



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

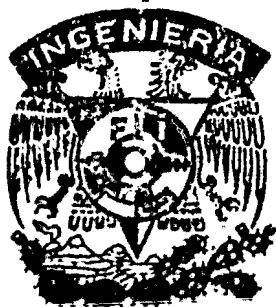
LA DILATOMETRIA APLICADA A LAS TRANSFORMACIONES  
ALOTROPICAS DE LOS ACEROS

## TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de  
LICENCIADO EN INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

presentan

FERNANDO SILVAR GOMEZ  
JAVIER CARNALLA RAMIREZ  
JOSE SERGIO CASTAÑEDA SANCHEZ



MEXICO, D. F.

1983



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

I N T R O D U C C I O N	1
-------------------------	---

### C A P I T U L O I

#### INTRODUCCION A LA METALURGIA

##### 1.1) GENERALIDADES

1.1.1) Estructura Atómica de los Elementos	2
1.1.2) Clasificación de los Elementos	9
1.1.3) Enlaces Atómicos	11
1.1.3.1) Enlace Iónico	12
1.1.3.2) Enlace Covalente	13
1.1.3.3) Enlace Metálico	15

##### 1.2) ESTRUCTURA CRISTALINA

1.2.1) Diámetro Atómico	16
1.2.2) Número de Coordinación	17
1.2.3) Celda Unitaria	18

##### 1.3) NOTACION CRISTALINA

1.3.1) Indices de Dirección o Indices de Miller	20
1.3.2) Indices de Planos	21

##### 1.4) SISTEMAS CRISTALINOS COMUNMENTE ENCONTRADOS EN LOS METALES

1.4.1) Factor de Acomodamiento Atómico	25
1.4.2) Celda Cúbica Centrada en el Cuerpo (CCCu)	
1.4.3) Celda Cúbica Centrada en las Caras (CCCa)	26
1.4.4) Celda Exagonal Compacta	27
1.4.5) Alotropía	29

B I B L I O G R A F I A	31
-------------------------	----

### C A P I T U L O II

#### DILATOMETRIA

##### 2.1) INTRODUCCION

2.1.1) Dilatación	32
2.1.2) Reseña Histórica	

2.1.3) Dilatometría (Definición)	38
2.1.4) Dilatómetro	
2.2) DILATACION TERMICA	
2.2.1) Energía Interna	
2.2.2) Coeficiente de Expansión Térmica	40
2.3) TERMODINAMICA DE LAS TRANSFORMACIONES ALOTROPICAS	
2.3.1) Entalpía	44
2.3.2) Entropía	46
2.3.3) Energía Libre de Gibbs	47
2.3.4) Transformaciones Alotrópicas	51
2.4) ANALISIS EXPERIMENTAL DE LAS TRANSFORMACIONES ALOTROPICAS	
2.4.1) Análisis Térmico Diferencial	53
2.4.2) Análisis Radio Cristalográfico	56
2.4.3) Análisis Térmico Dilatométrico	60
B I B L I O G R A F I A	64

### C A P I T U L O    I I I

#### EQUIPOS PARA DILATOMETRIA

3.1) DILATOMETROS NETZSCH-GERATEBAU GMBH SELB	
3.1.1) Características	65
3.1.2) Modelo 402 E	
3.1.2.1) Especificaciones	69
3.1.3) Modelo 402 EP	
3.1.4) Modelo 402 ET	71
3.1.5) Modelo 402 ES	72
3.1.6) Modelo 402 EV	73
3.2) DILATOMETROS THETA	
3.2.1) Características	
3.2.2) Modelo Dilatronic I	
3.2.3) Modelo Dilatronic II	74
3.2.4) Modelo Dilatronic III	75
3.2.5) Modelo Dilatronic IV	
3.2.6) Modelo Dilatronic V	76

3.2.7) Modelo Dilatronic VI	77
3.2.8) Modelo Dilatronic VII	
3.2.9) Modelo Dilatronic X	78
3.2.9.1) Especificaciones	
3.3) DILATOMETROS HARROP	
3.3.1) Características	80
3.3.2) Principio de Operación	
3.3.3) Modelo TDA-H1	
3.3.3.1) Especificaciones	82
3.3.4) Modelo TDA-H2	
3.3.4.1) Especificaciones	84
3.4) DILATOMETROS ORTON	
3.4.1) Características	
3.4.2) Principio de Operación	85
3.4.3) Modelos ES y EK	86
3.5) DILATOMETROS CARBORUNDUM	
3.5.1) Características	88
3.5.2) Modelos TD-710 y 716	
3.5.2.1) Especificaciones	89
3.6) DILATOMETROS EKO	
3.6.1) Características	90
3.6.2) Modelo (Dilanorm) Highdila	
3.6.2.1) Especificaciones	91
3.7) DILATOMETROS ADAMEL LHOMARGY	
3.7.1) Modelo DD.01	92
3.7.1.1) Componentes y Partes	94
3.7.1.2) Especificaciones	96

## C A P I T U L O    I V

### PUNTOS CRITICOS DE LOS ACEROS

4.1) DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO	
4.1.1) Características Generales	98
4.1.2) Obtención de los diagramas	99

4.1.3) Composición Química de las Fases	101
4.1.4) Regla de la Palanca	102
4.1.5) Reacciones en los Diagramas de Equilibrio	103
4.2) ALEACION FIERRO-CARBONO	
4.2.1) Curva de Enfriamiento de Hierro Puro	105
4.2.2) Diagrama de Equilibrio Hierro-Carbono	108
4.2.2.1) Hierro $\alpha$ o Ferrita	109
4.2.2.2) Hierro $\gamma$ o Austenita	
4.2.2.3) Cementita o Carburo de Hierro	
4.2.2.4) Perlita	110
4.2.2.5) Ledeburita	
4.3) CLASIFICACION DE LOS ACEROS	
4.4) OBTENCION DE LOS PUNTOS CRITICOS	
4.4.1) Espécimen	113
4.4.2) Ensayo	
4.4.3) Resultados Gráficos	114
4.4.3.1) Acero GB1 (1015)	115
4.4.3.2) Acero 1020	116
4.4.3.3) Acero GB4 (1045)	117
4.4.3.4) Acero GB6 (1060)	118
4.4.3.5) Acero WA 255 (S1)	119
4.4.3.6) Acero W10V (H2)	120
4.4.3.7) Acero CA 1215 (D2)	121
4.4.3.8) Acero CA 1220 (D3)	122
4.4.3.9) Comentarios a las Gráficas	123
B I B L I O G R A F I A	125
C O N C L U S I O N E S	126

## INTRODUCCION

Este trabajo, es un intento por hacer adecuada y lógica la comprensión de lo que son los puntos críticos de los aceros - como parte del fenómeno físico de su dilatación.

Para comprender la dilatación y el por que de los puntos críticos de los aceros se requiere conocer de que manera están constituidos, tratándose por esto primeramente el aspecto metalúrgico. Así pues, conociendo la estructura atómica de los metales se hace un análisis energético y termodinámico para justificar la dilatación y los cambios de estructura de los materiales. Posteriormente se mencionan técnicas de análisis de las transformaciones y dilataciones, así como los equipos comerciales para laboratorio. Finalmente se hace el estudio de la aleación hierro-carbono donde se llevan a cabo las pruebas dilatométricas de algunos aceros, verificandose en sus gráficas de dilatación contra temperatura cambios drásticos en su pendiente, producto del cambio estructural ocurrido en el material, que es el objeto del presente trabajo.

C A P I T U L O I  
INTRODUCCION A LA METALURGIA

1.1) GENERALIDADES

1.1.1) ESTRUCTURA ATOMICA DE LOS ELEMENTOS

En la actualidad se conocen más de un centenar de sustancias llamadas elementos que son aquellas que no pueden ser descompuestas en otras más sencillas por el tipo ordinario de cambio químico.

Roberto Boyle (1661) estableció que los elementos son las sustancias más sencillas que se conocen y que poseen la característica de no poderse transformar en otra más simple. Lavoisiere (1787) dá una definición de carácter más experimental diciendo que: Elemento, es todo cuanto consigamos como último resultado del análisis químico.

El conocimiento en años más recientes de la estructura



atómica y el método ideado por Moseley, empleando los rayos X, para determinar el número de protones en el núcleo, que es igual al número de electrones planetarios, permitió dar a cada elemento un número atómico. Basándonos en esto, actualmente se considera que elemento es la sustancia formada por átomos de igual número atómico (véase figura I.1).

Los filósofos griegos Leusipo, Demócrito (siglo V a.J. C.), Epicuro y el latino Lucrecio concibieron y admitieron que la materia no era continua y estaba constituida por partículas pequeñísimas e indivisibles, a las cuales llamaron átomos, que se encuentran separados uno de otros por considerables espacios vacíos, y dotados de constante movimiento como una propiedad inherente a ellos.

En 1803 John Dalton tomó esta teoría y dió el paso para hallar las relaciones entre los pesos de los átomos de las sustancias.

La hipótesis atómica admite que cada elemento está formado por partículas de tamaño extraordinariamente pequeño, aunque finito y determinable, de naturaleza idéntica a la del elemento pero diferentes entre sí de un elemento a otro.

En 1897 Joseph J. Thomson descubrió en los tubos de rayos catódicos, partículas de electricidad negativa a las que llamó electrones. Los trabajos de Ernest Rutherford (1897) dieron con el descubrimiento del protón, partícula con una carga eléctricamente positiva. Experiencias de esta índole sirvieron a su-

FIGURA I.1

Símbolo químico, número y peso atómico de los elementos

Elemento	Sím-bolo	N.º At	Peso At	Elemento	Sím-bolo	N.º At	Peso At
Actinio	Ac	89	227	Mercurio	Hg	80	200,61
Aluminio	Al	13	26,98	Molibdeno	Mo	42	95,95
Americio	Am	95	243	Neodimio	Nd	60	144,27
Antimonio	Sb	51	121,76	Neón	Ne	10	20,183
Argón	A	18	39,944	Neptunio	Np	93	237
Arsénico	As	33	74,91	Niquel	Ni	28	58,69
Astato	At	85	211	Niobio	Nb	41	92,91
Bario	Ba	56	137,36	(Columbio)	(Cb)		
Berkelio	Bk	97	247	Nitrógeno	N	7	14,008
Berilio	Be	4	0,013	Osmio	Os	76	190,2
Bismuto	Bi	83	209,00	Oxígeno	O	8	16,000
Boro	B	5	10,82	Paladio	Pd	46	196,7
Bromo	Br	35	79,916	Fósforo	P	15	30,975
Cadmio	Cd	48	112,41	Platino	Pt	78	195,23
Calcio	Ca	20	40,08	Plutonio	Pu	94	242
Californio	Cf	98	251	Polonio	Po	84	210
Carbono	C	6	12,011	Potasio	K	19	39,100
Cerio	Ce	58	140,13	Praseodimio	Pr	59	140,92
Cesio	Cs	55	132,91	Promecio	Pm	61	145
Cloro	Cl	17	35,457	Protactinio	Pa	91	231
Cromo	Cr	24	54,01	Radio	Ra	88	226,05
Cobalto	Co	27	58,94	Radón	Rn	86	222
Cobre	Cu	29	63,54	Rhenio	Re	75	186,31
Curio	Cm	96	247	Rhodio	Rh	45	102,91
Disproscio	Dy	66	162,46	Rubidio	Rb	37	85,48
Einsteinio	E	99	245	Rutenio	Ru	44	101,1
Erbio	Er	68	167,2	Samario	Sm	62	150,43
Europio	Eu	63	152,0	Escandio	Sc	21	44,96
Fermio	Fm	100	253	Selenio	Se	34	78,96
Fluor	F	9	19,00	Silicio	Si	14	28,09
Francio	Fr	87	233	Plata	Ag	47	107,880
Gadolinio	Gd	64	156,9	Sodio	Na	11	22,991
Galio	Ga	31	69,72	Estroncio	Sr	38	87,63
Germanio	Ge	32	72,60	Azufre	S	16	32,066
Oro	Au	79	197,0	Tantalo	Ta	73	180,95
Hafnio	Hf	72	178,6	Tecnecio	Tc	43	98
Helio	He	2	4,003	Teluro	Te	52	127,61
Holmio	Ho	67	164,94	Terbio	Tb	65	158,93
Hidrógeno	H	1	1,008	Talio	Tl	81	204,39
Indio	In	49	114,76	Torio	Th	90	232,05
Iodo	I	53	126,91	Tulio	Tm	69	168,94
Iridio	Ir	77	192,2	Estaño	Sn	50	118,70
Hierro	Fe	26	55,85	Titanio	Ti	22	47,90
Kriptón	Kr	36	83,80	Tungsteno	W	74	183,92
Lantano	La	57	138,92	Uranio	U	92	238,07
Lawrencio	Lw	103	257	Vanadio	V	23	50,95
Plomo	Pb	82	207,21	Xenón	Xe	54	131,3
Litio	Li	3	6,940	Iterbio	Yb	70	173,04
Lutecio	Lu	71	174,99	Itrio	Y	39	88,92
Magnesio	Mg	12	24,32	Zinc	Zn	30	65,38
Manganeso	Mn	25	54,94	Zirconio	Zr	40	91,22
Mendelevio	Mv	101	256				

Nota: El elemento de número atómico 102, y peso atómico 254 no ha recibido nombre oficial.

therford para establecer en 1911 el concepto moderno de estructura atómica.

Actualmente se sabe que todos los átomos de todos los elementos tienen la misma estructura general y están formados fundamentalmente por tres clases de partículas: protones, electrones y neutrones. (véase figura I.2).

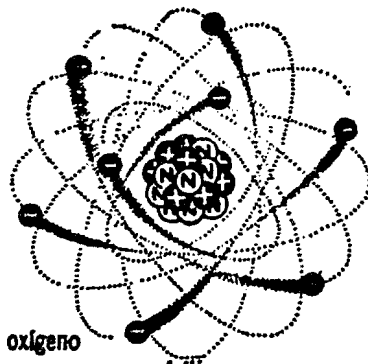


FIGURA I.2

A Rutherford se le debe la sugestión de la primera teoría nuclear aceptada, la cual supone al átomo como un sistema solar miniatura, donde el número de protones, neutrones y electrones, determinan las diferencias entre los átomos de cada uno de los elementos. Este sistema tiene un núcleo central cargado positivamente, formado por las partículas más pesadas (neutrones y protones) y por consiguiente a él se debe toda la masa del átomo.

Los electrones, en igual número que los protones, están en movimiento constante, girando alrededor del núcleo. De los electrones planetarios depende el volúmen ocupado por el átomo.

Si el núcleo de un átomo se amplificara por ejemplo al tamaño de una esfera de 1 metro de diámetro, el electrón más cercano estaría a unos 35000 metros de distancia. Es muy probable que los electrones que giran alrededor del núcleo, lo hagan a velocidades variables próximas a los 150000 kilómetros por segundo.

FIGURA I.3

Configuración electrónica de los elementos hasta los -  
de cuatro capas electrónicas.

Números atómicos y elementos	Capa principal y subcapas			
	$n = 1$	2	3	4
	$l = s$	$s p$	$s p d$	$s p d f$
1 H	1			
2 He	2			
3 Li	2	1		
4 Be	2	2		
5 B	2	2 1		
6 C	2	2 2		
7 N	2	2 3		
8 O	2	2 4		
9 F	2	2 5		
10 Ne	2	2 6		
11 Na	2	2 6	1	
12 Mg	2	2 6	2	
13 Al	2	2 6	2 1	
14 Si	2	2 6	2 2	
15 P	2	2 6	2 3	
16 S	2	2 6	2 4	
17 Cl	2	2 6	2 5	
18 A	2	2 6	2 6	
19 K	2	2 6	2 6	1
20 Ca	2	2 6	2 6	2
21 Sc†	2	2 6	2 6 1	2
22 Ti†	2	2 6	2 6 2	2
23 V†	2	2 6	2 6 3	2
24 Cr†	2	2 6	2 6 5	1
25 Mn†	2	2 6	2 6 5	2
26 Fe†	2	2 6	2 6 6	2
27 Co†	2	2 6	2 6 7	2
28 Ni†	2	2 6	2 6 8	2
29 Cu	2	2 6	2 6 10	1
30 Zn	2	2 6	2 6 10	2
31 Ga	2	2 6	2 6 10	2 1
32 Ge	2	2 6	2 6 10	2 2
33 As	2	2 6	2 6 10	2 3
34 Se	2	2 6	2 6 10	2 4
35 Br	2	2 6	2 6 10	2 5
36 Kr	2	2 6	2 6 10	2 6

Son elementos de transición del 21 al 28.

El núcleo que solo tiene importancia en las propiedades físico-nucleares y relativa importancia en las propiedades físicas y químicas, está constituido por un número  $N$  de neutrones y  $P$  de protones.

El protón tiene una carga positiva  $q_p = 1.602 \times 10^{-19}$  Coulombs denominada carga elemental, y su masa es de  $m_p = 1.672 \times 10^{-27}$  Kilogramos.

El neutrón tiene una carga neutra como su nombre lo indica, y tiene una masa de  $m_n = 1.675 \times 10^{-27}$  Kilogramos.

Los electrones están alrededor del núcleo y son los que determinan totalmente el comportamiento de los átomos desde el punto de vista cristalino, térmico, mecánico, eléctrico, magnético, óptico, etc.

El electrón tiene una carga igual a la del protón pero de signo contrario  $q_e = -1.602 \times 10^{-19}$  Coulombs, y su masa es de  $m_e = 9.107 \times 10^{-31}$  Kilogramos, esto implica que la masa del electrón es 1836 veces más pequeña que la del protón y 1839 más pequeña que la del neutrón, por lo que la masa del átomo está concentrada en el núcleo.

Ahora bien, los electrones que rodean al núcleo no pueden tener la misma energía, de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, de modo que es posible dividir los electrones en grupos con niveles de energía determinados, llamados capas cuánticas o electrónicas (véase figura I.3) .

