá formar una mezcla de grafito y cementita en una matriz de hierro.

TRABAJO PRACTICO

Le serán entregadas muestras de aceros y fundiciones de diferentes composiciones. Observe y estudie las diferentes fases presentes.

PROCESADO DE MATERIALES

A. Fusión y Solidificación

La mayoría de los materiales metálicos se fabrican fundiendo las materias primas y colocándolas

en moldes en donde solidifican; la solidificación se realiza desde las paredes del molde hacia el interior resultando una estructura con granos alargados o columnares, perpendiculares a la pared del molde.

Antes de formar el grano, el material solidifica en ciertos planos, formando un esqueleto con líquido remanente entre ellos; a esta conformación se le llama Dendritas.

TRABAJO PRACTICO

Le serán entregadas muestras de material solidificado, identifique la estructura granular y la dendrítica.

B. Deformación

Muchos productos metálicos de uso diario se fabrican mediante la deformación de los lingotes que se producen durante el colado. Los metales y polímeros son suficientemente dúctiles como para ser deformados. Existen muy diferentes maneras de deformar un metal y tendremos así procesos que son clasificados con diferentes nombres; laminación, extrusión, forjado, trefilado, etc.

La característica principal de la microestructura de los materiales deformados es que los granos se alargan y se orientan en una dirección preferencial común que es la dirección de deformación.

Los materiales deformados, contienen impurezas que no son necesariamente metálicas. En el material no deformado estas inclusiones se observan en muy diferentes formas, pero generalmente son redondeados. En el material deformado, también la inclusión se alarga en la misma dirección de los granos. Las inclusiones pueden ser óxidos, sulfuros u otros compuestos más complejos y por lo general son duras y frágiles a la temperatura ambiente.

TRABAJO PRACTICO

Le serán entregadas muestras de material deformado. Observe la estructura de granos alargados y las inclusiones.

C. Recristalización y crecimiento de grano.

Un material deformado, en general, no posee muy buenas propiedades mecánicas, siendo un material frágil y endurecido debido a la interacción de las dislocaciones formadas durante la deformación. Si el material se calienta, empezará a recuperarse o sea recupera sus propiedades físicas que tenía antes de ser deformado.

A medida que transcurre el tiempo o si se eleva la temperatura, se observará que en los límites de los granos deformados empieza a aparecer pequeños granos que ya no son alargados sino equiaxiales y que el material empieza a recuperar las propiedades mecánicas que tenía antes de la deformación. A este proceso se le llama recristalización. El proceso continúa hasta que todos los granos alargados desaparecen. La deformación puede clasificarse como deformado en frío o en caliente, dependiendo de la temperatura a la cual se haga la deformación; como regla general se dice que es deformado en frío cuando la temperatura está por debajo de la temperatura de fusión/2.

Una vez que el material a recristalizado completamente y si se prosigue el calentamiento, los pequeños granos empezarán a crecer; la causa de este crecimiento es la reducción de la energía superficial que acompaña a la reducción en el área de los límites de grano. A mayor temperatura, más rápido el crecimiento de grano.

En un material recristalizado pueden aparecer

maclas, pero no de deformado, sino de recocido que -
 aparecen debido a errores de apilamiento al crecer -
 granos no deformados a partir de granos deformados.

TRABAJO PRACTICO

Recibirá muestra de material deformado, par-
 cialmente recristalizado, y con crecimiento de grano.
 Observe y compare las diferentes estructuras granula-
 res. Observe las maclas de recocido.

PROBLEMAS

1.- ¿Por qué la temperatura de recristaliza-
 ción varía según los diferentes metales?

2.- ¿Por qué la adición de elementos de alea-
 ción cambia la temperatura de recristalización?

3.- Menciónese una aplicación industrial en
 la que se requiera recocido periódico entre las opera-
 ciones de trabajado en frío.

4.- (a) La fig 17.4 (read-fill) muestra la -
 microestructura de una probeta de acero de alto carbo-
 no. ¿Cuáles son las fases en este sistema?

5.- Los elementos titanio, circonio y hafnio
 pueden formar una solución sólida en todas las propor-
 ciones de los elementos. En una solución sólida conte-
 niendo 100 gr de cada uno de estos elementos, ¿cuál -
 es la fracción molal correspondiente a cada uno?

6.- Una aleación de titanio-circonio-hafnio
 contiene 15 % atómico de titanio y 45 % atómico de -
 hafnio. ¿Cuántos gramos de circonio habrá en 500 gr -
 de este metal?

BIBLIOGRAFIA

- Estructura. Ciencia de los materiales, Vol I
W.G. Moffatt, G.W. Pearsall and J. Wulff.
The Structure and Strength of Metals. A.R. -
Bailey.
Introducción a la Metalurgia Física. Sydney
H. Avner.
Principios de Metalurgia Física. R.E. Reed-
-Hill.

PRACTICA = 7

METALOGRAFIA

PREPARACION DE MUESTRAS METALOGRAFICAS

La micrografía es el estudio al microscopio de una muestra metalográfica que ha sido preparada previamente por pulido y ataque de la superficie pulida mediante un reactivo químico adecuado, de tal manera de poner en evidencia la estructura del metal. De esta manera es posible estudiar diversos aspectos de la estructura de los materiales, por ejemplo, el tamaño de los granos, los límites de grano, el número de fases presentes, la repartición, homogeneidad o heterogeneidad de estas fases, etc.

Veremos enseguida una descripción somera de los principales métodos usados para la preparación de probetas metalográficas para ser observadas en el microscopio óptico.

- PULIDO

A. Pulido Mecánico

La superficie de la probeta a pulir debe estar aceptablemente plana y para ello, después de que se ha cortado alguna muestra de una pieza grande, se acostumbra darle lo que se denomina un desbaste grosero o grueso, mediante una cinta de papel de esmeril de grano grueso que vá montada sobre dos poleas que están girando a gran velocidad. Las precauciones que se deben tomar durante el desbaste grosero son: No se debe permitir que la temperatura de la muestra aumente demasiado, para ello debe sumergirse la muestra en agua fría con regularidad; no se debe aplicar una gran presión de la muestra contra el papel, pues lo único que se consigue con ello es producir una gran deforma

ción en el material de la superficie de la muestra; - se recomienda rebajar los bordes y las esquinas de - las muestras que están muy afiladas, a fin de que en las operaciones no se rompan los papeles de esmeril y los paños que deberán ser usados.

Algunas veces, estos equipos de desbaste grosero cuentan con una corriente de agua, con lo cual - la temperatura no sube, pero aún así se deben tomar - en cuenta las otras precauciones.

Una vez que se ha conseguido una superficie - más o menos plana, se pasará al desbaste intermedio y final, para lo cual se usan papeles de esmeril que - tienen granos cada vez más finos, los cuales están nu- merados desde el 50 hasta el 600. A menor número de - papel, más grueso será el grano. En general se usan 4 tipos de papeles: 220, 320, 400 y 600. Estos van fi- jos sobre una superficie plana. El movimiento de la - muestra debe ser en una sola dirección, unido, y sin presionar demasiado para no distorsionar el material de la superficie; de esta manera quedan rayas en la - superficie que son todas paralelas. Cuando se tienen todas las rayas paralelas, se pasa al siguiente papel haciendo una rotación a la muestra de 90° - se hace - hasta que todas las rayas antiguas hayan desaparecido.

En general es suficiente con un lubricado - que dá el agua, pero en casos muy especiales, por - ejemplo con metales muy blandos o aleaciones muy de - formables, se pueden usar otro tipo de lubricantes lí- quido ó sólidos, por ejemplo: aceites, glicerina, pa- rafinas, etc.

Este desbaste, puede hacerse también median- te máquinas que no son más que discos planos de algún material metálico o plástico, sobre los cuales se co-

locan papeles de esmeril que tienen pegamento en su parte posterior y que se adhieren al disco o bien se fijan con anillos metálicos. También es posible recubrir estos discos con parafinas de alto punto de fusión, paño impregnados con parafinas, placas de plomo con una espiral grabada sobre ellos, Todas estas son técnicas especializadas para metales muy blandos o cuando se quiere conservar inclusiones, no redondear los bordes etc. Estos métodos tienen la gran ventaja que no distorcionan tanto a la superficie metálica.

PULIDO

Una vez que se a terminado con el desbastado fino, se pasará al pulido. Este se hace mediante abrasivos de tamaño de grano muy fino que se coloca sobre paños de diferentes acabados, por ejemplo: canvas, paño de billar, seda, nylon, terciopelo, etc.