La primera capa electrónica es la de menor energía, la

cual puede contener un número máximo de 2 electrones, la segunda capa electrónica puede contener hasta 8 electrones, la tercera puede contener 18 como máximo. Por tanto el número de electrones permitidos en cada una de las capas electrónicas es  $2n^2$ , donde "n" es el número cuántico superior. Además existe un principio físico, llamado de exclusión de Pauli, que establece que en un mismo nivel no puede situarse más de dos electrones y que en el caso de existir dos, estos deben tener un movimiento de rotación opuesto, lo que nos lleva a admitir la existencia de subcapas -- entre las cuales se distribuyen los electrones. En general, las órbitas más cercanas al núcleo son las primeras en saturarse, -- aunque esto no siempre es verdad, ya que en algunos de los átomos más pesados puede suceder que el nivel de máxima energía de una determinada capa, tenga más energía que el nivel de menor -- energía de la siguiente.

Los números cuánticos son cuatro: n, l,  $m_l$  y  $m_s$ . El "n" que es el número cuántico principal, define el nivel energético principal. El segundo nivel cuántico "l" da la medida del movimiento cinético del electrón y caracteriza en cada capa un subnivel energético, representándose los subniveles por las letras -- s, p, d, y f. El número cuántico " $m_l$ ", que determina el movimiento magnético del electrón, puede tomar cualquier valor entre --- +1 y - 1 . Finalmente el número cuántico " $m_s$ ", que expresa el -- sentido de rotación del electrón, toma valores entre -1/2 y +1/2. El estado energético de un electrón queda definido con estos --

cuatro números cuánticos, siendo diferente de todos y cada uno de los restantes electrones.

Para obtener la anotación explícita de la configuración electrónica hay que considerar la secuencia energética de los subniveles; pudiéndose utilizar la siguiente secuencia energética:  $1s-2s-2p-3s-3p-4s-3d-4p-5s-4d-5p-6s-4f-5d-6p-7s-5f-6d$  etc. Siendo el número máximo de electrones en los subniveles s,p,d,f de 2,6,10,14 respectivamente.

Por otro lado John Dalton pensó que todos los átomos de un mismo elemento tenían la misma masa, pero investigaciones posteriores de Francis William Aston, han demostrado que esto no siempre es cierto. Por ejemplo el cloro analizado por Aston resultó ser una mezcla de dos especies de átomos, cuyas masas atómicas eran 35 y 37; y como el número atómico del cloro es siempre 17, tenemos que el átomo está compuesto por; 17 electrones, 17 protones y 18 o 20 neutrones.

Todos estos átomos a pesar de tener diferente masa tienen las mismas propiedades físicas, químicas y la misma valencia.

Los electrones que presentan las características antes descritas se les llama isótopos.

### 1.1.2) CLASIFICACION DE LOS ELEMENTOS

No puede darse una verdadera clasificación de los elementos, sin embargo para hacer su estudio se ha convenido agruparlos atendiendo a ciertas propiedades comunes que presentan entre sí. Una primera clasificación de los elementos es la agru-

FIGURA I.4

Tabla Periódica de los Elementos

METALES LIGEROS		METALES PESADOS										NO METALES					0 GASES INERTES
IA	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	
3 Li	4 Be	FRAGILES										DUCTILES					2 He
11 Na	12 Mg	FRAGILES										DUCTILES					10 Ne
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Ver. Cer. LANTANOS	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-102 Ver. Act. ACTINICOS															

SERIE LANTANOS Y TIERRAS RARAS	57 La	58 Ce	59 Pr
	138.905	140.12	140.908

SERIE ACTINICOS	89 Ac	90 Th	91 Pa
	227	232	231

60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.925	162.500	164.930	167.259	168.933	173.054	174.967

92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw
238.02891	237	244	243	247	247	251	252	257	258	259	262



pación en metales, metaloides y no metales. (véase figura I.4) -

Los elementos que integran el grupo de los metales se caracterizan por tener de 1 a 3 electrones en su órbita exterior, existencia en el estado sólido bajo estructuras cristalinas, conductividad térmica y eléctrica relativamente altas, capacidad para deformarse plásticamente, reflectividad de la luz relativamente alta (lustre o brillo metálico), generalmente tienen peso específico elevado, con el oxígeno dan compuestos llamados óxidos, los cuales al reaccionar con el agua forman los hidróxidos o bases.

Los elementos no metálicos se caracterizan por tener de cuatro a siete electrones en su órbita exterior, carecen de brillo, son malos conductores térmicos y eléctrico, frágiles, inmaleables y no dúctiles, generalmente tienen bajo peso específico, con el oxígeno dan compuestos llamados anhídridos, los cuales al reaccionar con el agua forman los oxiácidos.

Los elementos metaloides o elementos anfotéricos son aquellos que participan de algunas propiedades de los metales y de otras de los no metales, generalmente poseen una conductividad eléctrica pequeña. Entre los metaloides podemos citar al carbono, boro y silicio.

### 1.1.3) ENLACES ATOMICOS

Los cuerpos en estado sólido pueden agruparse en dos tipos: los sólidos cristalinos, los cuales presentan una determinada ordenación geométrica de sus átomos y moléculas que contiene

a su estructura el carácter de cristalina; y los amorfos, que -- si bien son sólidos a la temperatura ambiente, no presentan una ordenación regular de sus moléculas, sino que la distribución -- de estas responde a las leyes del azar, tal como ocurre en el -- estado líquido.

Ahora bien, ¿Cómo están ligados entre sí los átomos y -- moléculas en estas estructuras cristalinas?. La clasificación de enlaces interatómicos proporciona una guía para el estudio de -- las propiedades generales de estos sólidos. Siendo los principa- les tipos de enlaces el iónico (LiF), covalente (C) y metálico - (Al). En realidad esto es una simplificación ya que los enlaces son en general de carácter intermedio, siendo fundamentalmente de alguno de los tipos principales.

#### 1.1.3.1) ENLACE IONICO

Los átomos cuya capa externa se encuentra saturada con ocho electrones o con dos electrones si están situados solo en -- una capa, son muy estables quími- camente. Los elementos, como el sodio, que tienen un solo elec- trón en su capa exterior, tende- rán a cederlo con objeto de con- tar con una capa saturada, la -- cual, tras la cesión del elec- trón, será la exterior (véase fi- gura 1.5). Al suceder esto, el -

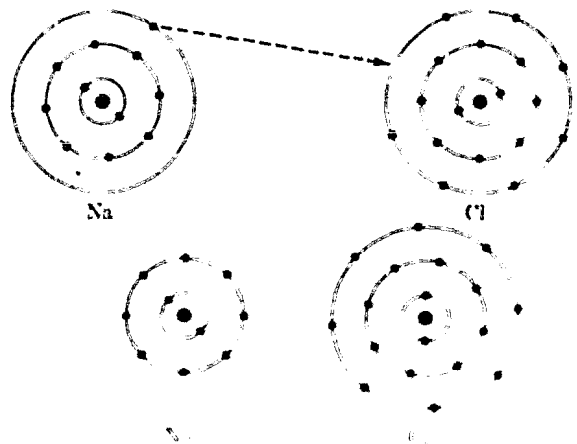


FIGURA 1.5

átomo tendrá un protón más, originándose un ión positivo. Por el contrario, elementos como el cloro que tienen 7 electrones en la capa exterior, tenderán a captar este electrón para así completarla. Cuando esto sucede, el átomo tendrá un electrón más, originándose un ión negativo. Por tanto, si se ponen en contacto átomos de sodio y de cloro, habrá una cesión de electrones del sodio al cloro, permaneciendo unidos estos átomos por la fuerte atracción electrostática que se crea entre los iones positivos de sodio y negativos de cloro. Esto explica la fuerte atracción que existe, en los estados líquidos y gaseosos, entre pares de átomos. Pero en el estado sólido, el ión negativo presenta una atracción hacia todo ión positivo y por el contrario el ión positivo hacia todo ión negativo. En consecuencia, los iones de sodio tratarán de rodearse de iones de cloro y estos de iones de sodio, encontrándose iguales fuerzas de atracción en todas direcciones.

#### 1.1.3.2) ENLACE COVALENTE

Como se estableció antes, la estructura electrónica de un átomo es estable si tiene ocho electrones en su capa externa de valencia. Algunas veces un átomo puede adquirir esos ocho electrones al compartir uno o más de estos electrones con un átomo adyacente (véase figura I.6). Esto da lugar a un fuerte enlace entre los átomos, debido a la atracción que ejercen los núcleos positivos sobre los electrones compartidos. También las distancias interatómicas se reducen al aumentar el número de pa-

res de electrones compartidos.

Las grandes fuerzas de atracción entre átomos en este tipo de enlaces se evidencian en el diamante que es el material más duro encontrado en la naturaleza y que es puramente carbono.

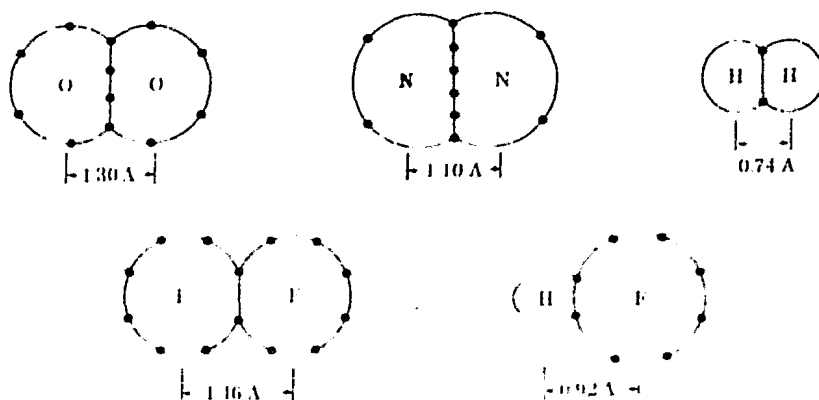


FIGURA I.6

Cada átomo de carbono tiene cuatro electrones en su capa externa, los cuales son compartidos con cuatro átomos adyacentes para formar una red tridimensional enteramente ligada por pares covalentes. La resistencia del enlace covalente en el carbono se demuestra no sólo por la gran dureza del diamante, sino también por la temperatura extremadamente alta a la que puede ser sometido antes de que su estructura sea deformada por energía térmica.

Este tipo de enlace, que se encuentra a menudo en moléculas orgánicas, es marcadamente direccional, como se visualiza en el enlace tetraédrico del carbono de las moléculas orgánicas y en sólidos tales como el diamante y el silicio.

Aún cuando los enlaces covalentes son fuertes no todos los materiales con enlace de este tipo tienen altos puntos de --

fusión y ebullición o gran resistencia. Un buen ejemplo es el me tano que contiene varios enlaces covalentes, esta molécula pre -  
senta pequeñas atracciones con las adyacentes, porque los requi-  
sitos de electrones en la capa cortical están ya satisfechos. --  
Así, la molécula de metano, como los átomos de gases nobles, ac-  
túa casi independientemente de otras moléculas.

### 1.1.3.3) ENLACE METALICO

Los átomos de un metal no pueden ser enlazados simple-  
mente por enlaces iónicos o covalentes, ya que para que se veri-  
fique el primero tendrían que existir iones con carga opuesta, y  
para la existencia del segundo se requerirían un número suficiente  
de electrones de valencia. Por ello, el enlace metálico se cara  
cteriza por que los electrones de valencia son compartidos por  
más de dos átomos, mientras el resto de los electrones se adhie-  
ren firmemente al núcleo (véase figura --

I.7). Esto, en efecto forma una estructu-  
ra de iones positivos y electrones comparta  
tidos. Debido a que los electrones comparta  
tidos tienen libertad para moverse aleatori  
amente entre los iones metálicos positivo  
s, se dice forman la "nube" o "gas" electr  
ónica . La cohesión entre los iones me-

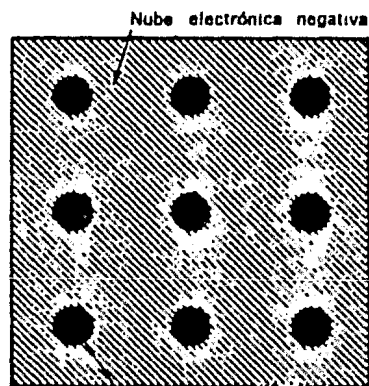


FIGURA I.7

tálicos se mantiene en virtud de la atracción mutua experimenta-  
da por estos iones y la nube electrónica que los envuelve.

Aún cuando la descripción está grandemente simplificada

dá una explicación bastante útil para entender muchas de las propiedades de los metales. Por ejemplo, las propiedades mecánicas de un metal están determinadas por el acomodamiento cristalino de los átomos. Los electrones compartidos dan al metal su característica de alta conductividad, ya que son estos los que tienen libertad para moverse en un campo eléctrico. También con la movilidad de los electrones compartidos está asociada la alta conductividad térmica puesto que estos pueden transferir energía de un alto a un bajo nivel.

## 1.2 ) ESTRUCTURA CRISTALINA

### 1.2.1) DIAMETRO ATOMICO

Para un determinado valor de la distancia interatómica, la energía interna de dos átomos próximos adquiere un valor mínimo correspondiente a la separación de equilibrio. La separación de equilibrio varía para cada elemento y su valor se determina midiendo la mínima distancia a que se encuentran los átomos en el estado sólido (véase figura 1.8). La energía interna total es mínima cuando se logra que la fuerza de atracción -- entre los electrones y ambos núcleos positivos, sea igual a la fuerza de repulsión entre los núcleos positivos -- así como también entre los electrones.

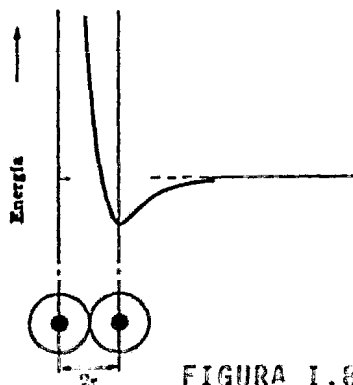


FIGURA 1.8

Si representamos los átomos en posición de equilibrio por esferas tangentes, la distancia entre sus centros puede tomarse como el diámetro atómico.

El valor del diámetro atómico aumenta como es de esperar, con el número de capas ocupadas por electrones y disminuye al aumentar el número de electrones de valencia. Otros factores que influyen en el diámetro atómico es por ejemplo la temperatura, que incrementa la energía interna y por ende el diámetro, -- así como también el número de átomos adyacentes, haciendo cada átomo adyacente que la atracción sea menor hacia un átomo específico, y consecuentemente el diámetro atómico aumenta.

### 1.2.2) NUMERO DE COORDINACION

Con la idea de que los átomos son de forma esférica y considerando que su enlace no tiene preferencia direccional, esto es que: un anión (ión negativo) ejerce la misma fuerza de atracción sobre los cationes (iones positivos) dispuestos en su periferia, y en forma análoga es la atracción de un catión sobre los aniones vecinos, debiéndose entender por número de coordinación a la cantidad posible de cationes que tocan a un anión. Como era de esperarse el número de coordinación es función de la relación de los radios de los iones, y los intervalos de la relación de radios que geoméricamente permiten cierto número de coordinación se muestra en la figura 1.9.

De acuerdo con estas condiciones se predice que el número de coordinación es estable, cuando el número de coordinación

de la relación de radios correspondientes.

FIGURA I.9

Intervalo de $r/R$	Número de Coordinación Máximo Posible
0.0 a 0.155	2
0.155 a 0.255	3
0.255 a 0.414	4
0.414 a 0.732	6
0.732 a 1.0	8
1.0	12

### 1.2.3) CELDA UNITARIA

En el estado sólido, los átomos de los elementos acusan cierta permanencia de posición, sin embargo, estos no permanecen fijos sino que oscilan alrededor de ella estableciendo un equilibrio dinámico. Se puede considerar que al agruparse los átomos en forma ordenada determinan una red tridimensional llamada red espacial; estos átomos, al ser unidos por rectas imaginarias describe una serie de celdillas iguales, -- que poseen las mismas características de simetría del cristal (véase figura I.10), las cuales se denominan celdas unitarias.

Para definir las características -



FIGURA I.10

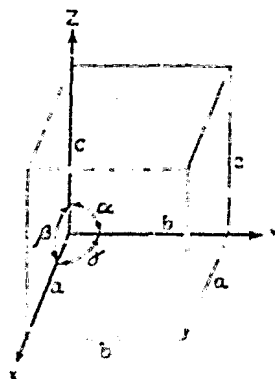


FIGURA I.11



de una celda unitaria se hace uso de los parámetros  $a, b$  y  $c$  que indican la longitud de sus aristas, y por los ángulos  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$  (véase figura 1.11).

Existen solamente 14 tipos de celdas unitarias o redes espaciales, clasificadas en siete sistemas cristalinos que son: Triclínico, Monoclínico, Ortorrómbico, Romboédrico, Tetragonal, Hexagonal y Cúbico. A los 14 tipos de redes espaciales se les llama redes de Bravais (véase figura 1.12).

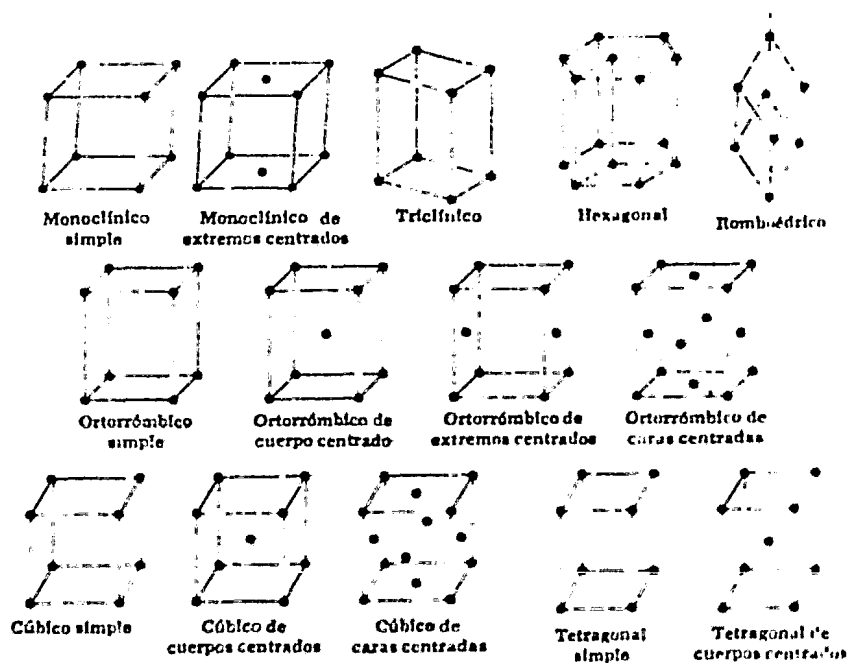


FIGURA 1.12

El acomodamiento atómico del material es función del número de coordinación, o sea del radio iónico de los elementos, e idealmente será aquél que minimice la energía por unidad de volumen.