La muestra se aplica sobre el paño, debiendo girar en sentido contrario al giro del disco o moviéndola desde el centro a la periferia del disco. No debe aplicarse una gran presión para no causar distorsión de la superficie y de ninguna manera debe mantenerse fija en el mismo lugar, pues ello causa que se arranque material en los lugares donde haya poros o inclusiones, causando las llamadas "colas de cometa".

El primer pulido o pulido grueso, se hará con un abrasivo de tamaño de grano grueso que nos va a eliminar las rayas del último papel abrasivo que hayamos usado. Enseguida se pasa al pulido intermedio, que lógicamente se hará con un abrasivo de tamaño de partícula más fina que el anterior. Y por último el pulido fino, con partículas aún más finas, nos dejará una superficie pulida a espejo, que estará lista para el ataque. Los tamaños de partícula pueden variar des

tercionado si se desea observar la estructura real. Ello se hace sometiendo la muestra a un ciclo de pulido y ataque antes del final. En general se recomienda atacar y pulir tres veces antes del ataque final.

REACTIVOS

El ataque se hace poniendo en contacto la superficie pulida con una solución formada por ácidos orgánicos o inorgánicos, álcalis, sales complejas, etc. disueltos en un solvente adecuado como agua, alcohol, etc.

Por supuesto que existe una infinidad de reactivos adecuados para cada metal o aleación, dependiendo de la composición química de la muestra, número y distribución de fases, homogeneidad, etc. Es por ello que para atacar alguna probeta, se debe buscar en tablas o en libros los reactivos que ya hayan sido ensayados y que hayan dado buenos resultados.

Métodos de Ataque

Los métodos de ataque consisten esencialmente en sumergir la superficie limpia pulida a la solución del reactivo adecuado, o bien mojar la superficie pulida con un algodón impregnado.

Si el ataque se hace por inmersión, se sujetará la probeta con la mano o con pinzas y con la cara pulida hacia abajo se pondrá en el reactivo de ataque, agitando ligeramente para eliminar burbujas de aire y para que la superficie entre en contacto con el reactivo no gastado. Se notará que la superficie brillante empieza a cambiar a color mate y esto nos dará una idea de cómo va o cuándo debe terminar el ataque.

Cuando ya se atacó la probeta por el tiempo recomendado, se saca del reactivo y se lava en un chorro de agua, con lo cual se elimina todo vestigio de

reactivo, enseguida se lava con alcohol y se seca al aire.

Los factores que se deben tomar en cuenta en un ataque son: la elección del reactivo adecuado, el tiempo de ataque y la temperatura del reactivo. La elección del reactivo es la variable más importante ya que de él depende que se disuelva o coloree una fase u otra. Cuando un reactivo no nos revela la microestructura que deseamos observar, se deberán probar otros.

El tiempo de ataque es también un factor importante. En general, en las tablas de reactivos se dan tiempos de ataque, que pueden servir como guías pero no como tiempos definitivos. Siempre es mejor ensayar los tiempos, empezar atacando por un tiempo corto y observar al microscopio hasta que observemos la estructura con toda claridad. Si nos pasamos en tiempo, la superficie se nos sobre-atacará y entonces será necesario volver a pulir.

En general se recomienda que para observaciones a aumentos bajos los tiempos sean más largos que para observaciones a aumentos altos, y para fotografía el tiempo debe ser intermedio. Pero siempre es mejor el método de ensayo y observación.

Los tiempos de ataque varían mucho dependiendo del reactivo empleado y de la naturaleza de la muestra, pudiendo variar desde tiempos tan cortos como 1 seg., hasta tiempos tan largos como una hora.

La temperatura del reactivo puede ser también un factor importante que hay que controlar. Como se trata de una reacción química, en general, a mayor temperatura del reactivo, será menor el tiempo de ataque.

TRABAJO PRACTICO

Le serán entregadas muestras de un metal duro

y fácil de pulir como un acero y un metal blando (latón).

Seguendo los procedimientos descritos, prepare una superficie pulida en cada una de las muestras, atáquela con el reactivo adecuado y obsérvela al microscopio.

OPERACIONES A REALIZAR EN EL LABORATORIO

Vamos a tratar de hacer un ataque con cada uno de los diferentes tipos de reactivo. Así tenemos:

Reactivos Corrosivos.

A. Reactivos sensibles a la orientación cristalina.

En este caso tenemos ataque por la intervención de dos factores: la alta energía y por tanto la gran reactividad de los límites de grano y el diferente comportamiento de los cristales según la orientación que tengan respecto a la superficie de observación.

Para observar los ataques anteriores, tomaremos una muestra de aluminio puro, lo puliremos mecánicamente hasta diamante fino según la práctica de pulido y lo atacaremos con un reactivo de ácido fluorhídrico (ver Kehel). Además usaremos una muestra de solución sólida total, por ejemplo un latón alfa el cual puliremos y atacaremos con persulfato de amonio hirviendo.

B. Reactivos que corroen preferencialmente una fase o agregado.

En este caso el reactivo de ataque actúa preferencialmente sobre alguna de las fases o compuestos de una aleación, tomaremos como ejemplo un acero recocido (1035) y lo puliremos y atacaremos con nital; este no colorea a la ferrita ni a la cementita.

Sin embargo, se observan con diferente coloración y esto es debido a que el nital ataca preferencialmente a la ferrita y al quedar con diferente inclinación reflejan diferentemente la luz y de ahí la diferencia de color.

Como ejemplo de reactivos que atacan zonas de segregación o zonas de diferente composición química, - podemos tomar una muestra de un hierro Armco, pulido y atacado con picral.

C. Reactivos que forman figuras de corrosión.

Estos reactivos tienen la peculiaridad de que atacan solamente ciertos puntos preferenciales de la su perficie metálica, formando sobre éstos puntos figuras que presentan contornos geométricos, como cuadrados, - triángulos, etc. La forma depende de la orientación que tenga el grano respecto a la superficie de observación.

Las figuras de corrosión también aparecen cuando se ataca en exceso una probeta debido a la diferente velocidad de disolución de los planos cristalográficos.

Como ejemplo podremos sobreatacar una muestra de cobre puro con persulfato de amonio. La formación de figuras de corrosión sin sobreataque se verá después - del pulido electrolítico.

D. Reactivos colorantes.

Reactivos que dan capas coloreadas

En este caso el reactivo reacciona con un cier to tipo de compuesto formando en la reacción capas de - color. Como ejemplo podemos usar un acero de alto carbono (1075) atacado con citrato de sodio hirviendo y vere mos como se colorean los compuestos de carburo de hierro (cementita).

Reactivos que forman capas epitáxicas

En este caso se forman capas no coloreadas, pe ro que al observarse con luz polarizada se nos presen - tan con coloraciones diferentes según la fase en que estén.

- BIBLIOGRAFIA

Fundamentos de la Práctica Metalográfica. G.E.

Kehl. -

Practical Microscopical Metallography. R.H. -

Greaves

Metals Handbook. ASTM. Vol 2, Wreighton.

PRACTICA 8

PULIDO Y ATAQUE ELECTROLITICO EN CELDA

En el pulido mecánico, por más cuidadoso que sea, siempre quedan algunas rayas y además se forma una capa de metal deformado que no nos representa la verdadera microestructura de la muestra. En el caso del pulido electrolítico se elimina completamente esta capa lo cual es una gran ventaja para numerosos estudios, tanto industriales como de investigación básica. A causa de esta propiedad de no dejar capa distorsionada, el método es ideal para el pulido de metales y aleaciones blandas y de aleaciones que endurecen fácilmente por deformación. Por supuesto que el método tiene sus desventajas como son la destrucción de inclusiones no metálicas por reacción química de estas con el electrolito, a veces se tiene algún relieve por la diferente velocidad de disolución de las fases de una aleación, etc.

EQUIPO DE PULIDO ELECTROLITICO

Este pulido puede hacerse en celda electrolítica. La celda electrolítica es muy sencilla de construir y consta de una caja de material adecuado para que no reaccione con el electrolito; se llena la caja con un líquido electrolítico escogido, el cual es en general una mezcla de ácidos o bien otros reactivos químicos. En el electrolito se introduce la muestra a pulir, lo que nos formará el ánodo y además se introduce el cátodo que se escoge según la muestra a pulir y el electrolito escogido. Enseguida, mediante alambres, se conecta tanto el ánodo como el cátodo a un circuito de corriente directa que lleva su batería, voltímetro, amperímetro, reóstato y un interruptor. En la fig. 1 se representan todos estos elementos.