La estructura cristalina se tiene en algunos polímeros, en la mayoría de los materiales cerámicos y en los metales.

### 1.3) NOTACION CRISTALINA

#### 1.3.1) INDICES DE DIRECCION O INDICES DE MILLER

Considerando una celda unitaria de la red espacial y tomando uno de los átomos de los vértices como origen de un sistema coordinado; los índices de dirección son los componentes vectoriales mutuamente simples a lo largo de cada uno de los ejes - componentes del sistema.

Así, para el sistema cristalino cúbico, los índices de dirección son tres cifras enteras, consecuencia de dos ejes perpendiculares dispuestos en un plano y un tercer eje normal al mencionado plano, los cuales se intersectan en el vértice de la celda unitaria. Las tres cifras deben ser mutuamente simples y caracterizan la posición del átomo que se encuentra en la dirección dada, estos índices se anotan entre paréntesis rectangulares  $[hnp]$  (véase figura 1.13).

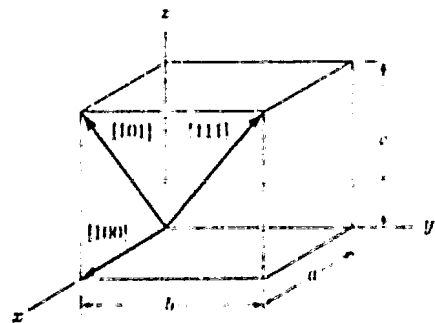


FIGURA 1.13

Es importante hacer notar -- que como los índices de dirección se refieren a una celda unitaria no localizada en forma absoluta en el espacio, estos índices representan la totalidad de las direcciones paralelas a la indi-

cada en la celda unitaria (véase figura 1.14)

No es difícil comprender que el número de átomos en las diferentes direcciones es variable, pero la dirección sobre la que los átomos están apilados de forma tal que átomos vecinos son tangentes entre sí, se denomina dirección compacta.

Como ejemplo, los índices de las direcciones principales de la red cúbica son: los ejes (100) (010) (001) las diagonales de las caras (110) ---- (101) (011) y la diagonal del cubo (111).

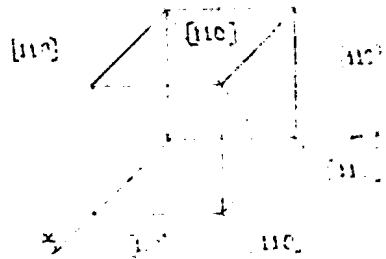


FIGURA 1.14

Para el sistema cristalino exagonal, los índices de dirección son cuatro, resultado de tres ejes dispuestos en el plano basal  $a_1, a_2$  y  $a_3$ , separados  $120^\circ$  entre sí y un cuarto eje normal al plano mencionado, los cuales se intersectan en el átomo central del plano basal, las cuatro cifras al igual que en el sistema cúbico se anotan entre paréntesis rectangulares y son  $[mnpq]$ , debiendo cumplir la condición  $m+n+p=0$ .

Como ejemplo, los índices de dirección de los ejes  $a_1, a_2$  y  $a_3$  son:  $(2\bar{1}\bar{1}0)$ ,  $(\bar{1}2\bar{1}0)$  y  $(\bar{1}\bar{1}20)$  respectivamente, cabe hacer notar que las direcciones antes mencionadas son direcciones compactas.

### 1.3.2) INDICES DE PLANOS

La red espacial puede considerarse que contiene infini-

dad de planos que pasan por los centros de los átomos de la red, siendo sus índices de plano, los índices de dirección de la normal al plano (véase figura I.15).

Así para el sistema cristalino cúbico los índices de plano son tres y la manera de determinarlos es encontrando las intersecciones del plano con los ejes coordenados establecidos en la celda unitaria considerada, en seguida se toman los recíprocos de las intersecciones y finalmente se racionalizan a enteros mutuamente simples, las cifras obtenidas son los índices del plano -- los cuales se anotan entre paréntesis curvos (hkl).

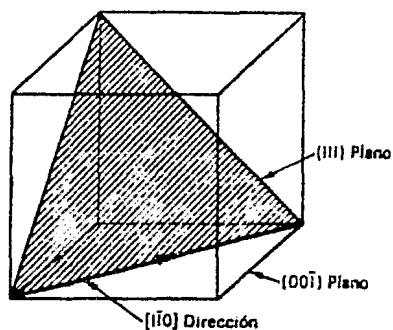


FIGURA I.15

Al igual que en el caso de índices de dirección los índices de plano son referidos a una celda unitaria no localizada en forma absoluta en el espacio, por lo que estos índices representan la totalidad de planos paralelos al indicado en la celda unitaria (véase figura I.16).

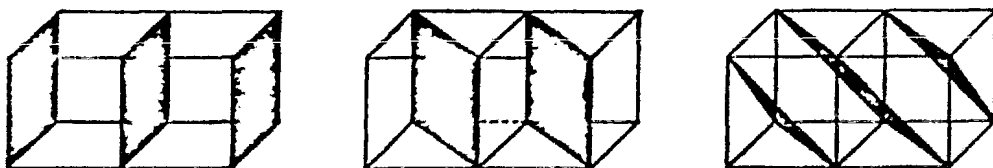


FIGURA I.16

Es de comprender que el número de átomos en los diferen

tes planos es variable, pero el plano sobre el cual los átomos están apilados de tal forma que un átomo es tangente a todos sus vecinos, se denomina plano compacto.

Como ejemplo, los índices de plano de las caras del cubo son: (100), (010), (001) ; los índices de los planos del octaedro (111) y los índices de los planos del dodecaedro (diagonales) (110) .

Para el sistema cristalino exagonal, los índices de plano están compuestos al igual que los de dirección por cuatro cifras, las cuales se obtienen de forma análoga al sistema cristalino cúbico e igualmente son anotados entre paréntesis curvos y son (hkil) , debiendo cumplir la condición  $h+k+i=0$  .

Como ejemplo, los índices de plano de los planos basales son 0001 , de las superficies verticales o planos de prisma tipo 1 son (10 $\bar{1}$ 0) (01 $\bar{1}$ 0, y ( $\bar{1}$ 100).

### 1.3.3) ANISOTROPIA

Se llama anisotropía a la desigualdad en las propiedades químicas, físicas o mecánicas en un cristal para distintas direcciones cristalográficas. Esta diferencia de propiedades es resultado de la variación del acomodamiento atómico para distintas direcciones así como en los planos cristalinos.

Los metales son generalmente policristalinos, es decir, están compuestos de una gran cantidad de cristales anisótropos, - mismos que por lo regular están orientados en forma diferente - - uno con respecto a los otros, por lo que las propiedades son más

o menos iguales en todas las direcciones, concluyendo que los cuerpos policristalinos se observan como cuerpos isótropos.

#### 1.4) SISTEMAS CRISTALINOS COMUNMENTE ENCONTRADOS EN LOS METALES.

Afortunadamente la mayoría de los metales cristalizan en el sistema cúbico o exagonal, y las celdas unitarias con que más nos encontramos son la cúbica centrada en el cuerpo, cúbica centrada en las caras y la exagonal compacta (véase figura I.17)

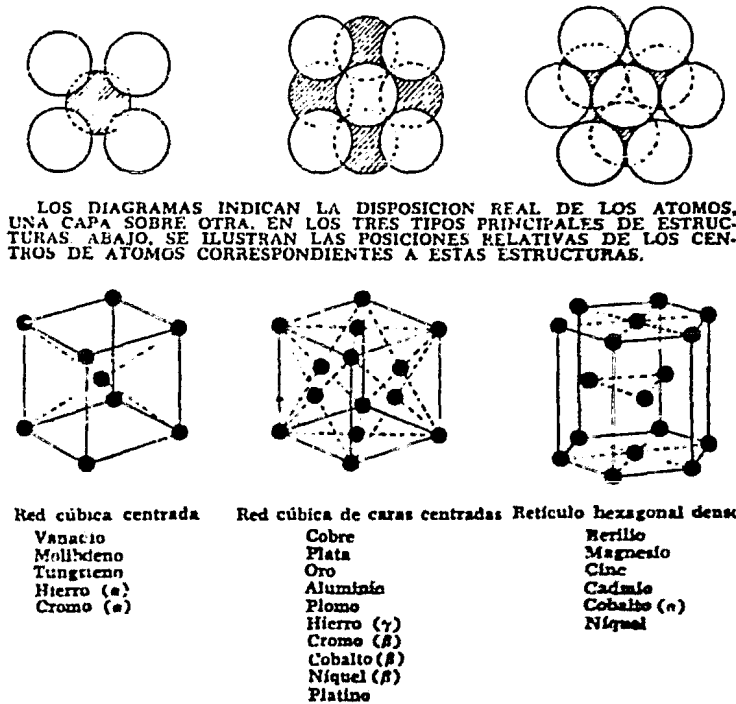


FIGURA  
I.17

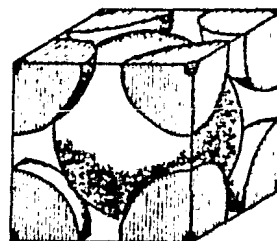
## 1.4.1) FACTOR DE ACOMODAMIENTO ATOMICO

Un parámetro que es importante conocer en la estructura cristalina de los metales es el factor de llenado o factor de acomodamiento atómico (F.A.A), el cual nos da la información sobre la fracción de volumen de la celda unitaria ocupada por los átomos que esta contiene.

$FAA = \frac{\text{volumen de los átomos contenidos en la celda unitaria}}{\text{volumen de la celda unitaria}}$

## 1.4.2) CELDA CUBICA CENTRADA EN EL CUERPO (CCCu)

Este tipo de celda unitaria se caracteriza por tener un átomo central y ocho dispuestos en sus vértices; de estos últimos cada uno es compartido por ocho celdas vecinas y el central pertenece íntegro a la celda unitaria que se considera (véase figura I.18); de lo anterior el número de átomos que contiene la celda cúbica centrada en el cuerpo es:



FIGURA

1 átomo central	1
1/8 de átomo por 8 átomos	<u>1</u>
átomos de la celda	2

I.18

Al tener 8 vecinos el átomo central, tenemos que el número de coordinación de la celda cúbica centrada en el cuerpo es ocho.

Los parámetros con que se define esta celda unitaria son:

$$a = b = c = 4r/\sqrt{3}$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

El valor de la arista del cubo se obtiene al saber que la diagonal del cubo es una dirección compacta la cual vale "4r" la diagonal de la cara vale " $\sqrt{2}a$ " y la arista vale "a" . (véase figura I.19) :

$$(4r)^2 = 2a^2 + a^2$$

$$(4r)^2 = 3a^2 \quad a = 4r/\sqrt{3}$$

El factor de acomodamiento atómico para esta celda unitaria se obtiene de la siguiente forma:

$$FAA = (2((4/3)\pi r^3))/(4r/\sqrt{3})^3$$

$$FAA = 8\pi r^3(\sqrt{3})^3/3(4r)^3$$

$$FAA = (2\sqrt{3})^3 \pi r^3/192r^3 = 0.68$$

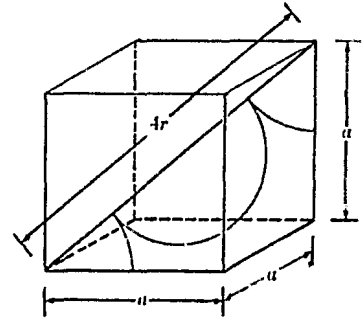
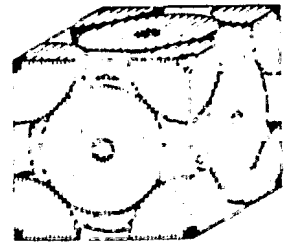


FIGURA I.19

1.4.3) CELDA CUBICA CENTRADA EN LAS CARAS (CCCa)

Esta celda unitaria se caracteriza por tener ocho átomos dispuestos en sus vértices y seis átomos, cada uno de estos centrado en cada cara (véase figura I.20); cada uno de los primeros ocho es compartido por ocho celdas vecinas y cada uno de los centrados en las caras es compartido por dos celdas de lo anterior el número de átomos que contiene la celda cúbica centrada en las caras es:



1/8 de átomo por 8 átomos	1
1/2 de átomo por 6 átomos	3
átomos de la celda	4

FIGURA I.20



El átomo centrado en una de las caras es tocado por los cuatro átomos de los vértices de la cara y por los ocho dispuestos en los cuatro planos perpendiculares a la cara, por tanto el número de coordinación de la celda cúbica centrada en las caras es 12.

Los parámetros con que se define esta celda unitaria -- son:

$$a = b = c = 4r/\sqrt{2}$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

El valor de la arista del cubo se obtiene al saber que la diagonal de la cara es una dirección -- compacta la cual vale "4r" y la arista vale "a" ( véase figura I.21) .

$$(4r)^2 = a^2 + a^2$$

$$(4r)^2 = 2a^2$$

$$a = 4r/\sqrt{2}$$

El factor de acomodamiento atómico para esta celda unitaria se obtiene de la siguiente forma:

$$FAA = 4((4/3)\pi r^3)/(4r/\sqrt{2})^3$$

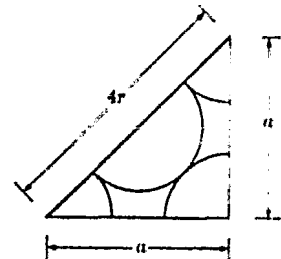
$$FAA = 16\pi r^3(\sqrt{2})^3/3(4r)^3$$

$$FAA = 16(\sqrt{2})^3\pi r^3/192r^3$$

$$FAA = 0.74$$

#### 1.4.4) CELDA EXAGONAL COMPACTA

Este tipo de celda unitaria se caracteriza por tener un



FIGURA

I.21

átomo central en cada una de sus bases y doce en los vértices, - además de otros tres átomos entre las bases, dispuestos alternadamente en los centros de los seis prismas triangulares en que puede descomponerse la celda exagonal (véase figura I.22) .

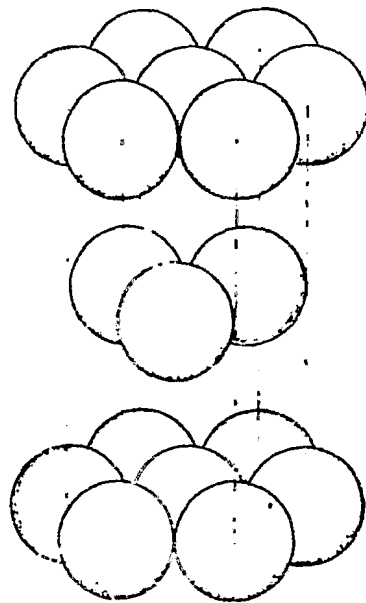


FIGURA I.22

El átomo central de una de las bases es tocado por los seis átomos dispuestos en los vértices del plano basal, por tres del plano superior y por otros tres átomos del plano inferior, por tanto el número de coordinación de la celda exagonal compacta es de 12

Los parámetros con que se define esta celda unitaria son (véase figura I.23) :

$$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

$$\alpha = 120^\circ$$

El valor de la arista, por encontrarse sobre esta dos átomos tangentes, es  $2r$  y la altura por relaciones geométricas se calcula de la manera siguiente (véanse figuras I.24 y I.25) :

$$(2r)^2 = x^2 + r^2$$

$$x^2 = 4r^2 - r^2 \quad x^2 = 3r^2$$

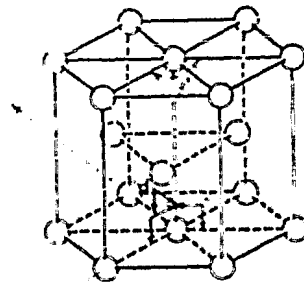


FIGURA I.23

$$x^2 = (x/3)^2 + h^2$$

$$3r^2 = (3r^2/9) + h^2$$

$$h^2 = 8r^2/3 \quad h = r\sqrt{8/3}$$

$$c = 2h \quad c = 2r\sqrt{8/3}$$

Es importante hacer notar que el valor obtenido para la arista de la altura " $c = 2r\sqrt{8/3}$ " es un valor teórico, pues los metales que cristalizan en el sistema exagonal no se comportan de esta manera, sino que la altura de la celda unitaria es mayor a la calculada (véase figura I.26).

El factor de acomodamiento atómico de la celda exagonal teóricamente es el permitido por su número de coordinación, -- que en este caso sería: FAA = 0.74

#### 1.4.5) ALOTROPIA

Es la propiedad que poseen algunos materiales de poder existir en estado sólido en distintas redes espaciales, siendo los cambios de estructura reversibles. Si estos cambios no son reversibles se dice que el material sólo presenta polimorfismo.

La propiedad de alotropía es presentada por quince metales cuando menos, y de ellos el ejemplo más conocido es el del hierro.