Por supuesto que existen formas más complicadas, lo cual dá ventajas adicionales, pero el equipo básico es este.

Los aparatos comerciales tienen modificaciones que son muy convenientes para el pulido electrolítico como son el permitir que el electrolito esté circulando, lo cual nos dejará tener una mayor densidad de corriente y haremos el pulido en un tiempo más corto. En realidad viene a ser lo mismo que una celda, o sea, una fuente de corriente directa, de ahí van las salidas, una a la muestra (ánodo) y otra a un cátodo que está inclinado en un recipiente que contiene el electrolito; este recipiente tiene adaptada una pequeña bomba que hace circular el electrolito; la muestra se coloca en una pequeña abertura sobre el recipiente y la bomba le lanza el chorro de electrolito a la superficie de la muestra.

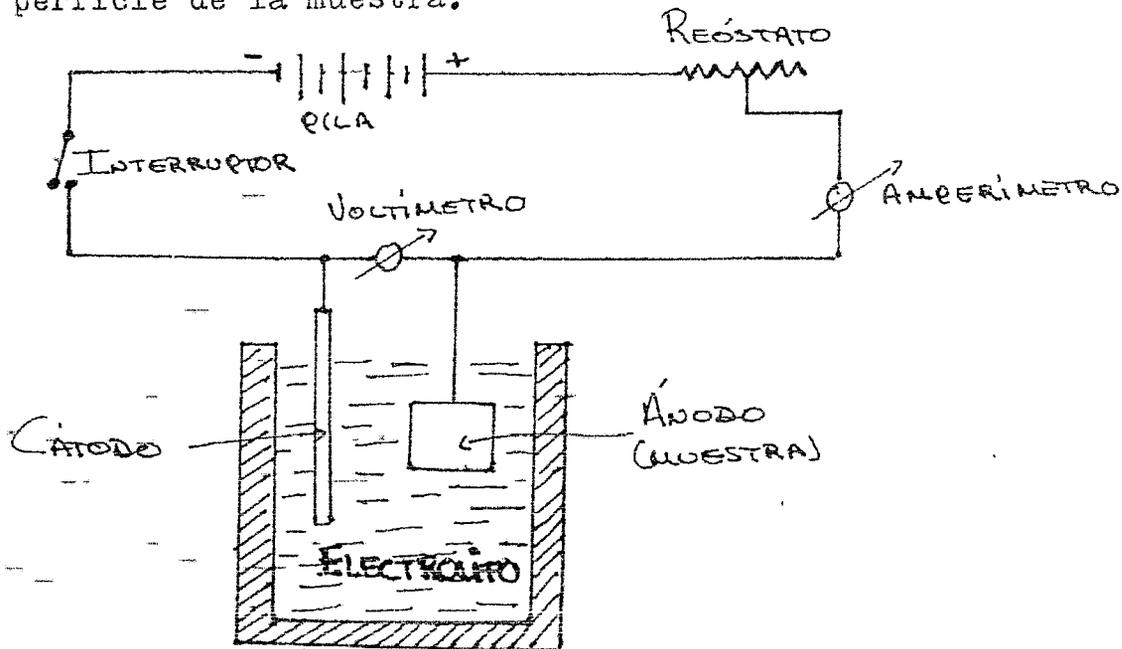


Fig. 1

FUNDAMENTOS DEL METODO

La teoría del pulido electrolítico no está perfectamente aclarada. Sin embargo, parece ser que el pulido de la muestra se realiza por disolución anódica selectiva, o sea, por disolución del material superficial de nuestra probeta. La superficie de una muestra desbastada se presenta como una serie de montañas y valles, o sea de entrantes y salientes dejadas por las rayas del papel. Debido a la reacción entre la muestra y el electrolito se forman productos de reacción que quedan formando una película sobre la superficie; el espesor de esta película sobre los valles y salientes es la causante de la diferencia de velocidad con que se disuelve un valle y una saliente: como la velocidad de disolución de las salientes es mayor, entonces esto causa un aplanamiento de la superficie; pero un simple aplanamiento no nos produce la superficie brillante que deseamos y entonces se introduce la idea de otra película más fina que la anterior, de naturaleza mal precisada (posiblemente sean óxidos) y cuya función no se conoce, pero se dice que es la causante de la brillantez en la muestra.

Ahora bien, ya sabemos la disposición en la celda; entonces al hacer pasar la corriente, ésta es transportada de ánodo (muestra) a cátodo por los iones de la muestra; entonces al hacer esta transportación es que se disuelve la muestra formando la película de disolución anódica. Esta película tiene lógicamente una composición química diferente al resto del electrolito y también una resistencia eléctrica más alta; además esta película es más delgada en las salientes que en los valles, por tanto, en la parte más delgada hay un gradiente de concentración mayor y la resistencia eléctrica menor que en los valles: a con-

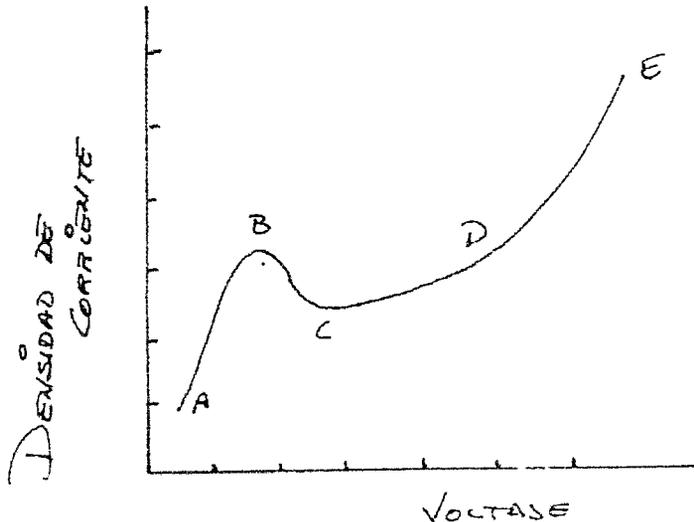
secuencia de lo anterior, cuando pasa la corriente, y para el mismo potencial, la densidad de corriente es mayor en las alientes y luego se disuelven con una velocidad mayor.

CURVA DE DENSIDAD DE CORRIENTE CONTRA VOLTAJE

En el pulido electrolítico existen muchos factores que intervienen en la obtención de un buen pulido, sin embargo el más importante de ellos es la relación que se tiene entre densidad de corriente y voltaje aplicado; esta relación cambia según el electrolito que usemos y la disposición que hagamos en nuestra celda. En la mayoría de los casos se consigue un buen pulido cuando al aumentar el voltaje aplicado se mantiene constante la densidad de corriente. Esta zona de constancia de densidad de corriente, se observa en la curva obtenida como una meseta; dicha meseta presenta anchos diferentes para las distintas clases de electrolitos, puede tener una anchura de varios volts (electrolitos para pulir wolframio, magnesio, zinc, etc.) y entonces se determina fácilmente la zona en que se realiza el mejor pulido o sea en la zona de la meseta; en algunos otros electrolitos es muy pequeña dicha meseta, de fracciones de volt (electrolitos para pulir cobre y cobalto) y luego el voltaje de pulido es crítico; en electrolitos a base de ácido perclórico, esta es tan pequeña que casi no se observa y entonces el voltaje de pulido es aún más crítico aunque en este caso se usan valores un poco más altos que los de pulido.

Deberemos graficar nuestra curva en una escala de voltaje y densidad de corriente, en papel milimétrico. Se va aplicando voltaje poco a poco, mediante un reóstato que lleva la fuente de corriente directa, la densidad de corriente la tendremos conociendo

el área de la muestra a pulir y entonces dividimos - las lecturas del amperímetro entre el área de la muestra. En general obtendremos una curva de la siguiente forma:



Las diferentes regiones de la curva significan lo siguiente:

AB. Se empieza a formar una película de productos de reacción, pero se deshace al mismo tiempo que se forma y luego el ataque no es preferencial sino que se ataca lo mismo entrantes y salientes. En este caso, nuestra superficie a pulir queda mate y con ataque, ya que en esta etapa no hay ningún ruido sino sólo una reacción química entre la muestra y el electrolito.

BC. La película empieza a ser estable: llega un momento en que se estabiliza (B) aumentando la resistencia y la caída de potencial en la película: esto hace que el aumento del voltaje disminuya la densidad de corriente.

CD. En el punto C se alcanza un estado de equilibrio en que la película se forma y se desbarata con la misma velocidad. Como se ha disuelto metal en el electrolito, entonces la película está saturada de

los iones del metal y al aumentar el voltaje hasta un cierto valor, crece uniformemente el espesor de la película, con lo cual crece la resistencia eléctrica y luego no aumenta la densidad; esto es hasta que se llega al punto D. En esta región es cuando se tiene un pulido satisfactorio de la muestra.

DE. Al pasar el valor D se produce un desprendimiento de gas muy abundante, lo cual rompe la película de electrolito que protege a la muestra; disminuye la resistencia y por lo tanto crece la densidad al aumentar el voltaje; debido a los gases se tiene un pulido irregular y una superficie ondulada.

Luego, en experiencias deberá probarse el metal, con diferentes electrolitos, obtener la curva, determinar la meseta y en esas condiciones pulir.

TECNICA

La preparación de las probetas a pulir, en la primera etapa, es igual que en el pulido mecánico, o sea un desbastado hasta papel No. 600. Después se lava, se limpia con algún solvente como tetracloruro de carbono, acetona, etc a fin de evitar las grasas lo cual no nos daría un pulido uniforme. Enseguida se coloca mediante pinzas la probeta como ánodo de la celda, la cual ya contiene el cátodo y el electrolito y se empieza a pasar la corriente, construyéndose la curva; se determina la meseta, se vuelve a desbastar la muestra y se pule ya con el valor obtenido en la meseta y durante un tiempo adecuado; se saca la probeta; se lava perfectamente, se seca con alcohol y aire.

RECOMENDACIONES

a) De preferencia usar metales sin montaje, pues siempre hay reacción entre el electrolito y el plástico del montaje; además, así sería más difícil hacer el contacto eléctrico.

- b) Cuando se usan electrolitos a base de ácido perclórico y anhídrido acético, es absolutamente - necesario no poner en contacto con él, ninguna materia orgánica, ya que esto causaría una gran explosión
- c) Tratar de no agitar demasiado la probeta, a fin de no romper la película de electrolito.
- d) Recordar siempre el desengrasar la probeta.
- e) Trabajar siempre dentro de los valores de densidad de corriente dentro de la meseta.
- f) Escoger el electrolito adecuado y observar las condiciones de tiempos y temperaturas.
- g) Si es pulido en celda, se debe disponer - el cátodo de tal manera que los gases desprendidos no entren en contacto con la probeta.
- h) Hay que escoger el cátodo adecuado, tal que no reaccione con el electrolito y que su tamaño - sea suficiente para uniformizar la corriente sobre el ánodo.
- i) Cuando la película de electrolito es poco adherente, se coloca la superficie a pulir, horizontal y hacia arriba; en otro caso es preferible ponerla vertical.
- j) Se debe introducir y sacar la muestra bajo tensión.
- k) Se cubrirán las paredes que no se vayan a pulir con un barniz protector, dejando libre solamente la superficie a pulir.
- l) Se deben tener ciertas medidas ajustadas en la celda, ya que la distancia entre cátodo y ánodo no es arbitraria, en general es de 2 a 5 cm. Se usará un volumen grande de electrolito para tener una refrigeración eficaz.
- m) La unión entre muestra y circuito se hace

con un alambre del mismo material o bien esta conexión queda fuera del electrolito; esto a fin de no crear pares electroquímicos.

n) Evitar el calentamiento del baño de pulido, refrigerando con agua o hielo; se evitan así proyecciones peligrosas.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

a) Permite tener muestras libres de la deformación superficial.

b) No se necesita ser un operador muy hábil, pues casi todas las operaciones son automáticas.

c) No importa mucho la forma de las muestras y en condiciones adecuadas es posible pulir aún muestras complejas.

d) En el caso de metales y aleaciones muy blandas, plomo por ejemplo, es la única manera de tener una superficie verdaderamente representativa de la microestructura.

e) Como no requiere ciclos de pulido ataque, puede ahorrar tiempo y ser más económico que un pulido mecánico.

f) Puede resultar al final del pulido que la probeta tenga alguna capa de óxido u otro compuesto químico, que en general no afecta el ataque posterior pero en algunos casos si es perjudicial.

g) En el caso de aleaciones de varias fases, puede presentarse el caso de que una de ellas se pule preferencialmente, lo cual nos va a dejar relieves.

h) Se llegan a destruir las inclusiones no metálicas por reacción química entre ellas y el electrolito. Si existen zonas de segregación, estas serán atacadas quedando grandes defectos en la superficie.

i) Si se prolonga demasiado el pulido, dejará superficies onduladas llamadas "ripple mark" que

no representan la microestructura real.

ATAQUE ELECTROLITICO

Como ya se vió antes durante el ataque químico, los reactivos ejercen su acción por la disolución selectiva de algún componente, elemento o fase. Pero en ciertos casos, también la acción de ellos se efectúa por la formación de pilas locales; luego tomando esto como base, se puede pensar que también se tendrá un ataque cuando se aplica una diferencia de potencial a la muestra, la cual va sumergida en el electrolito; si se puede controlar a voluntad esta diferencia de potencial se puede gobernar más fácilmente el ataque de la microestructura pudiéndose tener así ataques más selectivos y reproducibles.

El ataque electrolítico en celda es semejante al pulido; pero la intensidad de corriente es mucho más baja pudiendo ser desde una fracción hasta varios amperes; la probeta va como ánodo y el cátodo es de un material insoluble como platino o grafito.

En general los electrolitos y las condiciones de voltaje e intensidad de corriente son diferentes que para el pulido; luego debemos escoger las condiciones adecuadas según el metal que vayamos a atacar.

La técnica y las recomendaciones son las mismas que en el caso del pulido.

OPERACIONES A REALIZAR EN EL LABORATORIO

Se va a pulir una muestra de zinc; usaremos un electrolito de solución acuosa de hidróxido de potasio al 20%, densidad de corriente de 16 amperes por decímetro cuadrado, 6 volts, tiempo de 15 minutos, cátodo de cobre de superficie mayor que la muestra; electrodos separados de 2.5 a 15 mm. Se agita el electrolito con aire o nitrógeno.

Para ello, primero desbastaremos la muestra de zinc hasta papel no 600; conectamos la muestra en el polo positivo y el cátodo en el negativo, los sumergimos en la celda que tiene el electrolito; pulimos en las condiciones dadas; retiramos la probeta, lavamos, secamos y observamos al microscopio.

OBTENCION DE LA CURVA

Una vez observada nuestra probeta y viendo que se tiene un buen pulido, se pone otra vez en la celda, se alcanza el voltaje de pulido y se deja unos minutos hasta estabilizar la intensidad, se anotan lecturas; se baja un poco el voltaje y se deja estabilizar la intensidad, se anotan lecturas; se sigue así bajando sucesivamente; cuando ya se tenga una pequeña fracción de ampere, se saca la probeta, lavarla, secarla y observarla atacada.

Ahora se vuelve a colocar la probeta en la celda y se repule algunos minutos a 6 volts; enseguida se aumenta progresivamente el voltaje, anotando las lecturas de volts y amperes.

Con todos los datos tomados se construye la curva.

FORMACION DE FIGURAS DE CORROSION

La formación de figuras de corrosión requiere tener una superficie libre de metal distorcionado.

La razón de usar las figuras de corrosión es por que ellas nos ponen en evidencia cierto tipos de defectos que se llaman dislocaciones y son de interés en el caso de metales deformados.

Para ello se va a pulir electrolíticamente un latón alfa (condiciones ver Kehel) 65-35; enseguida se ataca con una solución de hiposulfito de sodio al 0.2% durante 60 seg y una densidad de 1.5 amperes por cm cuadrado; enseguida se sumerge durante un se--

gundo en ácido clorhídrico concentrado; se lava, seca y se observan las figuras de corrosión.

FORMACION DE CAPAS EPITAXICAS

Estas son interesantes pues puede ser un método de identificación cualitativa y cuantitativa de fases.

Para ello se pule electrolíticamente aluminio; una vez pulida, se ataca por inmersión en una solución acuosa conteniendo 4% de permanganato de potasio y 2% de hidróxido de sodio.

BIBLIOGRAFIA

- Fundamentos de la Práctica Metalográfica. Kehel.
- Metalografía Microscópica. G. Wyen
- The Electrolytic and Chemical Polishing of Metals i.J. Tegar.

PRÁCTICA # 9

ENSAYO DE DUREZA

Desde el punto de vista ingenieril, el término dureza es generalmente entendido como la resistencia a la penetración basada sobre ensayos estáticos y dinámicos.

Aunque una mejor comprensión de esta relación, entre resistencia a la penetración y dureza ha sido establecida por investigaciones recientes, aún quedan algunos aspectos ingenieriles que requieren mayor ampliación.