La propiedad de polimorfismo es presentada por el carbono, en la estructura del diamante y el estado natural, no sien-

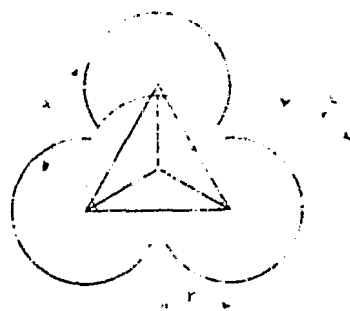


FIGURA I.24

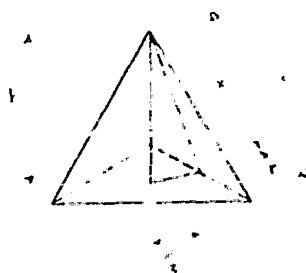


FIGURA I.25

FIGURA I. 26

Metal	Símbolo	Densidad a 20°C en g por cm <sup>3</sup>	Punto de fusión, °C	Estructura cristalina	Parametro de la red angstroms†	Minima distancia interatómica, angstroms
Aluminio	Al	2,6994	660,2	f. c. c.	4,0491	2,803
Antimonio	Sb	6,6169	630,5	Romboédrica	4,5065	2,904
Berilio	Be	1,8550	1,277,8	C. p. h.	a = 2,2858 c = 3,5842	2,221
Bismuto	Bi	9,8008	271,3	Romboédrica	4,7457	3,111
Cadmio	Cd	8,6657	320,9	C. p. h.	a = 2,9787 c = 5,617	2,972
Carbono (grafito)	C	2,2426	3,7267	Hexagonal	a = 2,4614 c = 6,7041	1,42
Cromo	Cr	7,1984	1,875	b. c. c.	2,884	2,498
Cobre	Cu	8,9703	1,083	f. c. c.	3,6153	2,556
Oro	Au	19,3248	1,063	f. c. c.	4,078	2,882
Hierro (α)	Fe	7,8626	1,536,5	b. c. c.	2,8664	2,4824
Piomo	Pb	11,3430	327,4	f. c. c.	4,9489	3,499
Magnesio	Mg	1,7387	650	C. p. h.	a = 3,2058 c = 5,2095	3,19
Manganeso	Mn	7,4752	1,245	Cúbica (compleja)	8,912	2,69
Moibdeno	Mo	10,2161	2,610	b. c. c.	3,1468	2,725
Niquel	Ni	8,9149	1,452,8	f. c. c.	3,5238	2,491
Platino	Pt	21,4566	1,769,4	f. c. c.	3,9310	2,775
Silicio	Si	2,3256	1,410	Cúbica (diamantina)	3,428	2,351
Plata	Ag	10,4910	960,5	f. c. c.	4,086	2,888
Estaño	Sn	7,3008	231,9	b. c. tetragonal	a = 5,8314 c = 3,1815	3,09
Titanio	Ti	4,5405	1,668,3	C. p. h.	a = 2,9503 c = 4,683	2,91
Tungsteno	W	19,2971	3,410	b. c. c.	3,1585	2,734
Vanadio	V	6,0910	1,898,0	b. c. c.	3,039	2,632
Zinc	Zn	7,1430	419,4	C. p. h.	a = 2,6643 c = 4,9470	2,6648

do reversible el cambio de estructura.

## BIBLIOGRAFIA

- Química General Elemental  
Manuel Delfino Figueroa  
Porrua 1967
- Ciencias de Materiales para Ingeniería  
Dr. Yvan Houbaert Irmén  
Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1976
- Introducción a la Metalurgia Física  
Sidney H. Avner  
Mc.Graw-Hill 1978
- Materiales para Ingeniería  
Van Vlack  
C.E.C.S.A. 1979
- Estructura  
William G. Moffatt, George W. Pearsall, John Wulff  
Dimusa-Wiley 1968
- Structure Des Metaux  
Charles S. Barrett  
Dunod 1957
- Principios de Metalurgia Física  
Robert E. Reed-Hill  
C.E.C.S.A. 1979
- Metalurgia para Ingenieros  
Albert G. Guy  
F.E.I.S.A. 1970

## C A P I T U L O   I I

### DILATOMETRIA

#### 2.1) INTRODUCCION

##### 2.1.1) DILATACION

El aumento de volumen que experimentan los cuerpos, debido a causas térmicas o mecánicas, se llama dilatación.

El estudio de la dilatación de los gases, líquidos y sólidos es sumamente extenso y escapa al objetivo del presente trabajo, por lo que solo consideraremos la dilatación de los sólidos cristalinos por efecto térmico.

##### 2.1.2) RESEÑA HISTORICA

El estudio sistemático de la dilatación se inició en 1732 con los experimentos realizados por Lavoisier y Laplace. El mecanismo que emplearon (vease figura 11.1) consistía de una piedra granítica en la que se apoyaba uno de los extremos de la

rra objeto de estudio, pudiendo la barra dilatarse libremente -- por el extremo opuesto, esta dilatación se medía sobre una escala vertical mediante un sistema

de palanca. Anteriormente, la ex pansion, había sido observada -- por Musschenbroek, pero sus ob--

servaciones no fueron sistemáti- cas ni exactas.

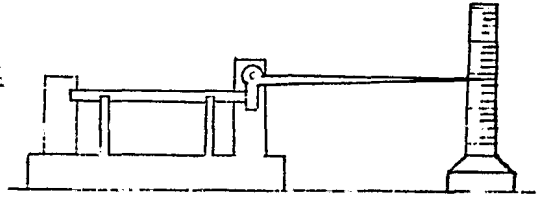


FIGURA II.1

En 1781 Dé Luc sugirió un método diferencial para medir la dilatación, que consistía de dos barras de diferente material y diferente longitud, una de estas barras, la lar ga, era de platino y la barra corta del material en estudio (véase figura II.2). Uno de los extre- mos de cada barra era fijo y el extremo libre de cada una de estas se graduó con diferente escala, formando de este modo un sistema de medición tipo vernier. Este mecanismo fué usado por Borda 35 -- años después y por Daniell en 1821 para medir di- lataciones a altas temperaturas.

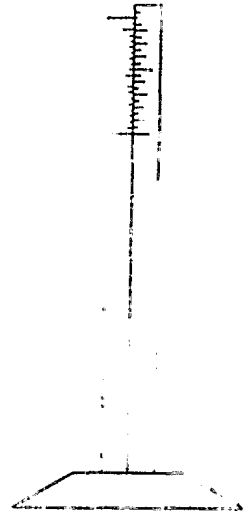


FIGURA II.2

Un método más preciso fué usado por Rams- den y Roy en 1785 y consistía de tres recipientes con una barra cada uno. Las barras de los recipientes laterales eran de fierro y estaban fijas en uno de sus extremos. En los ex tremos de una de estas barras de fierro, se fijaron los oculares de dos telescopios. El recipiente central contenía la barra del

material en estudio, la cual, estaba montada en rodamientos y en sus extremos se colocaron los objetivos de los telescopios, uno de estos con un tornillo micrométrico para ajuste. Los telescopios, producto de las lentes, estaban dirigidos hacia las marcas hechas en la otra barra de fierro (véase figura II.3). Para la calibración del sistema, los recipientes fueron llenados con hielo y fijada la barra de prueba en uno de

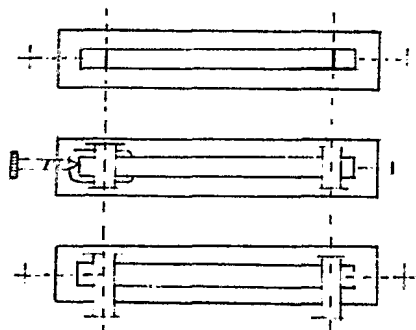


FIGURA II.3

sus extremos mediante un tornillo, cuando las marcas del ocular, objetivo y la hecha en la barra de fierro eran colineales. Similarmente se hizo el alineamiento de las marcas del extremo opuesto, mediante el tornillo micrométrico del objetivo. Al dilatarse las barras se pierde el alineamiento de las marcas de los extremos libres, siendo necesario mover el objetivo para hacerlo coincidir nuevamente con las marcas del ocular y de la barra mediante el tornillo micrométrico, donde se lee directamente la dilatación.

El método interferométrico desarrollado por Fizeau en 1864, es un método muy preciso y apropiado para medir la dilata---

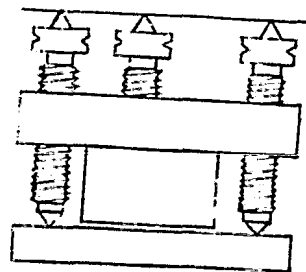


FIGURA II.4

ción de especímenes sólidos pequeños. El mecanismo empleado por Fizeau estaba constituido por un disco base de platino de espe--



sor pulido y trabajado ópticamente, este era atravesado por tres tornillos de precisión, cuyas cabezas sirvieron de apoyo al conjunto (véase figura 11.4). Formando trípode, las puntas de los tornillos sostenían un disco de cristal de caras planas paralelas. Entre los dos discos se colocaba el espécimen, un cilindro de 1 cm. de altura y de bases pulidas, una de ellas, la superior ligeramente convexa. La distancia entre la muestra objeto de ensayo y el disco de cristal se hacía pequeña mediante los tornillos de que se ha hablado antes. Fizeau usó luz de sodio para iluminar el espacio de aire entre el espécimen y el disco de cristal, dando lugar a franjas de interferencia (anillos de Newton), producto de la luz reflejada por la superficie de abajo del disco de cristal y la superficie inclinada del espécimen. Al efectuar la prueba, el conjunto era mantenido a temperatura lo más constante posible para fijar la posición de los anillos de interferencia, para posteriormente apreciar el corrimiento de ellos con el cambio de temperatura, producto de la variación del claro de aire entre el disco de cristal y el espécimen por efecto de la dilatación relativa de la muestra con respecto a la expansión de los tornillos de aluminio. Para mediciones absolutas se precisa por tanto, conocer la dilatación de los tornillos, para lo cual, basta quitar el espécimen y observar directamente, pues el disco base tiene sus superficies trabajadas ópticamente.

Si la distancia entre las superficies o sea el claro de aire varía en  $\lambda/4$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz en-

pleada (véase figura II.5), los anillos se corren viniendo a ocupar cada anillo claro el puesto que ocupaba su adyacente oscuro. En el dilatómetro de Fizeau pueden apreciarse corrimientos de una décima parte de la distancia entre dos anillos claros consecutivos, ello representa aumento o disminución en el claro de aire de  $0.000029$  mm. siendo necesario observar el número de anillos que pasan por una marca previamente hecha, cálculo que exigía varias horas de observación pues el movimiento es sumamente lento.

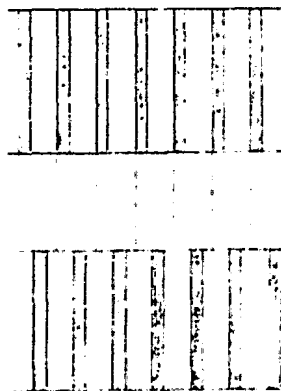


FIGURA II.5

Posteriormente, Benoit marcó 25 puntos sobre el disco de cristal con lo que mejoró el fijar la posición y el tránsito de las franjas de interferencia. Más tarde, Abbe modificó el mecanismo usado por Fizeau, haciendo planas las dos bases del espécimen y cambiando el disco de cristal por un prisma de vidrio. La cara del prisma en contacto con las puntas de los tornillos la mantenía inclinada con respecto a la superficie del espécimen, con lo que se obtenían franjas de interferencia rectas y no anillos. Además, en el método de Abbe se observan sólo las partes fraccionarias de paso, es decir, que no llegan a una distancia entre dos franjas consecutivas. El valor total de la distancia entre dos franjas se deduce observando el espécimen con luces de diferente longitud de onda, haciendo de este modo menos engorroso

sa y dilatada la observación dilatométrica de la muestra.

Pulfrich y Scheel en 1902, modificaron el aparato de Fizeau, cambiando el disco de aluminio y el de cristal por dos de cuarzo. El disco inferior era cóncavo de la superficie de abajo y plano por la de arriba. Así mismo, los tornillos del aparato de Fizeau, fueron sustituidos por un anillo de cuarzo, el cual tenía tres soportes tanto arriba como abajo (véase figura II.6). La muestra era colocada dentro del anillo de cuarzo con su superficie superior muy cerca del disco de cuarzo. En el aparato estaba montado un termostato de resistencia de platino, con el que se medía la temperatura del conjunto.

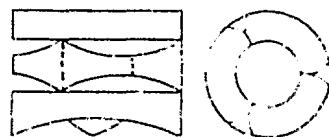


FIGURA II.6

Nix y Mac Nair, en 1941, agregaron un sistema fotográfico para tomar placas a intervalos frecuentes. Posteriormente, Weintroub usó un sistema fotoeléctrico de grabado automático como función de la temperatura del espécimen.

En 1932, Pritherch proyectó un método dependiente de la capacitancia eléctrica. El condensador es formado por un disco metálico y el espécimen, el que al dilatarse modifica la distancia entre las superficies, siendo posible medir la expansión mediante la resonancia de un circuito de alta frecuencia (véase figura II.7). Este método fué usa-

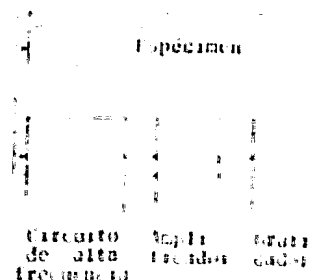


FIGURA II.7

do en 1955 por Bilj y Pullan para medir la expansión térmica del cobre, aluminio, plomo y estaño. Keyston lo usó en 1959 para medir la dilatación térmica del cobre, bario y titanio. El método es sensible para expansiones de hasta  $10^{-6}$  cm.

#### 2.1.3) DILATOMETRIA (Definición)

Por lo anterior, se dice que la dilatometría es el arte de medir los cambios en las dimensiones de un cuerpo por fenómenos tales como la expansión térmica, transformaciones alotrópicas, compresión, fluencia, etc.

#### 2.1.4.) DILATOMETRO

El dilatómetro es pues el mecanismo, aparato o sistema mediante el cual se pueden hacer observaciones en el cambio de las dimensiones de un espécimen. Este sistema puede ser tan simple como el usado por Lavoisiere y Laplace o altamente complejo como los electrónicos usados actualmente.

## 2.2) DILATACION TERMICA

Para comprender el "Por qué" y el "Cómo" de la dilatación ocurrida en las estructuras metálicas, es necesario estudiar los principios de comportamiento de la energía interna de los sólidos cristalinos.

### 2.2.1) ENERGIA INTERNA

La termodinámica, la mecánica estadística y la teoría cinética; ciencias de la energía calorífica, han contribuido al

conocimiento de los problemas térmicos, acercándose cada una de estas de forma diferente. La teoría cinética, obtiene las ecuaciones y relaciones partiendo de consideraciones atómicas y moleculares, mediante un proceso analítico basado en la mecánica atómica. La mecánica estadística ataca los problemas térmicos desde el punto de vista de las propiedades energéticas de los átomos. La termodinámica se basa en leyes admitidas de evidencias experimentales, mismas que fueron constatadas en cuerpos cuya materia contenía un gran número de átomos, lo que les confiere a las leyes un carácter estadístico promedio, desarrollándose de este modo funciones termodinámicas o relaciones matemáticas en función de temperatura, presión, volumen, entropía, entalpía y de la energía interna, sin considerar el mecanismo atómico. Este hecho hace más fáciles y precisos los cálculos, pero desafortunadamente no explica porque las modificaciones ocurren en determinada forma.

Ahora bien, los dos tipos de energía que básicamente -- pueden ser modificadas por efecto térmico en materiales cristalinos son: La energía potencial o energía de posición del átomo en la red espacial debido a las atracciones y repulsiones que ejercen los átomos vecinos, y la energía cinética de los átomos al vibrar alrededor de su posición promedio en la red espacial y la de los electrones libres. Estas dos formas de energía: cinética y potencial de todos los átomos representan la energía interna del material.

La energía térmica presente en forma de vibraciones en la red espacial teóricamente se considera como una serie de ondas de deformación superpuestas, por lo que los átomos no vibran independientemente uno de otro, pudiendo considerar a las ondas de deformación como si fueran juegos de tres ondas independientes viajando a lo largo de los ejes X, Y, y Z.

### 2.2.2) COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA

Es un hecho que cuando se transmite calor a un cuerpo, su temperatura se eleva y su energía interna aumenta. Como es sa

bido, los cationes de las estructuras metálicas a temperaturas "Cero absoluto", tienen el valor mínimo de energía potencial y cinética e implica que los cationes no vibran, por lo que la distancia interatómica promedio es también mínima (véase figura -

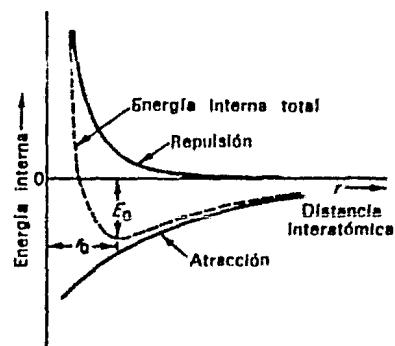


FIGURA 11.8

11.8), lo anterior nos indica que los cationes están colocados en la parte más baja de la curva de energía potencial. A medida que se aumenta la temperatura del metal se provoca una oscilación de los cationes entre valores iguales de energía potencial, dado que la curva de energía potencial es asimétrica, pues la energía de repulsión crece rápidamente al aproximarse los cationes no así la de atracción al alejarse ellos, por lo que el valor promedio de la distancia interatómica resultado de la oscilación, aumenta. Así pues, los metales generalmente aumentan sus dimensiones cuando son calentados; aunque

hay excepciones notables producto de un cambio en la estructura cristalina del metal, al pasar de una red espacial de factor de acomodamiento atómico menor a una red espacial de factor de acomodamiento mayor, siendo estos procesos usualmente reversibles.

También al calentar un metal se altera la frecuencia de vibración de sus cationes, pudiendo ser estudiada en algunos casos por observación de la variación del espectro Raman con la temperatura del metal.

El volumen de los sólidos depende de la temperatura y de la presión a la que se encuentran, pero dado que la variación del volumen con la presión es extremadamente pequeña, podemos limitar nuestro análisis a la variación del volumen sólo con la temperatura.

Experimentalmente se encuentra que el incremento de volumen de un cuerpo es proporcional al incremento de temperatura por su volumen original, cuando el incremento de temperatura es pequeño. Por consiguiente podemos escribir.

$$\Delta V = V \Delta T$$

si en la relación anterior introducimos un coeficiente de proporcionalidad " $\beta$ " tenemos:

$$\Delta V = \beta V \Delta T$$

$$\beta = (1/V) (\Delta V / \Delta T)$$

denominándose a " $\beta$ " coeficiente volumétrico de expansión térmica.