Generalmente se reconocen diferentes tipos de durezas, tales como, durezas a la abrasión, maquinado, penetración y durezas medidas por las propiedades eléctricas y magnéticas. Como ejemplo, podemos citar el caso de los aceros al alto Mn, tienen una dureza a la penetración baja, pero debido a sus características de endurecimiento de trabajo, tienen altas durezas abrasivas; mientras que algunos metales y aleaciones pueden tener baja resistencia a la penetración y a la vez ser difíciles de maquinar. Estas discrepancias se deben al hecho de que se adolece de una definición básica de dureza.

Siendo la dureza relacionada a la resistencia a la penetración un importante parámetro, tanto para el control de calidad de productos industriales y para estudios de investigación, en la presente práctica se estudiarán algunos aspectos de ésta.

La resistencia de los metales a la deformación frecuentemente se asocia con sus durezas, y es a la vez importante para determinar sus resistencias a la abrasión y desgaste, aunque no el único parámetro para estos tipos de determinaciones. La mayoría de las determinaciones de durezas se basan en el cálculo

de área de la huella hecha por el penetrador; estos a su vez, pueden ser diferentes formas, de diamante piramidal (Vickers, Knoop) ó esféricos (Brinell, Rockwell) teniendo este último también penetradores de diamante para diferentes cargas de acuerdo a las secciones y tipos de metales que se esten ensayando.

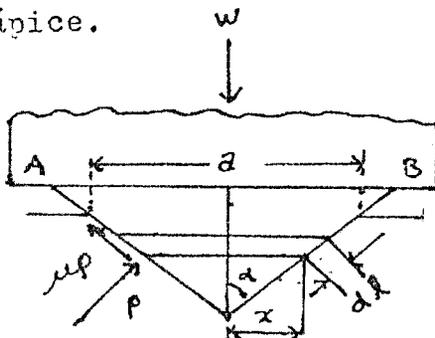
Haciendo una comparación entre los métodos anteriores, se tiene lo siguiente:

En el método Vickers, siendo este muy versátil, una pirámide de base cuadrada es empleada como penetrador, teniendo esta un ángulo de 136° en el ápice.

Las cargas se pueden variar de 1 a 120 Kgs., manualmente por medio de un juego de pesas.

En este ensayo, el mecanismo es hidráulico, se aplica una carga W por fracciones de segundo al penetrador, el cual inicialmente se ajusta para que solamente se acerque a la superficie del metal, con la punta. El empleo de una pirámide con un ángulo tan grande permite minimizar los efectos por fricción.

Si consideramos que una presión normal p actúa sobre el penetrador, entonces considerando una carga tal como AOB, en la figura, el componente vertical de la fuerza oponiéndose a la carga, se puede descomponer en $2xdlp \sin \alpha$ y $2xdl p \cos \alpha$; donde μp es un coeficiente de fricción en la interface diamante-metal, y dl el ancho de una franja a una distancia x sobre la cara del ápice.



Penetración de un material idealmente plástico, por un penetrador de diamante. AOB es una de las caras del penetrador.

$$W = 4p \int_{x=0}^{x=1/2a} (\operatorname{sen} \alpha + \mu \operatorname{cos} \alpha) 2x \, dl$$

$$W = p(1 + \mu \cot \alpha) \int_{x=0}^{x=1/2a} 8x \, dx$$

La integral nos dá el área proyectada por la penetración, a^2 , y Hv (dureza Vickers), estará dada por W/a^2 , entonces:

$$Hv = p(1 + \mu \cot \alpha)$$

Con valores grandes del semi-ángulo del cono empleado el término de fricción \cot es generalmente despreciable comparado con 1, y Hv es igual a p. En la práctica la diagonal de la impresión se mide y se obtiene Hv de tablas.

La máquina de ensayos Brinell consiste en una prensa hidráulica operada manualmente, estando diseñada para forzar un penetrador de bola sobre la superficie del material a ensayar. La carga aplicada por el instrumento tiene un amplio rango de valores. En ensayo normal requiere que el ensayo se haga con una bola de $10 \text{ mm} \pm 0.0025$ de diámetro bajo una carga de 3000 Kgs para materiales ferrosos, ó 500 Kgs para materiales no-ferrosos. Para los metales ferrosos el tiempo que se aplica la carga de unos diez segundos mientras que para la mayoría de los metales no-ferrosos requieren normalmente treinta segundos; en el caso, magnesio, el tiempo requerido es de dos minutos. Posteriormente el diámetro de la impresión se mide con un micrómetro ocular, el cuál esta graduado en décimas de milímetro y permite estimar lecturas hasta una

aproximación de 0.05 mm. Cuando se tienen niveles altos de dureza y se requiere mayor precisión hay microscopios comparativos Brinell que nos dan una aproximación de 0.01 mm.

El número de dureza Brinell es la razón de la carga en Kgs. a la área impresa en milímetros cuadrados, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$HB = W/A$$

donde:

$$A = \pi D \delta = \frac{\pi D^2 (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$$

donde: P = carga en Kgs

D = diámetro de la bola en mm

d = diámetro de la impresión en mm

δ = profundidad de la impresión en mm

Normalmente no se requiere calcular, ya que hay tablas disponibles para convertir el diámetro observado de la impresión a dureza Brinell.

El empleo de dos cargas (3000 Kgs para metales no-ferrosos) y un solo tamaño de penetrador limita este ensayo a secciones de tamaños grandes. Por lo tanto para ensayos piezas de tamaños pequeños, se pueden emplear cargas menores y diámetros de penetradores si la razón de la carga al cuadrado del diámetro de la bola es la misma que de la carga mayor. En la tabla siguiente se ven varias combinaciones en cuanto a diámetro del penetrador y la carga por aplicar para mantener un valor correcto para cada una de las cuatro razones.

METAL	Razón	Carga (Kg) para diversos diámetros (D) para diferentes penetradores.			
		D 1mm	D 2mm	D 5mm	D 10mm
Acero y aleaciones con durezas similares	30	30	120	750	3000
Aleaciones de cobre y materiales con durezas similares	10	10	40	250	1000
Cobre y materiales de dureza similares	5	5	20	125	500
Plomo, estaño y materiales con durezas similares	1	1	4	25	100

La carga de ensayo; D diámetro de la bola; en la práctica es recomendable llevar una secuencia al dar valores de dureza Brinell, y se emplea de la siguiente manera: "HB (10/3000/30)", lo cual indica diámetro en mm., carga del ensayo Kg. y duración de aplicación de carga seg.

Otro aspecto interesante de la dureza Brinell es la relación de tipo empírico por medio de la cual se puede determinar, para los aceros, la resistencia a la tracción, siendo esta la siguiente ecuación:

$$\sigma_r = H B C$$

donde:

σ_r = resistencia máxima a la tracción en Kg/mm² ó lb/mm²

C = constante

HB = dureza Brinell

Un valor promedio de C para los aceros es de 500, que se confirma por resultados dados en la siguiente tabla. Tabor discute esta relación en más detalles e indica que es independiente de la naturaleza del metal. Esta relación es muy útil ya que de resultados de resistencia a la penetración en un ensayo se

pueden determinar la máxima resistencia a la tracción y sobre todo en casos donde se tiene insuficiente material para maquinar probetas y ensayarlas en una máquina Universal.

RELACION ENTRE RESISTENCIA A LA TRACCION
Y DUREZAS BRINELL PARA ACEROS

ACERO	CONDICION	r Kg/lmm ²	HB	C
0.12% C	Normalizado	46	128	505
0.26% C	Normalizado	55	159	495
0.65% C	Laminado	84	236	503
0.35% C 0.84% Ni	Templado en aceite y	94	262	510
1.0% Cr 0.95% Mo	revenido			
0.32% C 3.7% Ni 1.4% Cr	Endurecido en aire y revenido	182	479	540

PRUEBAS ROCKWELL

Los ensayos Rockwell dependen de la medición de la profundidad diferencial de una deformación permanente, producida al aplicarse y eliminarse las cargas. Se utilizan diversas cargas así como penetradores para adaptar las distintas pruebas de Rockwell a materiales de diferentes durezas y espesores, así como composiciones. Entre los penetradores tenemos diamantes de formas cónicas, conocidos como Brale, y bolas de acero endurecido, cuyos diámetros varían de 1/16 a 1/2 pulgada. El diámetro cónico tiene un ángulo de apertura de 120° y un radio de 0.2 mm., en la punta.