Es conveniente distinguir los sólidos isotrópicos que mantienen sus propiedades en cualquier dirección cristalina y

los cuerpos no isotrópicos que varían sus propiedades, incluyendo la expansión térmica, dependiendo de la dirección cristalina en la que son medidas. Por tanto, necesitamos introducir un coeeficiente lineal de expansión térmica, que se obtiene análogamente al coeficiente volumétrico.

$$\Delta L = L \Delta T$$

$$\Delta L = \lambda L \Delta T$$

$$\lambda = (1/L)(\Delta L/\Delta T)$$

denominándose a " $\lambda$ " coeficiente lineal de expansión térmica, el cual estrictamente hablando depende de la temperatura a que esta el cuerpo y de la temperatura de referencia que se escoja para determinar la longitud original. Es usual elegir la temperatura inicial del experimento como temperatura de referencia, de modo que la longitud del cuerpo a la temperatura final puede -- ser calculada por:

$$L_f = L_i (1 + \lambda T_f)$$

Ahora bien, si el cuerpo en estudio es una barra rec-- tangular de material isotrópico y de lados a,b,c. Cuando su temperatura se incrementa un grado las longitudes de sus lados se-- ran  $a(1+\lambda)$ ,  $b(1+\lambda)$  y  $c(1+\lambda)$  respectivamente, donde " $\lambda$ " es el -- coeficiente lineal de expansión térmica. De este modo el volu-- men final de la barra es:

$$a(1+\lambda)b(1+\lambda)c(1+\lambda) = abc(1+\lambda)^3$$

la primera parte del segundo miembro es el volumen original del cuerpo. Si el coeficiente lineal de expansión térmica " $\lambda$ " es pe



queño  $(1+\lambda)^3 \approx (1+3\lambda)$  de manera que podemos relacionar el coeficiente lineal con el coeficiente volumétrico de la forma siguiente:

$$V_f = V_i (1 + \beta T_f)$$

$$V_f = V_i (1 + 3\lambda T_f)$$

$$\beta = 3\lambda$$

Básicamente, la relación anterior es mostrada por materiales de estructura cúbica. Pero aún la mayoría de los metales que no cristalizan en la estructura cúbica, dado que son sistemas o conglomerados de cristales orientados aleatoriamente, pueden presentar este comportamiento. No así, cuando la muestra es un cristal de baja simetría, siendo su comportamiento muy anisotrópico, debido a la fuerte dependencia de la dirección cristalina. Un buen ejemplo de esto último es el zinc, el cual tiene un coeficiente lineal de expansión térmica de  $64 \times 10^{-6}$  cm por grado en la dirección paralela al eje exagonal, siendo de  $14 \times 10^{-6}$  cm por grado en las direcciones del plano basal.

Se conocen aleaciones metálicas y materiales no metálicos con un coeficiente lineal de expansión térmica muy reducido. En aleaciones, las hechas a base de fierro-niquel son un ejemplo y en materiales no metálicos destaca el cuarzo por su coeficiente de tan solo  $0.54 \times 10^{-6}$  (cm/°C), razón esta, por la que se emplea para las varillas que transmiten las dilataciones que sufren los materiales al ser ensayados.

## 2.3) TERMODINAMICA DE LAS TRANSFORMACIONES ALOTROPICAS

### 2.3.1) ENTALPIA

Si añadimos calor a un material aumentaremos su energía interna y eventualmente este efectuará un trabajo sobre el medio ambiente. Por ejemplo: por efecto de su expansión térmica. Donde de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica tenemos:

$$dQ = dU + d\phi$$

Por otra parte, la variable de estado termodinámica "entalpía" - se define como la suma de la energía interna del material y del producto de la presión por su volumen, de donde:

$$H = U + pV$$

Si se trabaja a presión constante, como es la mayoría de los casos en problemas de metalurgia, la diferencial de la entalpía -- queda:

$$dH = dU + pdV$$

Donde el segundo término del miembro de la derecha representa el trabajo mecánico de expansión o compresión del sistema.

Ahora bien, el trabajo efectuado por el material sobre el medio ambiente se reescribe:

$$d\phi = pdV + d\phi'$$

Donde  $d\phi'$  es el trabajo no mecánico efectuado por el material sobre el medio ambiente, de lo anterior tenemos:

$$dQ = dU + pdV + d\phi'$$

De donde, si sólo existe trabajo mecánico:

$$dQ = dH$$

Por lo que trabajando con materiales sólidos a presión constante es más usual utilizar la función termodinámica entalpía que la función termodinámica energía interna.

También, al añadir calor a un material su temperatura aumenta proporcionalmente al calor añadido, esto es:

$$dQ \propto dT$$

Si introducimos una constante para que la proporción sea igualdad, tenemos:

$$dQ = C dT$$

Donde a la constante "C" se le llama el calor específico. Si trabajamos a presión constante como el caso anterior tenemos.

$$dH = C_p dT$$

Al integrar la ecuación anterior tenemos:

$$H = H_o + \int_0^T C_p dT$$

En la práctica es imposible obtener valores absolutos de la entalpía, ya que no se puede obtener el valor de la entalpía a cero grados Kelvin. Sin embargo, esto es de poca consecuencia, ya que se puede definir un valor cero relativo o convencional. Usualmente se utilizan las entalpías de los elementos puros a 25°C, quedando la integral de la forma siguiente:

$$H = \int_{298}^T C_p dT$$

Si el material muestra una transformación alotrópica a la temperatura  $T_t$ , la entalpía queda definida así:

$$H = \int_{298}^{T_t} C_p^s dT + H_t + \int_{T_t}^T C_p^l dT$$

Donde  $C_p^s$  y  $C_p^l$  son los calores específicos de las fases respecti-

vas y  $H_t$  la entalpía latente de transformación, llamada también "calor de reacción".

### 2.3.2) ENTROPIA

Por todo lo anterior, el conocimiento de la entalpía de un material es importante, pero no representa un criterio para asegurar que un estado del material es estable, ni tampoco determina si ocurrirá un cambio de fase en la estructura del material

Para obtener un criterio de reacción es necesario considerar una segunda y muy importante propiedad de estado conocida con el nombre de entropía "S". Supongamos que la entropía, al igual que la entalpía, es función de la energía interna y del volumen del material.

$$S = S(U, V)$$

Ahora bien, de las definiciones de temperatura termodinámica y de presión termodinámica:

$$1/T = (\partial S / \partial U)_V \quad p/T = (\partial S / \partial V)_U$$

Podemos obtener la diferencial total de la entropía:

$$dS = (1/T)dU + (p/T)dV$$

A esta ecuación se le conoce como ecuación de Gibbs, que al reacomodar queda:

$$TdS = dU + pdV$$

Donde podemos ver que el miembro de la derecha es la diferencial de la entalpía cuando se trabaja a presión constante, de este modo:

$$TdS = dh$$

Y recordando la definición de calor específico a presión constante tenemos:

$$TdS = C_p dT$$

$$dS = C_p dT/T$$

Al integrar la ecuación anterior tenemos:

$$S = S_0 + \int_0^T C_p dT/T$$

En donde S es la entropía a la temperatura T en grados Kelvin. La constante  $S_0$  representa la entropía al cero absoluto, que puede ser aceptada como cero para materiales cristalinos.

Así pues, la entropía es una variable de estado, ya que como vimos es función sólo de variables de estado, o sea que depende únicamente del estado del sistema. Esto significa que la diferencia de entropía  $S_B - S_A$  es independiente del proceso usado para llevar al sistema del estado A hasta el estado B.

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B dQ/T$$

Sin embargo, para un proceso irreversible el incremento de entropía solo es igual a la diferencia de la entropía del estado B y de la entropía del estado A. Siendo este incremento mayor que la integral de esta misma cantidad sobre un camino irreversible:

$$S_B - S_A > \int_A^B dQ_{\text{irrev}}/T$$

$$dS > dQ_{\text{irrev}}/T$$

$$TdS > dQ_{\text{irrev}}$$

### 2.3.3) ENERGIA LIBRE DE GIBBS.

Si se trabaja a presión constante la diferencial del calor es igual a la diferencial de la entalpía. Quedando la rela--

ción anterior de la forma siguiente:

$$TdS > dH$$

$$TS > H$$

$$0 > H-TS$$

Pudiendo el miembro de la derecha de la relación anterior ser --  
igualado a una variable "G" denominada entalpía libre o energía  
libre de Gibbs.

$$G = H-TS$$

Debemos hacer notar que la entalpía libre es negativa para proces  
os irreversibles y en el extremo igual a cero para condiciones  
de equilibrio. Por lo general las reacciones espontaneas son ---  
irreversibles.

La relación  $G = H-TS$  pone de manifiesto el importante -  
papel de la entropía en la determinación de la estabilidad de fas  
es, ademas demuestra la tendencia del sistema a adoptar una conf  
figuración de baja entalpía combinada con una entropía alta. Por  
lo anterior, la fase que existirá a la temperatura considerada -  
será la que satisfaga de mejor --  
forma las condiciones antes men--  
cionadas.

Así pues, cuando en un -  
material ocurre un cambio estruc-  
tural de la fase  $\alpha$  a la fase  $\beta$  a  
una temperatura  $T_t$ , es porque la  
energía libre de Gibbs de la fase

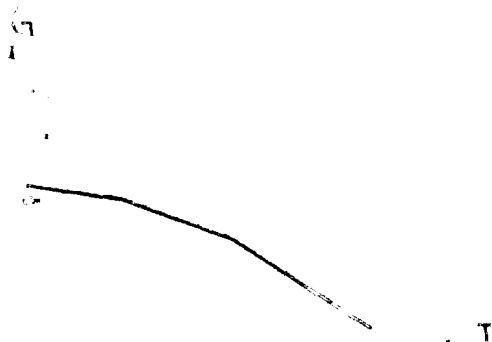


FIGURA II.9

$\beta$  es menor que la energía libre de la fase  $\alpha$ , para valores de temperatura por arriba de la temperatura de transformación (véase figura II.9). Para que esto ocurra, las entalpías libres deben variar con la temperatura. Se puede ver que a la temperatura de transformación las energías libres de Gibbs de las dos fases son iguales, de modo que  $\Delta G = 0$ ; por tanto,  $T_t$  es el punto de equilibrio de la transformación.

Es importante mencionar, que aunque el valor de  $\Delta G$  indica a que temperatura la transformación debe ocurrir, la transformación real depende también de la cinética de la reacción y de la formación de núcleos.

Con frecuencia es necesario considerar la posibilidad de transformaciones sucesivas ocurridas en un rango determinado de temperatura, resultando más conveniente examinar como varía la entalpía libre del material con la temperatura. Esto es bastante visible en la gráfica que muestra  $H$  y  $-TS$  en función de la temperatura (véase figura II.10). A una temperatura de transformación el cambio de entropía es igual al calor latente sobre la temperatura de transformación. Por consecuencia, la curva de entalpía libre " $G$ " no tiene fuertes discontinuidades a la temperatura de transformación, sino solamente una variación en su pendiente.

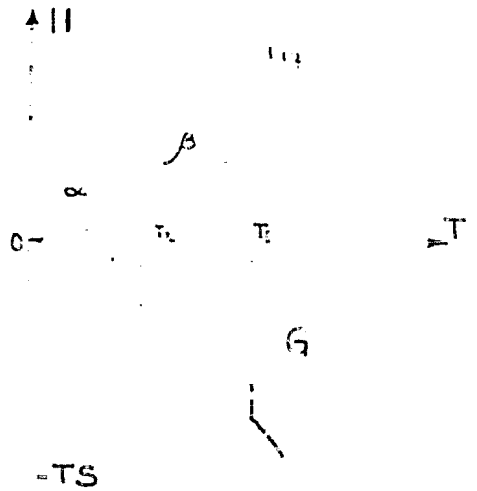


FIGURA II.10

Aunque fases de alta temperatura no pueden existir a temperaturas bajas, es teóricamente posible calcular  $H$  y  $S$  a partir de las curvas de calor específico contra temperatura y con estos datos calcular la entalpía libre teórica, que es a su vez función del calor específico y por consecuencia este término está influido por la frecuencia de vibración de los átomos.

Ahora bien, para observar el comportamiento de la energía libre de Gibbs con respecto al calor específico, diferenciamos "G" :

$$dG = dH - TdS - SdT$$

$$dG = C_p dT - T(C_p dT/T) - SdT$$

$$dG = -SdT$$

De modo que la entalpía libre a la temperatura  $T$  es:

$$G = G_0 - \int_0^T SdT$$

Al cero absoluto la entalpía libre es igual a la entalpía de donde:

$$G = H_0 - \int_0^T SdT$$

Cambiando  $S$  por  $\int_0^T C_p dT/T$  obtenemos:

$$G = H_0 - \int_0^T \left( \int_0^T C_p dT/T \right) dT$$

Esta ecuación demuestra que la energía libre de Gibbs de una fase disminuye más rápidamente con la temperatura cuando su calor específico es grande. Por lo anterior, la fase de baja temperatura tiene un calor específico más bajo que las fases de alta temperatura. De donde se desprende la importancia del calor específico del material para la energía libre de Gibbs. Así pues, expe



rimentalmente y extrapolando se observó que el calor específico de los sólidos es cero a  $0^\circ\text{K}$ , y que aumenta rápidamente a medida que aumenta la temperatura, hasta llegar a un valor aproximadamente constante a temperaturas más elevadas (véase figura 11.11).

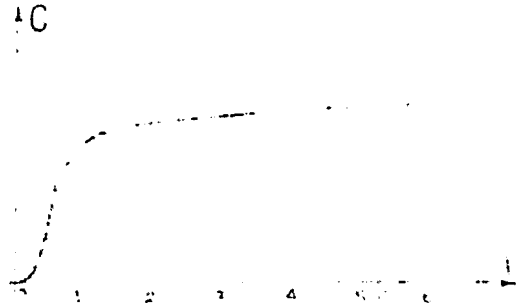


FIGURA 11.11

El aumento en el calor específico corresponde a un aumento en la habilidad de los electrones para incrementar su energía promedio y al aumento en la vibración de los átomos. Debido al principio de exclusión de Pauli, la habilidad de un electrón para aumentar su energía depende de la disponibilidad de estados vacantes a energías más elevadas, por lo que generalmente sólo los electrones cercanos al nivel de Fermi tienen acceso a los estados vacíos.

#### 2.3.4) TRANSFORMACIONES ALOTROPICAS.

En la ecuación anterior de entalpía libre y de acuerdo con el comportamiento del calor específico, el segundo término del miembro de la derecha es comparativamente pequeño a temperaturas bajas, y por tanto la fase estable es aquella que tiene el valor más bajo de  $H_0$ , es decir la fase más compacta asociada con un enlace fuerte de los átomos, y por consiguiente con una variación del calor específico menos drástica a bajas temperaturas; no así la fase con enlace menos fuerte, es decir con la entalpía más elevada a bajas temperaturas, la cual tenderá a aparecer de

mo una fase estable a altas temperaturas. Lo anterior es porque el segundo término del miembro de la derecha de la ecuación se vuelve comparativamente más importante para el segundo antes mencionado, disminuyendo la energía libre de Gibbs más rápidamente con incrementos de temperatura. Por tanto, cuando ocurre una transformación de fase, la estructura más compacta generalmente existirá por abajo de la temperatura de transformación y la fase menos densa en general por arriba de esta temperatura. desde este punto de vista un líquido que no posee una estructura con orden, tiene una entropía más elevada que cualquier fase sólida y por tanto todos los metales deben fundir a una temperatura suficientemente alta, es decir cuando el término  $TS$  sobrepase el término  $H$  en la ecuación de la entalpía libre.

La secuencia de transformación de fases en metales como el titanio, zirconio, estaño, etc. está de acuerdo con las transiciones esperadas, además los materiales alcalinos, litio y sodio que son normalmente estructuras CCCu a temperatura ambiente, pueden ser transformadas en CCCa a temperaturas por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, es interesante observar que el fierro es una excepción a esta regla, ya que tiene una estructura CCCu a bajas temperaturas, que cambia en CCCa a la temperatura de  $910^{\circ}\text{C}$ . En este caso, se supone que la estabilidad de la estructura CCCu, a baja temperatura, es asociada a sus propiedades ferromagnéticas. Teniendo una estructura CCCu, las distancias interatómicas favorecen la interacción de los electrones para tomar spins paralelos

condición para el comportamiento magnético. Como este estado es de baja entropía y también de energía interna mínima a bajas temperaturas, la estructura es preferente.

El fierro tiene interés también porque su estructura CCCu reaparece a temperaturas arriba de 1400°C. Seitz atribuye este comportamiento al calor específico grande de los electrones de fierro que es una propiedad característica de la mayoría de los metales de transición.

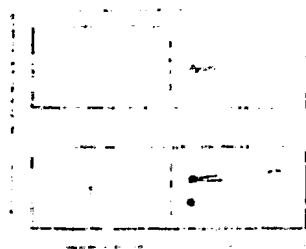
## 2.4) ANALISIS EXPERIMENTAL DE LAS TRANSFORMACIONES ALOTROPICAS.

### 2.4.1) ANALISIS TERMICO DIFERENCIAL

De forma general podemos decir que el análisis térmico diferencial consiste en la medición de las irregularidades relativas en el calentamiento de los materiales, consecuencia de las transformaciones ocurridas en estos. Las transformaciones detectadas pueden ser físicas o químicas.

La técnica del análisis térmico diferencial se basa en la evolución de la diferencia de dos temperaturas, la del espécimen y la de un patrón que no presente ninguna anomalía en el rango de temperaturas considerado. El patrón se escoge de tal manera que posea un poder emisor o conductividad calorífica, lo más próxima posible a la del cuerpo objeto de estudio, a fin de que las curvas no presenten desviaciones. Para aleaciones de fierro, se utiliza con frecuencia una aleación tipo puros (Ni 580, Cr 1

y W 2%). El espécimen y el patrón se colocan paralelamente en la zona isotérmica de un horno eléctrico. Dentro de una cavidad --- practicada en el espécimen se coloca una parte de un par termo--- eléctrico diferencial y la otra dentro--- del patrón. Un tercer par se coloca den--- tro del patrón y es destinado a indicar - la temperatura del ensayo (véase figura - II.12).



El par diferencial, generalmente      FIGURA II.12

está constituido por un hilo de platino que une dos hilos de plati--- no-rodio, formando de esta manera dos pares simples en oposi--- ción.

Cuando el espécimen y el patrón se encuentran a la mis--- ma temperatura, no aparece ninguna fuerza electromotriz en las - terminales del par diferencial. En cambio, cuando ocurre en el - espécimen una transformación su temperatura es distinta de la -- del patrón y puede medirse una fuerza electromotriz en las termi--- nales del par diferencial.

Es apropiado considerar una comparación entre la curva del análisis térmico diferencial y las curvas de calentamiento - individuales del espécimen y del patrón. Se asumirá que el espé--- cimen experimentará una transformación de tipo alotrópica (véase figura II.13). Las curvas de calentamiento del patrón y del espé--- cimen coincidirán de "A" hasta "B". En "B" se inicia la transfor--- mación alotrópica, por lo que la temperatura del espécimen se --

atrasará de la temperatura del patrón. La transformación alotrópica del espécimen no será a temperatura constante debido al incremento de la temperatura del ambiente a que está expuesto. En el punto "C", la diferencia entre las temperaturas del espécimen y la del patrón es máxima, continuando la transformación alotrópica hasta el punto "D", donde la temperatura del espécimen ya transformado alcanzará rápidamente a la temperatura del patrón, cosa que ocurre en "E". De "E" a "F" ambos materiales registran la misma temperatura.