Las pruebas Rockwell estandar requieren el empleo de una carga ligera de 10 Kgs., para asentar firmemente el penetrador a la superficie de la muestra; ésta se denomina carga menor. Posterior a la

aplicación de la carga menor, se calibra a cero y se aplica a la carga mayor permitiendo un tiempo suficiente, posteriormente se retira; y mientras aún este actuando la carga menor se hace la medición de la profundidad de la penetración permanente.

El indicador de profundidad, que sirve para medir la penetración, se calibra en forma tal que su lectura se haga directamente en índices de dureza, y no en unidades de longitud. Siendo las gargas más usuales para las pruebas Rockwell de 60, 100 y 150 Kgs

Las pruebas superficiales Rockwell se utilizan para medir la dureza de las muestras delgadas y en los casos donde se tiene una superficie o capa delgada endurecida sobre una base blanda.

Los penetradores existentes para este tipo de ensayos son los mismos empleados para las pruebas estandar. Las cargas para estas pruebas son más ligeras que para las pruebas normales; teniéndose una carga inicial de 3 Kgs. y las cargas mayores variando desde 15, 30 y 45 Kgs. La amplia gamma de combinaciones que se pueden hacer de penetradores y cargas permite la adaptación de la prueba Rockwell a una variedad igualmente amplia de materiales de diversas características. El penetrador de diamante permite probar fácilmente los aceros más duros y las bolas grandes - permite el ensayo de materiales blandos e incluso, plásticos. En general se considera que, las pruebas Rockwell no son destructivas ya que las cargas pequeñas y penetradoras producen impresiones diminutas; sin embargo, se deben tomar varias lecturas para obtener un resultado o promedio significativo. Además cuanto menores sean las impresiones tanto mayor cuidado se deberá tener al preparar la superficie.

PRECAUCIONES QUE DEBEN TOMARSE EN LAS PRUEBAS DE DUREZA.

PREPARACION DE LA SUPERFICIE

La superficie de la muestra se debe preparar con cierto esmero. Esta preparación depende del tamaño de la impresión que se produzca, de modo que para el ensayo Brinell es apropiada una superficie desbastada, incluso, con costra de óxidos. Los ensayos Rockwell requieren una superficie esmerilada o finalmente labrada a máquina.

ESPESOR DE LA MUESTRA

La muestra deberá tener un espesor tal que la impresión, si aparece del otro lado, esto indica que el yunque del probador soportó la carga, parcialmente.

En este caso los resultados estarán sujetos a errores. Es evidente que el ensayo Brinell se necesitan las muestras gruesas, mientras que las más delgadas son aceptables debido a las cargas bajas disponibles con las demás escalas.

PROXIMIDAD DE IMPRESIONES

Puesto que el penetrador produce un endurecimiento por trabajo del metal, en las cercanías de la impresión, las lecturas sucesivas que se tomen demasiado cerca unas de otras pueden ser elevadas (sin embargo, es posible que una lectura coincida parcialmente con una anterior dándonos un resultado muy bajo por falta de área de apoyo). El área de endurecimiento por trabajo se extiende a una área de su diámetro.

SUPERFICIES DE LAS MUESTRAS

Al medir superficies no-planas se producen errores; pero se reducen al mínimo si se usan cargas ligeras y pequeñas penetraciones de poca profundidad. Las superficies cóncavas suelen producir errores en -

el lado de arriba y las convexas en el de abajo. Por lo tanto, si la forma de la muestra produce una acción de resorte, las lecturas tienden a ser bajas. Las láminas y los flejes doblados deben colocarse en el yun que con el lado convexo hacia abajo, para eliminar la acción resorte.

PERPENDICULARIDAD DE LA DIRECCION DE APLICACION DE LA CARGA A LA SUPERFICIE DE LA MUESTRA.

El movimiento del penetrador bajo la carga - debe estar en ángulo recto con la superficie de la - muestra. Cuando esta última no está en ángulo recto - con la dirección de aplicación de la carga, resultan bajas las lecturas.

RAPIDEZ DE APLICACION Y DURACION DE LA CARGA

Las cargas se aplican lentamente por medio - de cámaras de aire o dispositivos mecánicos que evi - tan los efectos de inercia.

La rapidez de aplicación y duración de la - carga deben ser tales que el material pueda responder a la carga.

MAQUINA GNEHM

Esta máquina está diseñada para llevar a cabo ensayos Rockwell, así como Rockwell superficiales. La proporción de la dureza Rockwell resulta de la profundidad de la impresión. Para obtener una impresión de profundidad exacta, trabajamos con una carga menor. - Primero, entra el penetrador a través de la superfi - cie de la muestra con la carga menor. Esta es la posi - ción primera: en esta posición la carátula es puesta en cero. Posteriormente la carga principal o mayor se aplica, con el auxilio de un amortiguador de aceite. En cuanto la manecilla se para, se quita la carga ma - yor. El penetrador reposa, ahora, aún en la impresión pero bajo la carga menor, el valor de la dureza se -

lee directamente en la carátula.

Las diferentes cargas se pueden poner con la ayuda del botón de cargas. Al cambiar de 45 a 60 Kgs. la carga menor será automáticamente elevada de 3 a 10 Kgs.

La carátula está completamente con la "posición de cero" automática. Sucede que a veces por movimientos el cero queda fuera de lugar con respecto a la manecilla una vez que se ha aplicado la carga menor, en estos casos se corrige esta situación girando el anillo sobre la carátula y ajustando a cero con la escala negra. Esta posición de cero es válida para cualquier procedimiento.

Los resultados de los ensayos se leen directamente en las siguientes escalas:

Ensayos con penetradores de diamante: dentro de la escala negra.

Ensayos con penetradores de bolas: escala con números rojos.

Ensayos de pruebas superficiales con diamante y con bolas: fuera de la escala negra.

PASOS A SEGUIR

ENSAYO ROCKWELL

a) Una vez preparada la superficie de la muestra se pone sobre el yunque, y se eleva hasta que el penetrador haga contacto y la manecilla pequeña coincida con el punto rojo.

b) Enseguida, se aplica la carga mayor bajando la palanca.

c) Se espera a que se estabilice la manecilla grande, se retira la carga mayor subiendo la palanca y se toma la lectura.

ENSAYO BRINELL

Antes de empezar el ensayo se debe cerciorar

uno de que las cargas sean correctas para la respectiva bola. El acero se ensaya con una carga de 3000 Kgs con un penetrador de 10 mm de diámetro. Una carga de 750 Kgs requiere una bola de 5 mm de diámetro y para una carga de 187.5 Kgs una de 2.5 mm

a) Se ajusta la muestra a ensayar contra el penetrador y se presiona ligeramente contra este.

b) Se bombea con la palanca una vez que se haya cerrado la válvula, hasta que las pesas comiencen a ascender. La carga se mantiene constante mientras que las pesas se encuentren en posición elevada.

c) Se abre la válvula; esto da como resultado que las pesas se bajen y que el aceite se libere.

d) Girando el volante se retira la muestra y se procede a la evaluación del diámetro de impresión por medio de un micrómetro ocular. Ya sea por medio de cálculos ó de tablas se obtienen los números de Brinell.

ENSAYO VICKERS

a) El pedal se debe oprimir a manera de cargar la máquina.

b) El área que deberá ser ensayada deberá estar limpia y lisa, habiendo sido ésta puesta en la plataforma, se eleva ésta última hasta que la superficie por ensayar apenas libre la punta del penetrador. Se puede encender una lámpara como auxilio para poder hacer este ajuste.

c) Se oprime el botón de color negro y procede a efectuarse el ensayo, el cual al concluir se denota por un sonido que hace el aparato. Si la muestra se ha dejado demasiado separada de la punta del diamante hay un sistema de alarma que avisa ésta situación; si esto sucede se espera hasta que la máquina descargue sola.

d) Se baja la plataforma de tal manera que se pueda ajustar la muestra debajo del microscopio por medio de una palanca que controla el movimiento horizontal de la misma. Al enfocar la muestra el ajuste grueso se hace por medio de la plataforma y el ajuste fino se encuentra en el microscopio mismo. Las medidas se hacen a través de las diagonales de las esquinas de las impresiones cuadradas de la manera siguiente:

El filo de la navaja izquierda es ajustado por medio de botones del lado izquierdo del micrómetro, de tal manera que corresponda a la esquina izquierda de la impresión. Y el filo de la navaja derecha se controla por medio del tornillo micrométrico que está insertado en la rueda de engranes a la derecha; se gira ésta hasta que coincida con la esquina derecha dándonos una cifra en el contador.

e) Las cifras que aparecen en el contador ocular son convertidas a números Vickers por medio de tablas.

f) En caso que se desee leer cada una de las diagonales de la impresión, el micrómetro tiene un tope el cual se puede rebasar permitiendo una rotación de 90° .