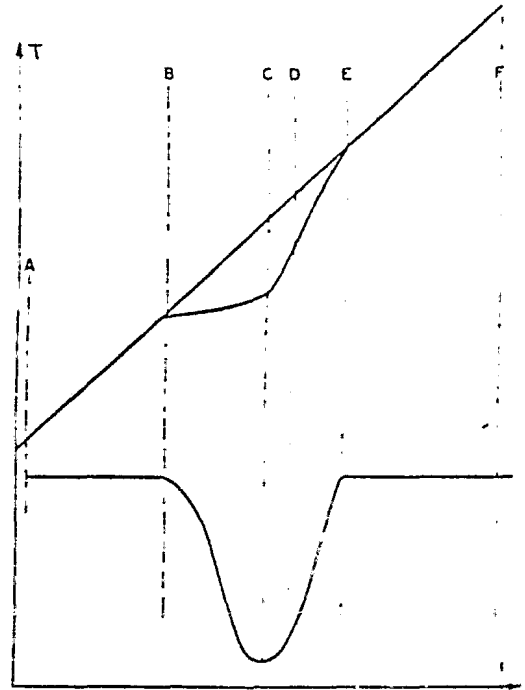


FIGURA II.13

La curva inferior es la del análisis térmico diferencial. Como no existe diferencia de temperatura entre el espécimen y el patrón desde "A" hasta "B", no se generará fuerza electromotriz en las terminales del par termoeléctrico diferencial, resultando esto en una curva de pendiente cero. Como la transformación ocurre de "B" a "D" existirá una diferencia de temperatura entre el espécimen y el patrón, causando una fuerza electromotriz en las terminales del par diferencial. En "D" la transformación alotrópica ha sido completada, y ya sin el obstáculo que representa la energía necesaria para la transformación, el espécimen

men empieza a incrementar rápidamente su temperatura hasta que - en "E" da alcance a la del patrón, esta porción de la curva representa el período de tiempo necesario para que las temperaturas del patrón y del espécimen sean iguales. Por acuerdo, las transformaciones endotérmicas se representan por una flexión hacia abajo de la curva del análisis térmico diferencial, contrariamente a la representación de las transformaciones exotérmicas. Desde "E" hasta "F" el par diferencial no registrará diferencia entre las temperaturas del espécimen y del patrón, resultando esta nuevamente como una curva de pendiente cero.

El método de análisis térmico diferencial es muy sencillo en teoría, pero su correcta aplicación requiere gran cuidado

#### 2.4.2) ANALISIS RADIO CRISTALOGRAFICO

Este método experimental fue concebido y diseñado básicamente para el estudio de los radios atómicos y la orientación de los planos en materiales cristalinos. Pero si se hace el experimento con un espécimen sujeto a un incremento de su temperatura, se puede obtener información de la dilatación del material, así como de las transformaciones alotrópicas que pudieran ocurrir en el rango de temperaturas considerado .

Dado que los materiales cristalinos son formaciones simétricas de átomos, son capaces de actuar como retículas de difracción, y una de las condiciones para que la radiación incidente sobre el material tenga difracción es que el espaciamiento entre planos atómicos sea aproximadamente igual a la longitud de -

onda de la radiación. Por la limitante anterior, la radiación mediante rayos X es la adecuada para el análisis radio cristalográfico, ya que los emitidos por tubos de bajo voltaje tienen longitudes de onda similares a las distancias interplanares de los materiales cristalinos; el voltaje de estos tubos de rayos X varía entre 20 000 y 50 000 voltios.

Cuando los rayos X son reflejados por un conjunto de planos atómicos (véase figura II.14), solamente para ciertas

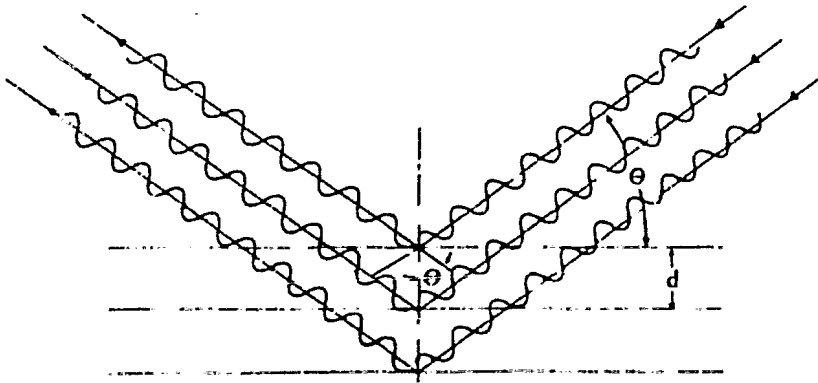


FIGURA II.14

condiciones ocurre interferencia constructiva o difracción, y la ley que gobierna este caso es la de Bragg. Para obtener la expresión que nos relaciona los parámetros involucrados, consideraremos sólo dos planos atómicos A, B y dos rayos X a, b (véase figura II.15). Para que haya interferencia constructiva la diferencia de caminos recorridos por los rayos X debe ser un múltiplo entero de su longitud de onda y

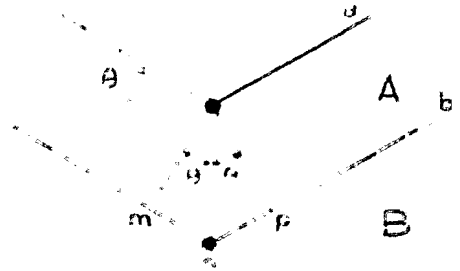


FIGURA II. 15

el ángulo de incidencia " $\theta$ " debe ser igual al de reflexión, requiriendo esto último una orientación específica del cristal. La diferencia de caminos es la marcada como " $m\lambda$ " y debe ser igual a " $n\lambda$ " donde  $n = 1, 2, 3, \dots$ . La distancia " $m\lambda$ " en función del ángulo de incidencia es  $m\lambda = d \sin\theta$  y la " $op$ " es  $op = d \sin\theta$  por tanto:

$$n\lambda = m\lambda + op$$

$$n\lambda = d \sin\theta + d \sin\theta$$

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

Siendo la expresión anterior la ley de Bragg.

Sin embargo, se debe hacer notar que el haz de rayos X es reflejado no sólo por los átomos de los dos primeros planos, sino también por los átomos bajo la superficie hasta una profundidad considerable. Por lo anterior, no todas las familias de planos atómicos producen difracción ya que existen planos en los que la interferencia es destructiva, esto significa que rayos incidentes en fase emergen desfasados en  $\lambda/2$ . De este modo las familias de planos que permiten interferencia constructiva en las redes cúbicas son:

Cs	Todas las familias de planos
CCCu	Los planos donde la suma del cuadrado de sus índices es par
CCCa	Los planos en los que sus índices son todos pares o todos impares

La técnica del análisis radio cristalográfico se basa -



en el método de Debye-Scherrer. En este método se hace incidir un haz de rayos X, que es previamente pasado a través de un conjunto de filtros para obtenerlo monocromático, sobre un espécimen policristalino, de este modo habrá algunos cientos de cristales con la orientación adecuada para producir interferencias constructiva, esto en función solo de la distancia interplanar  $d_1$  prevaleciente a la temperatura  $t_1$  considerada, donde el ángulo de difracción del rayo X es:

$$\theta_1 = \text{ang sen}(n\lambda/2d_1)$$

Al incrementar la temperatura del espécimen, los cristales que anteriormente producían interferencia constructiva dejarán de hacerlo, ya que la orientación que tienen no es ahora la adecuada para que con la nueva distancia interplanar, resultado de la expansión térmica, produzcan dicha interferencia. Pero otros cientos de cristales tendrán una orientación apropiada para producir difracción con la nueva distancia interplanar. Por lo que ahora el ángulo del haz difractado es:

$$\theta_2 = \text{ang sen}(n\lambda/2d_2)$$

De este modo, al variar la temperatura del espécimen la distancia entre planos atómicos también varía, y puede ser determinada mediante los valores del ángulo de difracción, el cual se imprime durante el ensayo en placas fotográficas de forma curva a intervalos de tiempo apropiados (véase figura II.16). Las impresiones obtenidas serán círculos, los que permitirán calcular el ángulo de difracción " $\theta$ " del haz de rayos. El radio " $r$ " de la

impresión es el arco de la placa fotográfica curva y "R" su radio de curvatura ,de donde:

$$2\theta = r/R$$

$$\theta = r/2R$$

Que es el ángulo de Bragg en radianes. expresado en parámetros medibles directamente. De modo que podemos calcular la distancia interplanar a la temperatura considerada, y por tanto, la dilatación y las

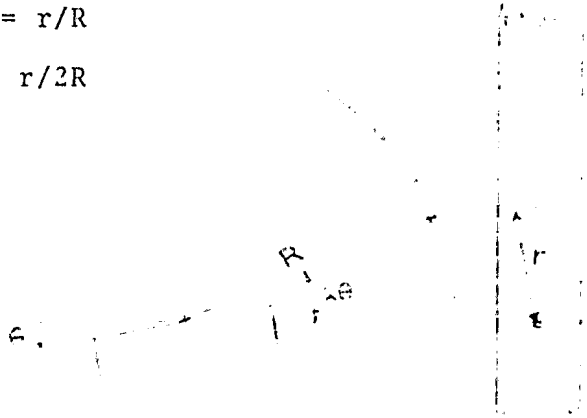


FIGURA II.16

transformaciones alotrópicas durante el ensayo mediante la relación:

$$d_i = \lambda / 2 \sin(r_i / 2R)$$

Esto para una familia de planos, donde el subíndice "i" denota a que temperatura fue hecho el cálculo.

#### 2.4.3) ANALISIS TERMICO DILATOMETRICO

Sin lugar a dudas, el análisis térmico dilatométrico es el método más simple mediante el cual podemos obtener información del cambio de dimensiones, así como de las fases de un material. Los datos obtenidos mediante este método son precisos, confiables y fáciles de interpretar; además, la presencia de impurezas en el material no causa errores considerables.

El análisis térmico dilatométrico puede ser absoluto o diferencial (relativo) y es fundamental en el estudio de los pun

tos críticos (cambio de estructura cristalina) de los metales.

La dilatometría diferencial es un método en el que la expansión térmica de un espécimen es comparada con la de un patrón de referencia, mediante un sistema generalmente mecánico (veanse figuras II.17 y II.18). El método es de un gran potencial, pues en muchas ocasiones se requiere más la expansión de un material con respecto a otro, que la expansión absoluta de cada uno de los materiales. Un caso particular es considerar la dilatación del sistema de medición como patrón de referencia.

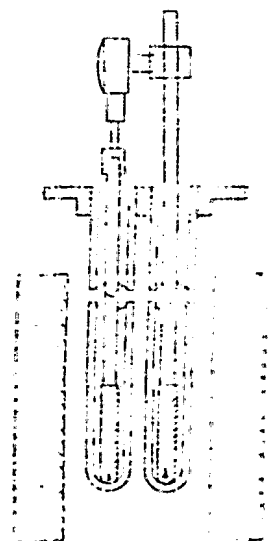


FIGURA II.17

La dilatometría absoluta en rigor no existe, pues para obtener información directa de dilataciones absolutas se requeriría que el sistema con que se hace el ensayo no se dilatara y esto es físicamente imposible; pero para valores prácticos de expansión basta considerar la dilatación del sistema de medición y los valores obtenidos son absolutos.



FIGURA II.18

La técnica del análisis térmico dilatométrico se basa en la medición directa de la variación en las dimensiones del espécimen cuando se hace variar su temperatura. La medición se hace generalmente mediante un sistema mecánico u óptico.

Los sistemas ópticos se basan en la difracción de un haz de rayos luminosos (vease 2.1.2, párrafos referentes al método interferométrico de Fizeau).

Los sistemas mecánicos básicamente están constituidos por palancas y barras de cuarzo. La dilatación del espécimen es transmitida por una de estas barras a un sistema transductor-amplificador para posteriormente ser graficada o registrada fotográficamente.

Para una adecuada interpretación de una curva dilatométrica consideraremos la transformación alotrópica del hierro puro en la proximidad de los 910°C (vease figura II.19). La curva

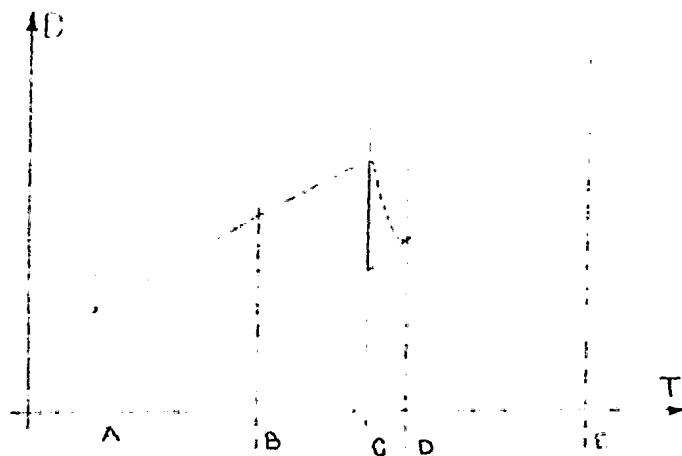


FIGURA II.19

de dilatación desde "A" hasta "C" no presenta una variación importante en su pendiente, misma que puede ser interpretada como el coeficiente lineal de expansión térmica  $\lambda_1$  del hierro puro en su estructura cúbica centrada en el cuerpo; sin embargo, en "B"

a 768°C se presenta una pequeña variación en la pendiente, producto del cambio magnético a no magnético del hierro. En "C" se inicia la transformación alotropica de la estructura cúbica centrada en el cuerpo a la cúbica centrada en las caras, por lo que el valor de la curva de dilatación disminuye, terminando esta transformación en "D". Si el incremento de temperatura es suficientemente lento, la transformación se hará isotérmicamente. Desde "D" hasta "E" nuevamente la curva de dilatación no presenta variación en su pendiente; pero es importante hacer notar que esta pendiente es diferente a la de la curva de dilatación comprendida entre "A" y "C", este nuevo valor de la inclinación de la curva de dilatación representa el coeficiente lineal de expansión térmica  $\lambda_2$  del hierro puro en su estructura cúbica centrada en las caras. De lo anterior, concluimos que cuando se presenta una transformación alotrópica se registra una fuerte discontinuidad en la curva dilatométrica o sea en valores de dilatación.

## BIBLIOGRAFIA

- Enciclopedia Universal Ilustrada Europea; Tomo XVIII  
Espasa-Calipe 1958
- An Advanced Treatise on Physical Chemistry; Tomo III  
J.P. Partingfo  
Longmas Green and Co. 1952
- Encyclopedia Dictionary Of Physics ; Tomo II  
J. Thewlis  
Macmillan Co. 1962
- Ciencia de Materiales para Ingeniería  
Dr. Yvan Houbaert Irmen  
Facultad de Ingeniería U.N.A.M. 1976
- Introducción a la Metalurgia Física  
Sidney M. Avner  
Mc Graw-Hill 1978
- Termodinámica  
William C. Reynolds  
Mc Graw-Hill 1967
- Fundamentos de Termodinámica  
Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag  
Limusa 1973
- Metalurgia General  
J. Bernard, A. Michel, J. Philibert, J.Talbot  
Hispano Europea 1973
- Standar Methods of Chemical Analysis; Tomo III, Parte A  
Frank J. Welcher  
Van Nostrand Reinhold Co.1966
- Treatirse on Analytical Chemistry; Tomo VIII, Parte 1  
I.M. Kolthoff, Philip J. Elving  
Interscience publishers 1968
- Encyclopedia of Science and Technology; Tomo XIII  
Mc. Graw-Hill 1960

C A P I T U L O   I I I  
EQUIPOS PARA DILATOMETRIA

3.1) DILATOMETROS NETZSCH-GERATEBAU GMBH SELB

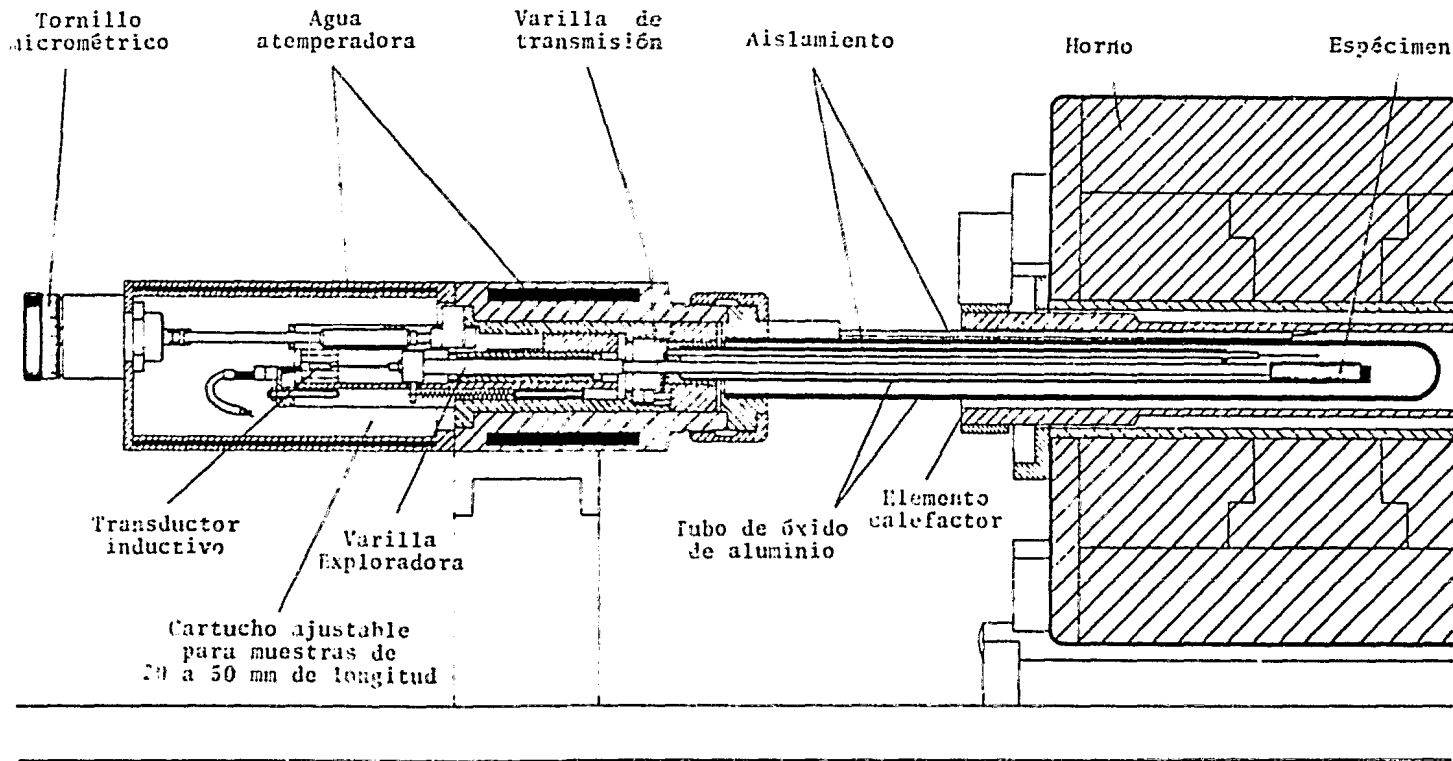
3.1.1) CARACTERISTICAS

En estos dilatómetros hay diseños para operar horizontalmente o para operar verticalmente. Utilizan alúmina y sílice vítreo para sujetar el espécimen. Los dilatómetros Netzsch cubren ensayos entre las temperaturas de  $-160^{\circ}\text{C}$  a  $1700^{\circ}\text{C}$  y operan con una cabina de control común. Además, están disponibles para hacer pruebas en aire, vacío y atmósferas de gas.

3.1.2) MODELO 402 E

La unidad del dilatómetro para altas temperaturas consiste de una base sólida, en la que la caja del cabezal de medición, el soporte del espécimen y el horno, son colocados horizontalmente ( véase figura III.1). El tubo de protección a prueba

FIGURA III.1





de aire puede ser reemplazado por uno con gas en circulación, cubriendo de este modo enteramente el soporte de la muestra, garantizando que el espécimen está situado en la zona donde la temperatura es homogénea. El equipo del horno se encuentra sobre un carro corredizo, lo cual le permite ser colocado en la posición más adecuada.

En la prueba, el espécimen se encuentra dentro de un tubo cerrado en uno de sus extremos, siendo ahí donde reposa el espécimen. El tubo puede ser de cuarzo ( Para temperaturas no mayores de  $1000^{\circ}\text{C}$  ) o de alúmina ( Para temperaturas hasta  $1700^{\circ}\text{C}$  ). Una varilla de exploración hecha del mismo material y libre de fricción transmite los cambios de longitud del espécimen a un transductor inductivo. La temperatura del ensayo se registra mediante un par termoeléctrico en contacto con el espécimen.

El transductor inductivo capta el cambio en la longitud del espécimen, el cual se convierte en voltaje y amplifica. Para la amplificación se utiliza un amplificador que maneja una frecuencia de 5000 Hz (véase figura III.2). El sistema tiene un límite máximo de amplificación de 10000 veces y con el contador automático de voltaje del aparato de registro, se logra una sensibilidad de 100000 veces.

Un circuito de balanceo hace posible tomar electrónicamente las expansiones de especímenes entre 25 y 50 milímetros de largo. Por lo anterior todos los especímenes son medidos como si fuesen de 50 milímetros, por lo que los diagramas pueden ser fá-

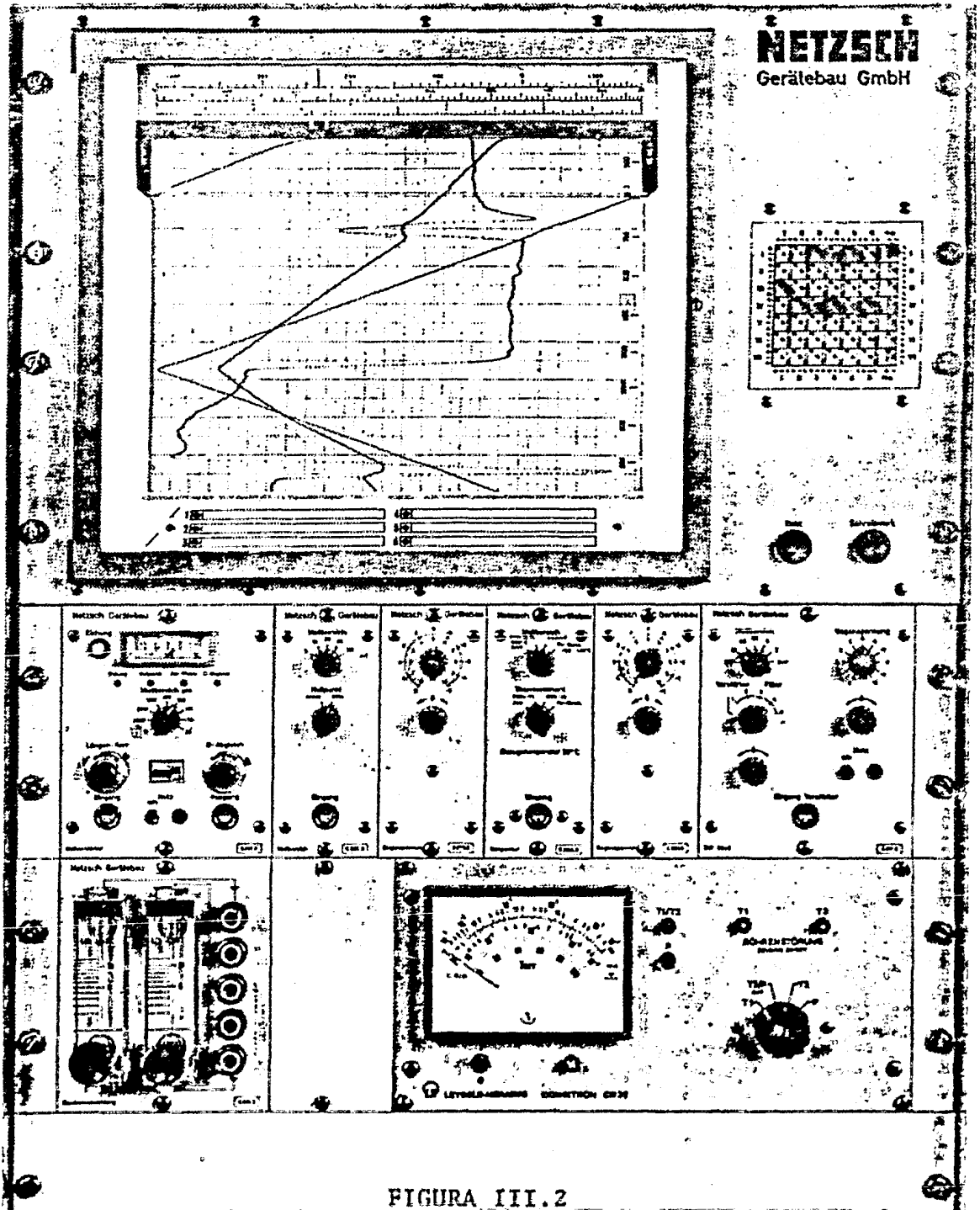


FIGURA III.2

cilmente comparados.

### 3.1.2.1) ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura.	25-1320°C horno con bobina de Kanthal. 25-1550°C horno con tubo calentador de carburo de silicio (SiC). 25-1700°C horno con bobina de molibdeno o bobina de rodio.
Razón de incremento de la temperatura.	0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100°C/min.
Sensibilidad.	50, 100, 200, 500, 1000, 2000 microvolts con 250 mm de ancho de grabado.
Rangos de sensibilidad en el cambio de longitud.	25, 50, 125, 250, 500, 1250, 2500, 5000 micras.
Unidad graficadora.	Carta para imprimir de 250 mm de ancho - con 6 plumas impresoras de <u>di</u> ferente color.
Par termoeléctrico.	Pt-PtRh 10% y 18% de Rh para 20-1600°C y 20-1800°C respectivamente. NiCr-Ni para 20-1200°C.
Forma de la muestra.	14 mm de diámetro y 50 mm de longitud.
Potencia requerida.	3.5KVA a 220V 50 0 60Hz.

### 3.1.3) MODELO 402 EP

El dilatómetro Netzsch 402 EP ( véase figura III.3) con tubo de sílice vítreo puede hacer pruebas en aire y tiene un ran

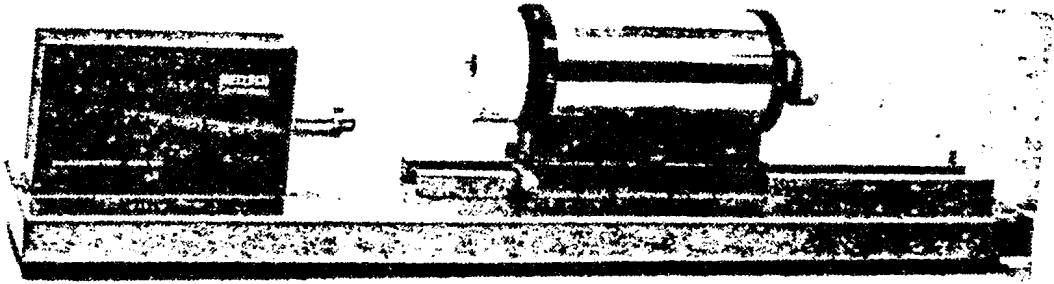


FIGURA III.3

go de temperatura desde  $25^{\circ}\text{C}$  hasta  $1100^{\circ}\text{C}$ . El horno y el cabezal de medición están montados en una base con carriles guía. El horno está devanado con alambre Kanthal para un servicio máximo de  $1200^{\circ}\text{C}$ . La medición es hecha con un transductor inductivo, teniendo como límite un desplazamiento de 5 milímetros. La longitud del espécimen puede ser de 25 a 50 milímetros con un diámetro de 12 milímetros.

El registro de la dilatación (véase figura III.1) se hace sobre papel de 210 por 297 milímetros. La temperatura es representada sobre el eje de las X. La expansión se representa sobre el eje de las Y, siendo el límite de medida de 0, 100, 200, 300, 400, 1800 y 4500 todas estas escalas en micras.

La temperatura del horno es controlada por un sistema programable con capacidad de  $0.1^{\circ}\text{N}$  a  $100^{\circ}\text{F}$  por minuto. La potencia es suministrada por una unidad de poder con dos rectificadores de silicio, un control amplificador y un superíndice. La potencia nominal es de 500 VA con 110 V a 50 ciclos. El sistema

programable de control está situado con los controles de graficación. Las dimensiones del dilatómetro son de 210 mm X 220 mm X 900 mm con un peso de 15 kilogramos. Las dimensiones del graficador y del sistema de control son de 45 mm X 452 X 565 mm con un peso de 35 kilogramos.

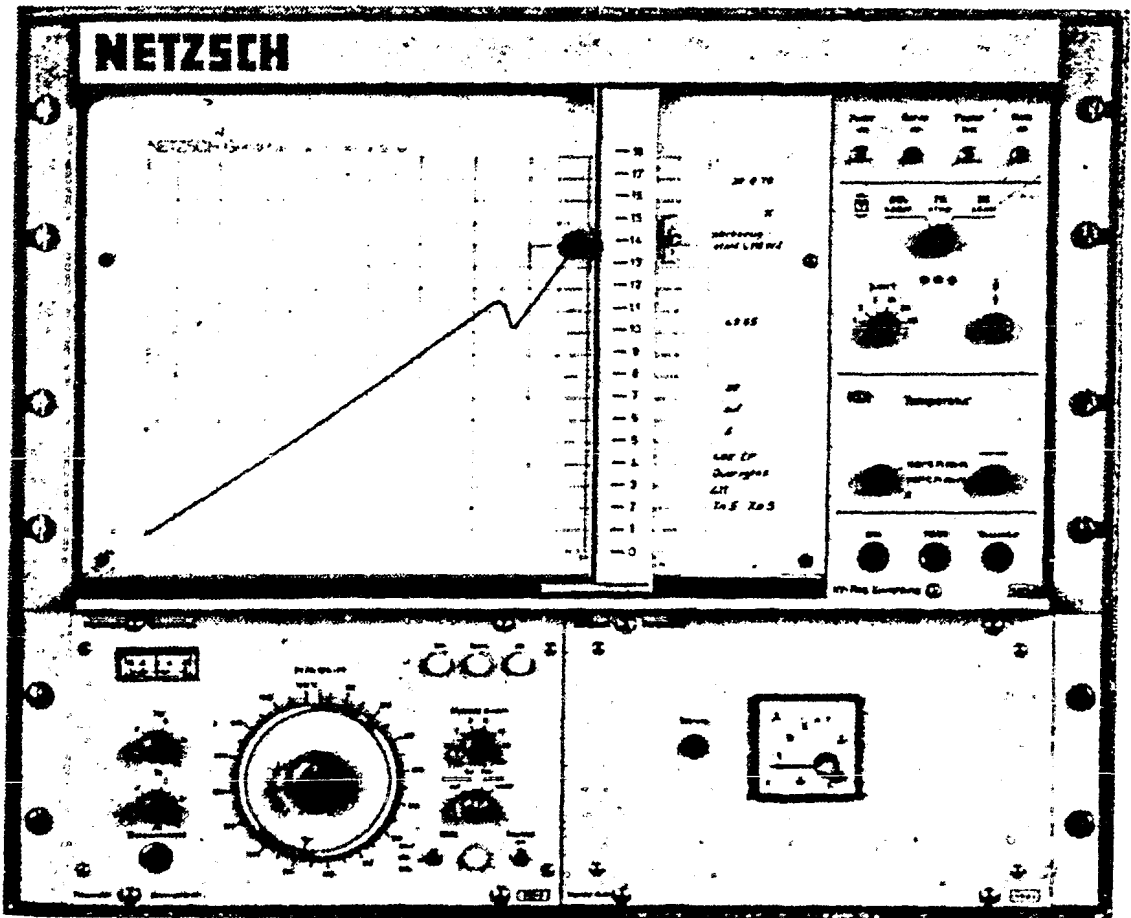


FIGURA III.4

#### 3.1.4) MODELO 402 EI

Este modelo vertical del tipo criogénico (véase figura III.5) cuenta con un horno equipado con una resistencia bobinada.

utilizando un tubo de sílice ví--  
treo para hacer pruebas en aire,  
vacío y atmósfera de gas. Sus lí-  
mites de temperatura son de -160  
grados Celsius a 420°C y las di--  
mensiones máximas del espécimen -  
son de 50 milímetros de largo por  
12 milímetros de diámetro.

#### 3.1.5) MODELO 402 ES

El dilatómetro Netzsch -  
402 ES (véase figura III.6) para  
alta temperatura tiene un tubo de  
carburo de silicio en el horno y  
un tubo de alúmina para el espéci-  
men. Este modelo realiza pruebas -  
en aire, vacío y atmósferas de gas.  
El rango de temperaturas va desde  
25°C hasta 1600°C.

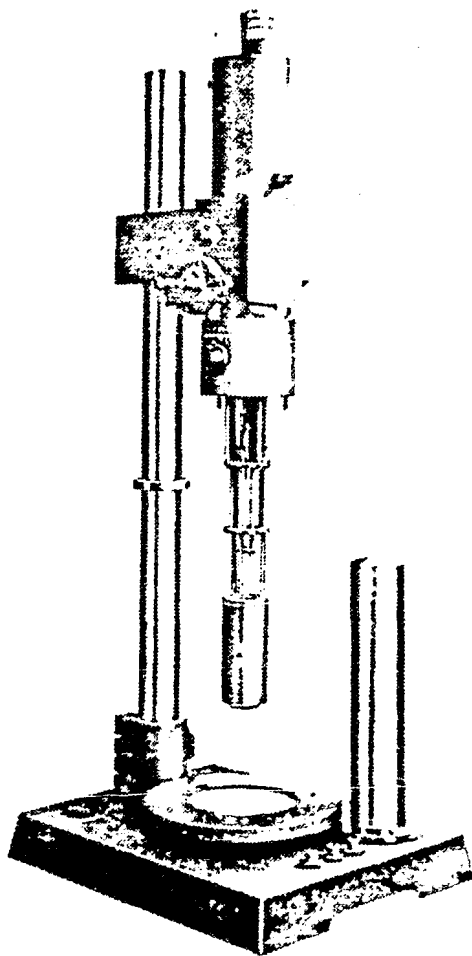


FIGURA III.5

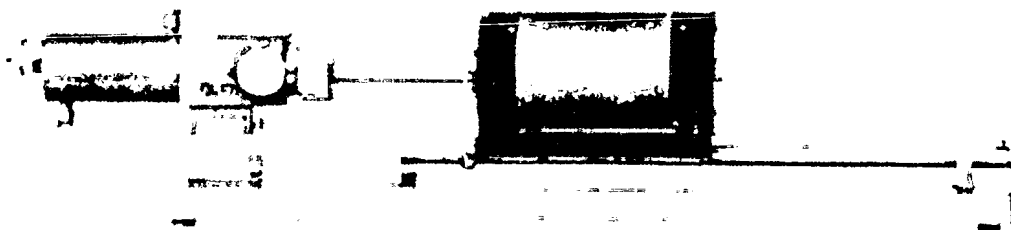


FIGURA III.6

### 3.1.6) MODELO 402 EV

El dilatómetro vertical para alta temperatura Netzsch 402 EV (véase figura III.7) está especialmente diseñado para especímenes largos. Para pruebas en aire su rango de temperaturas es de 25 grados Celsius a 1550 grados Celsius.

Los especímenes de 55 milímetros de diámetro pueden ser ensayados directamente en este dilatómetro. Especímenes con un diámetro superior, pueden ser probados sobre una carta preseleccionada.