RECOPIACION DE DATOS

Se obtendrán varios resultados de cada uno de los tres ensayos; los cuales se formularán en una tabla en columnas correspondientes a los tres métodos y además los valores, en el caso de aceros, de las resistencias máximas a la tracción obtenibles por medio de la fórmula empírica.

BIBLIOGRAFIA

ASTM Standars, J. O. y P. H. Black, Residual -
Stresses and Fatigue in Metals, McGraw-Hill Book Co., -
Inc. New York, 1963.

Davis, H. E., G. E. Troxell, C. T. Wiskocil, -
Testing and Inspection of Engineering Materials, 3a Ed.
McGraw-Hill Book Co.

Rawlings, S. R., Hardness and Hardness Measure-
ments, A.S.M.

PRACTICA # 10

ENSAYO DE TRACCION

COMPORTAMIENTO ELASTICO Y PLASTICO. La experiencia demuestra que todos los materiales sólidos se deforman sometiéndolos a una carga externa. Se encuentra además que, hasta cierta carga límite, el sólido recobra sus dimensiones originales cuando se le descarga. La recuperación de las dimensiones originales al eliminar la carga es lo que caracteriza al comportamiento elástico. La carga límite por encima de la cual el material ya no se comporta elásticamente es el límite elástico. Si se sobrepasa el límite elástico, el cuerpo retiene cierta deformación permanente cuando deja de actuar la carga. Un cuerpo que se ha deformado permanentemente se dice que ha sufrido una deformación plástica.

Para la mayor parte de los materiales, en tanto que la carga no supere al límite elástico, la deformación es proporcional a la carga. Esta relación es conocida como la ley de Hooke; es más frecuente expresarla diciendo que las tensiones son proporcionales a las deformaciones. La ley de Hooke requiere que la relación entre carga y deformación sea lineal. Sin embargo, no debe pensarse que en todos los materiales que se comportan elásticamente la relación entre carga y deformación es necesariamente lineal. El caucho es un ejemplo de material que muestra una relación no lineal entre carga y deformación y que satisface a la definición de material elástico.

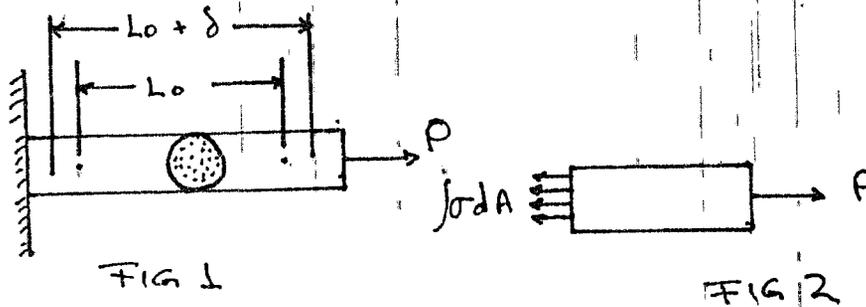
Las deformaciones elásticas de los metales son muy pequeñas y requieren instrumentos muy sencillos.

bles para medirlas. Los instrumentos ultrasensibles han demostrado que los límites elásticos de los metales son mucho más bajos que los medidos usualmente en los ensayos técnicos de materiales. Cuanto más sensible es el aparato de medida, tanto más decrece el límite elástico, por lo que para la mayoría de los metales solo se cumple exactamente la ley de Hooke en un intervalo de cargas muy pequeñas. Este hecho, sin embargo, es más bien de importancia especulativa, y la ley de Hooke sigue siendo una relación válida para los proyectos de ingeniería.

TENSION Y DEFORMACION MEDIAS. Como punto de partida para el análisis de tensiones y deformaciones consideremos una barra cilíndrica uniforme sujeta a una carga axial de tracción. Supongamos que se marcan dos puntos de referencia en la superficie de la barra en el estado sin deformación y sea L_0 la distancia entre puntos, es decir, entre esas marcas. Se aplica una carga P a un extremo de la barra y la distancia entre puntos experimenta un ligero aumento de longitud, mientras se produce una disminución del diámetro. La distancia entre puntos ha aumentado en una cantidad δ , que llamamos deformación. La deformación lineal media "e" es la relación de la variación de longitud a la longitud inicial.

$$e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [1]$$

La deformación es una magnitud sin dimensiones, porque δ y L_0 se expresan en las mismas unidades.



La fig 2 muestra el esquema de cuerpo libre para la barra de la fig 1. La carga externa P está equilibrada por la fuerza resistente interna $\int \sigma dA$, donde σ es la tensión normal al plano del corte, y A , la sección transversal de la barra. La ecuación de equilibrio es,

$$P = \int \sigma dA \quad [2]$$

Si la tensión está uniformemente distribuida sobre el área A , esto es, si σ es constante, la ecuación 2 se convierte en

$$P = \sigma \int dA = \sigma A$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [3]$$

La tensión no será en general uniforme sobre toda el área A y entonces la ec. 3 expresa una tensión media. Para que la tensión fuera absolutamente uniforme sería preciso que cualquier elemento longitudinal de la barra hubiese experimentado exactamente la misma deformación, y la proporcionalidad entre tensión y deformación habría de ser idéntica para todos los elementos. La anisotropía inherente a los granos de un metal policristalino excluye la posibilidad de la uniformidad completa de la tensión sobre un cuerpo de ta

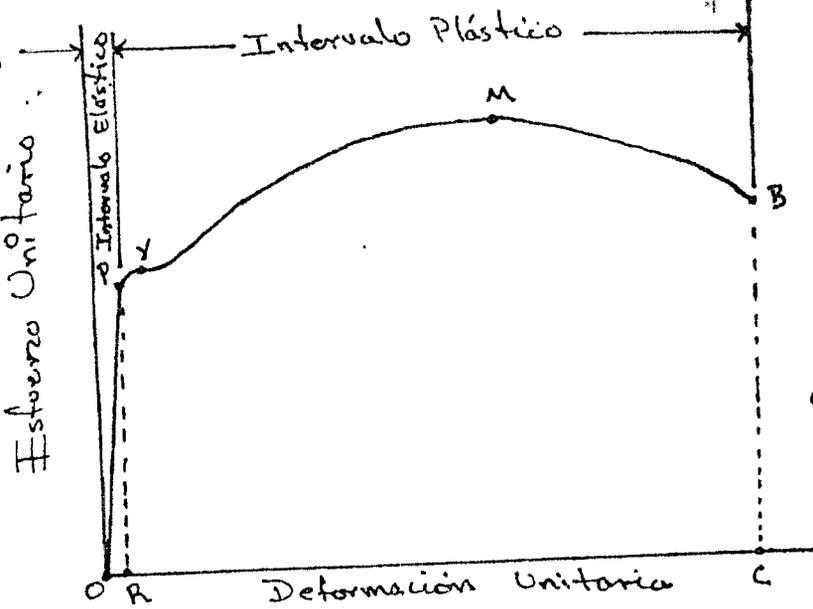


FIG 3

GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA UN ACERO DÚCTIL

FIG 4

GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA UN MATERIAL FRÁGIL

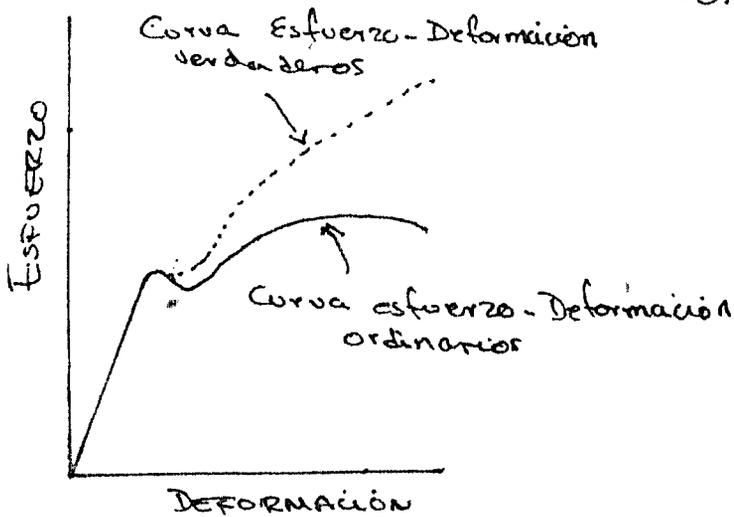
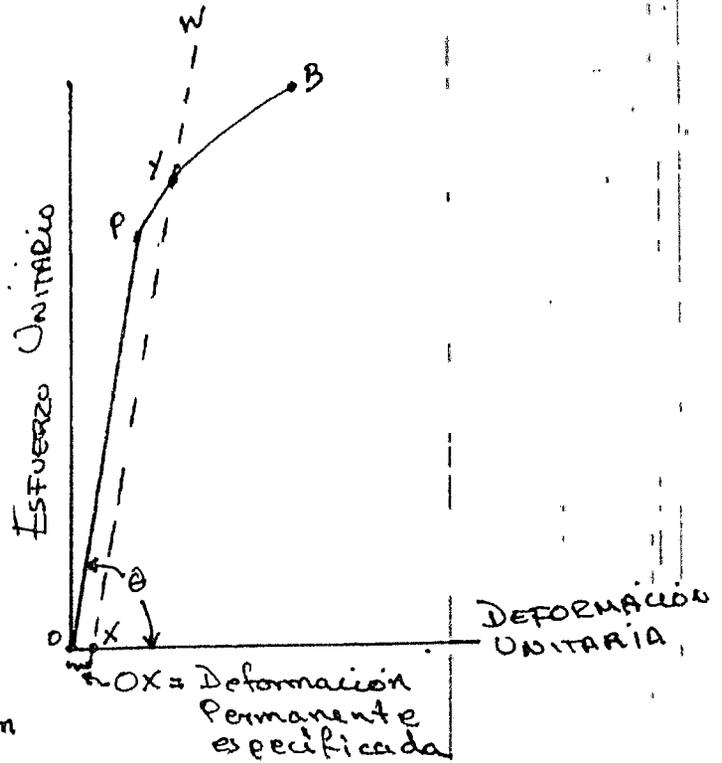


FIG 5

GRÁFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN VERDADEROS Y ESFUERZO-DEFORMACIÓN CONVENCIONALES PARA UN ACERO DÚCTIL.

maño macroscópico. La presencia de más de una fase da lugar a la falta de uniformidad de la tensión en escala microscópica. Si la barra no es recta o no está centralmente cargada, serán diferentes las deformaciones de ciertos elementos longitudinales y la tensión no será uniforme. Una pérdida extrema de la uniformidad del diagrama de tensiones se presenta cuando hay cambios bruscos en la sección transversal. En este caso se produce una concentración de tensiones.

Por debajo del límite elástico cabe considerar válida la ley de Hooke, por lo que la tensión media es proporcional a la deformación media.

$$\frac{\sigma}{e} = E = \text{cte.}$$

La constante E es el módulo de elasticidad, módulo elástico o módulo de Young.

PRUEBA O ENSAYO DE TENSION. Después de la prueba de dureza, la prueba de tensión es la realizada más frecuentemente para determinar ciertas propiedades mecánicas. Una muestra o probeta preparada específicamente se coloca en las cabezas de la máquina de prueba y se somete a una carga axial por medio de un sistema de carga de palanca, mecánico o hidráulico. La fuerza se indica en un disco calibrado. Si se conoce el área transversal original de la muestra, puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide en una longitud establecida, generalmente 2 pulg, por un disco medidor llamado extensómetro. Entonces la deformación unitaria puede determinarse dividiendo el alargamiento medido entre la longitud original marcada en la probeta.

La fig 3 muestra la relación entre esfuerzo

unitario's y deformación unitaria ϵ , encontrada experimentalmente, mediante la gráfica esfuerzo-deformación para un material dúctil y la gráfica de la fig 4 para un material frágil.

PROPIEDADES TENSILES. Las propiedades que se pueden determinar con una prueba de tensión serán:

Límite proporcional. Para muchos materiales estructurales se ha encontrado que la parte inicial de la gráfica esfuerzo-deformación puede ser aproximada por la recta OP de las fig 3 y 4. En este intervalo, el esfuerzo y la deformación son proporcionales entre sí, de manera que cualquier incremento de esfuerzo resultará de un aumento proporcional a la deformación. El esfuerzo en el límite del punto de proporcionalidad P se conoce como límite de proporcionalidad.

Límite elástico. Si se retira una pequeña parte de la carga aplicada sobre la pieza a prueba, la aguja del extensómetro regresará a cero, indicando que la deformación producida por la carga es elástica. Si la carga se aumenta continuamente, se libera después de cada incremento y se revisa el extensómetro, entonces alcanzará un punto donde la aguja no retrocederá a cero. Esto indica que ahora el material tiene una deformación permanente; por tanto, el límite elástico puede definirse como el esfuerzo mínimo al que ocurre la primera deformación permanente. Para la mayoría de los materiales estructurales, el límite elástico tiene casi el mismo valor numérico que el límite de proporcionalidad.

Punto de cedencia y fluencia. Conforme la carga en la pieza a prueba aumenta más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al cual el material continúa deformándose sin que se haya incrementa

do la carga. El esfuerzo en el punto Y de la fig 3 se conoce como punto de cedencia o fluencia. Este fenómeno ocurre solo en ciertos materiales dúctiles. El esfuerzo puede disminuir realmente por un momento, resultando en un punto de cedencia superior y en uno inferior. Como el punto de cedencia es realmente fácil de determinar y la deformación permanente es pequeña hasta el punto de cedencia, constituye un valor muy importante de considerar en el diseño de muchas partes para maquinaria cuya utilidad se afectaría si ocurriera una gran deformación permanente. Esto es válido solo para materiales que exhiben un punto de cedencia bien definido.

Resistencia de cedencia o fluencia. La mayoría de los materiales no ferrosos y los aceros de alta resistencia no tienen un punto de cedencia definido. Para estos materiales, la máxima resistencia útil corresponde a la resistencia de cedencia, que es el esfuerzo al cual un material exhibe una desviación limitante especificada de la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. Por lo general, este valor se determina por el "método de la deformación permanente especificada". En la fig 4 la deformación especificada OX se marca sobre el eje de la deformación - enseguida, se traza la línea XW paralela a la OP, localizando de esta manera el punto Y y la intersección de la línea XW con el diagrama esfuerzo-deformación. El valor del esfuerzo en el punto Y indica la resistencia de cedencia o fluencia. El valor de la deformación permanente especificada está generalmente entre 0.10 y 0.20 % de la longitud calibrada.

Resistencia límite. Conforme aumenta la carga aplicada sobre la pieza a prueba, el esfuerzo y la deformación se incrementan, como lo indica la porción -

de la curva YM (fig 3) para un material dúctil, hasta que se alcanza el esfuerzo máximo en el punto M; por tanto, la resistencia límite o la resistencia de tensión es el esfuerzo máximo desarrollado por el material basado en el área transversal original. Un material frágil se rompe cuando es llevado hasta la resistencia límite (punto B de la fig 4) en tanto que el material dúctil continuará alargándose.

Resistencia a la ruptura. Para un material dúctil, hasta el punto de resistencia límite, la deformación es uniforme a lo largo de la longitud de la barra. Al esfuerzo máximo, la muestra experimenta una deformación localizada o formación de cuello y la carga disminuye conforme el área decrece. Esta elongación en forma de cuello es una deformación no uniforme y ocurre rápidamente hasta el punto en que el material falla. La resistencia a la ruptura (punto B fig 3), determina al dividir la carga de ruptura entre el área transversal original, es siempre menor que la resistencia límite. Para un material frágil, la resistencia límite y la resistencia de ruptura coinciden.

ESFUERZO-DEFORMACION VERDADEROS. La prueba convencional de tensión descrita antes dará valiosa información hasta aproximarse y llegar al punto de cedencia. Más allá de este punto, los valores de esfuerzo son ficticios, ya que el área transversal real se reducirá considerablemente. El esfuerzo verdadero se determina al dividir la carga entre el área transversal existente a esa intensidad de carga. La deformación real se determina al dividir el cambio de longitud entre la longitud inmediatamente precedente. El diagrama esfuerzo-deformación real (fig 5) da información útil concerniente al flujo plástico y la fractura de metales.

TRABAJO PRACTICO

Haciendo uso de la Máquina Universal Shimadzu tipo UMH realizar un ensayo de tracción para un material dúctil y uno frágil. Determinar el límite elástico, la resistencia límite, la elongación y la reducción en área.

BIBLIOGRAFIA

Introducción a la Metalurgia Física. Sidney H. Avner. Mc Graw Hill.

Metalurgia Mecánica, George E. Dieter. Aguilar.