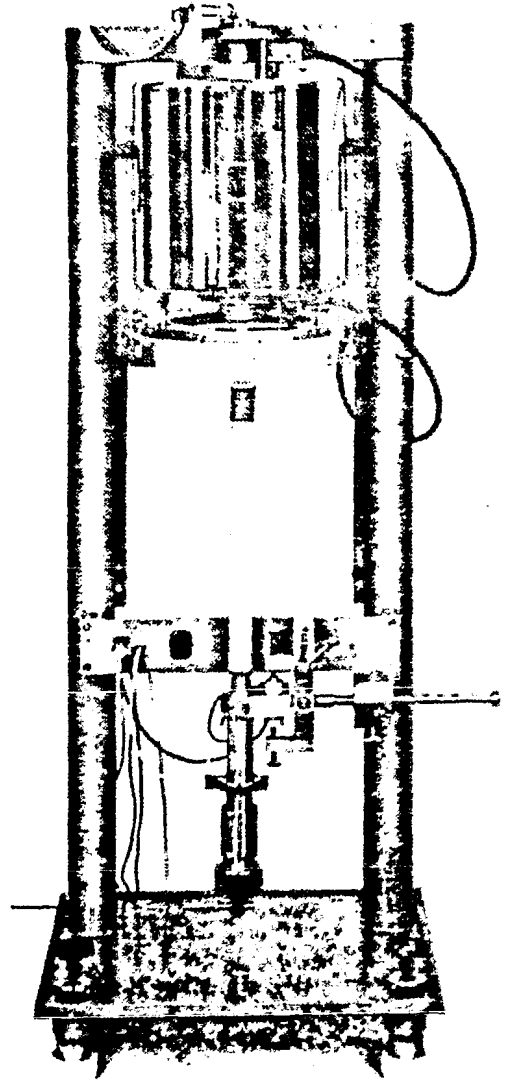


FIGURA III.7

## 3.2) DILATOMETROS THETA

### 3.2.1) CARACTERÍSTICAS

Los dilatómetros theta son horizontales y pueden ser utilizados para hacer mediciones desde -190 °C hasta 2000 °C. Los dilatómetros theta son utilizados para medir la expansión térmica de los materiales. Los dilatómetros theta son utilizados para medir la expansión térmica de los materiales. Los dilatómetros theta son utilizados para medir la expansión térmica de los materiales.

Este dilatómetro es de tipo compacto y completamente --  
automático (véase figura III.8), además cuenta con un control de

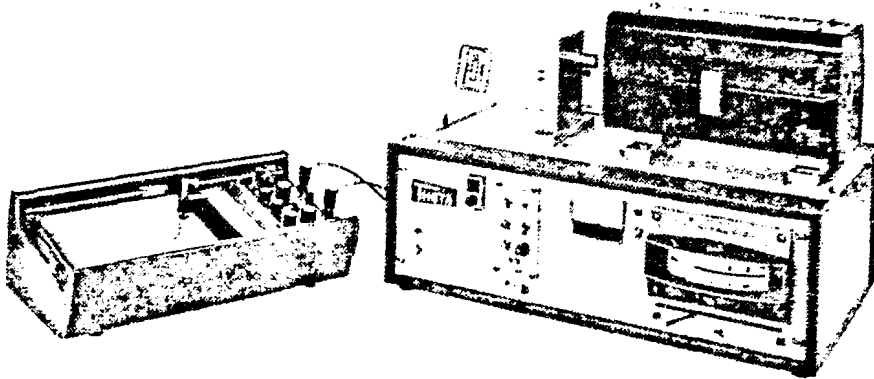


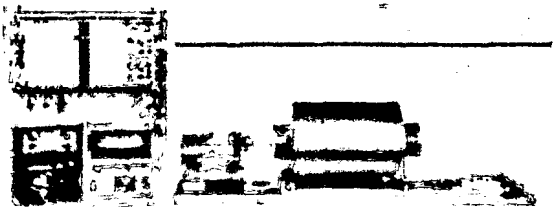
FIGURA III.8

temperatura con retroalimentación proporcional. Cuenta también --  
con un horno dividido que permite un fácil acceso a la varilla --  
de transición y un más rápido enfriamiento.

Este modelo puede manejar dos módulos intercambiables --  
de medición, uno lineal y otro de tipo diferencial. La temperatu --  
ra máxima de operación es de 1000°C y puede obtenerse de tipo --  
criogénico con una temperatura mínima de -150°C.

#### 3.2.31 MODELO DILATRONIC II

Es un dilatómetro automático diseñado para ensayos en --  
vacío (véase figura III.9), de --  
amplio rango de temperatura de



operación, tanto de tipo diferencial

como de tipo lineal.

El modelo DILATRONIC II es un dilatómetro

automático diseñado para ensayos en

vacío (véase figura III.9), de

amplio rango de temperatura de

operación, tanto de tipo diferencial

como de tipo lineal.



Además tiene un control de temperatura retroalimentado proporcional.

El dilatrónico II dispone de accesorios para análisis térmico diferencial o para térmico dilatométrico.

### 3.2.4) MODELO DILATRONIC III

Es un modelo automático (véase figura III.10) con un rango de temperatura de  $-160^{\circ}\text{C}$  a  $1650^{\circ}\text{C}$ . Las proporciones de calentamiento son iguales a las del dilatrónico II. Cuenta con un horno de inducción con gas inerte. El dilatrónico III está disponible en 2 modelos de alta temperatura, uno de operación atmosférica y otro de operación al vacío.

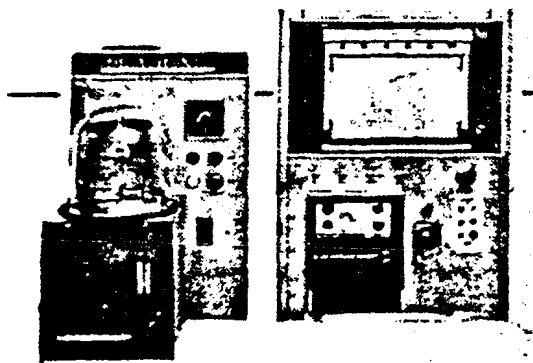


FIGURA III.10

### 3.2.5) MODELO DILATRONIC IV

Equipo de alta precisión para pruebas científicas, indispensable para comparar el comportamiento de los metales, control de calidad y estudios cristalográficos. Completamente automático (véase figura III.11) con un rango de temperatura de  $-160$  grados Celsius a  $1750$  grados Celsius. También presenta una señal

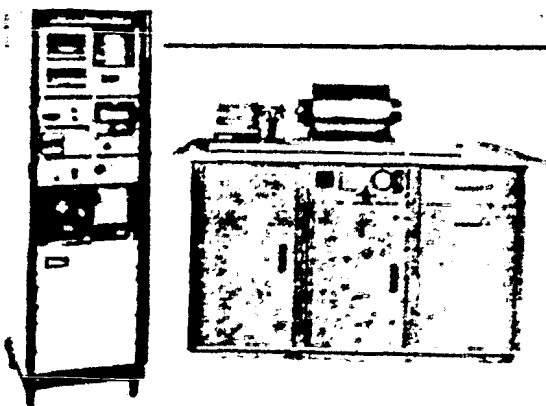


FIGURA III.11

condicionadora de temperatura, que la mantiene dentro de un margen de  $0.01^{\circ}\text{C}$ . Sensible para expansiones de  $2.5 \times 10^{-5}$  milímetros. Su pantalla registradora digital y su impresora son compatibles con algunas computadoras.

### 3.2.6) MODELO DILATRONIC V

El dilatómetro Theta modelo dilatrónico V (véase figura III.12) posee un límite de temperatura muy elevado, para hacer

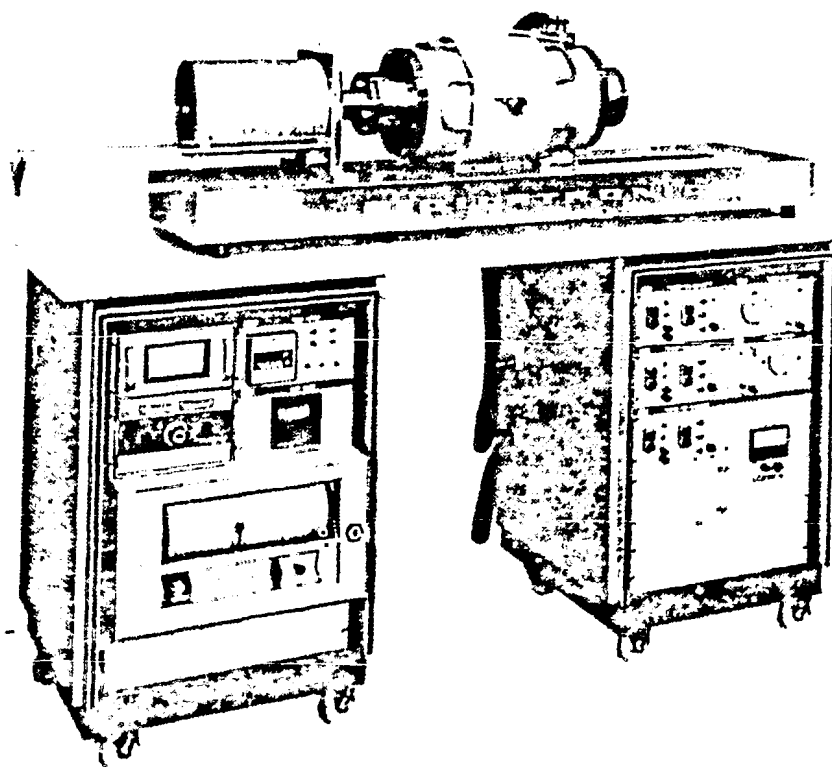


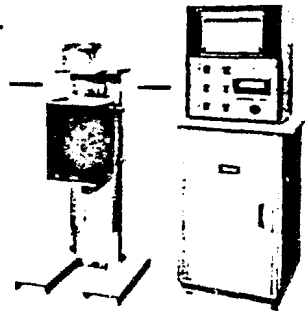
FIGURA III.12

pruebas hasta  $3000^{\circ}\text{C}$ . Un tubo horizontal de metal refractario es utilizado para sujetar el espécimen. Las varillas de transmisión están dispuestas para efectuar ensayos en atmósferas al vacío. Dispone de un registro digital para realizar mediciones de

exactas.

### 3.2.7) MODELO DILATRONIC VI

Es un equipo de muestréo múltiple (véase figura III.13) Maneja 5 especímenes y un patrón. La temperatura y la expansión son registradas en una grabadora de 6 canales. La grabadora incluye una consola programable. Este dilatómetro es ideal para el control de producción.



### 3.2.8) MODELO DILATEINIC VII

Este dilatómetro automático (véase - figura III.14) mide los cambios dimensionales de especímenes grandes, tales como un ladrillo. En ocasiones la muestra completa se comporta de manera diferente, en un ensayo - térmico, a una pequeña sección de esta; de modo que un método de medición no destructivo puede dar - información más completa. Los ensayos pueden ser hasta 1700°C y los cambios dimensionales son registrados sobre una gráfica contra tiempo o temperatura.

El modelo tiene 10 velocidades de calentamiento y pueden ser seleccionadas en un control - programable. El horno es vertical

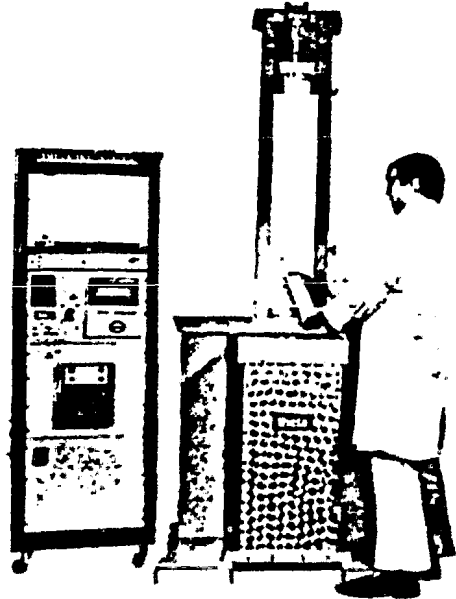


FIGURA III.14

montado sobre una columna con el cabezal de medición localizado arriba.

### 3.2.9) MODELO DILATRONIC X

Este modelo es un nuevo instrumento para estudiar el poder de sinterizado de polvos metálicos. El dilatrónico X (véase figura III.15) es particularmente poderoso como herramienta de laboratorio pues puede hacer ensayos dependiendo de la temperatura aplicada o en relación a las densidades presentes del espécimen compactado a presión durante tiempos preestablecidos. El sistema cuenta con errores en el incremento de presión de 1 o 2 gramos. El control de atmósfera de gas cuenta con un flujómetro y válvulas para la purga del sistema.

Para ensayos isotérmicos el horno puede ser empleado a temperatura constante y retirado después de terminada la prueba para ceder la carga calorífica a la siguiente muestra. El sistema cuenta con un plato base extra largo para simplificar la operación.

#### 3.2.9.1) ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura.	25-1600 grados Celsius
Razón de incremento.	Automática, programable con 12 razones - constantes de 0.1 a 100°C/min.
	Modos de programa: incremento y decrementos automáticos y parar.
Amplificación.	10X-10,000X seleccionados con un control digital de amplificación.

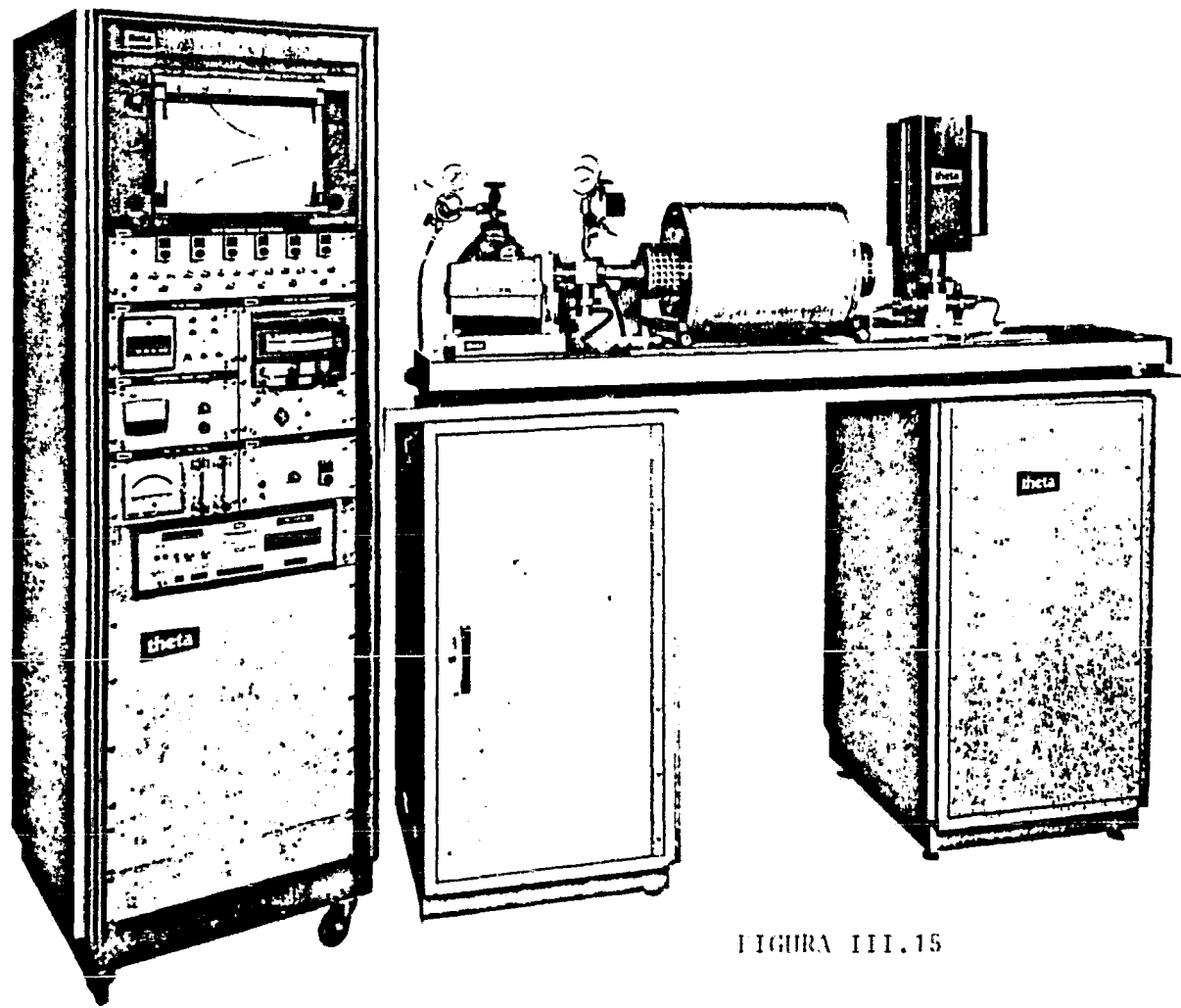


FIGURA III.15

Unidad graficadora.	Carta de 25 cm. de ancho, 2 plumas.
Forma de la muestra.	12 mm. de ancho X 25 mm. de largo.
Potencia requerida.	3000 Watts a 220 volts C.A.

### 3.3) DILATOMETROS HARROP

#### 3.3.1) CARACTERISTICAS

Estos dilatómetros son construidos horizontalmente, utilizando cuarzo y alúmina para sostener el espécimen, los equipos Harrop se diseñan para determinar expansiones térmicas en un rango de temperatura desde  $-180^{\circ}\text{C}$  hasta  $1600^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.3.2) PRINCIPIO DE OPERACION

El espécimen se coloca en el sujetador de cerámica y en contacto con una varilla de transmisión de cuarzo. El sujetador y el espécimen se introducen en la zona isotérmica del horno --- eléctrico, cuya temperatura es variada y controlada desde un tablero de control. Al variar la temperatura del espécimen, este se dilata o se contrae y el cambio en su longitud " $\Delta L$ " es transmitido por una varilla de cuarzo al sistema transductor diferencial, el cual convierte este cambio de dimensión en una señal -- proporcional de voltaje, señal que es registrada como la función " $\Delta L$ ". Un par termoeléctrico en contacto con el espécimen proporciona la temperatura " $T$ " del ensayo, siendo la gráfica  $\Delta L$  contra  $T$  la curva básica del análisis térmico dilatométrico.

#### 3.3.5. MODELO TDA III

El sujetador y el transductor diferencial están montados en una reglilla equipada con un micrómetro de precisión (véase figura III.16), con el que se fija la posición de la varilla

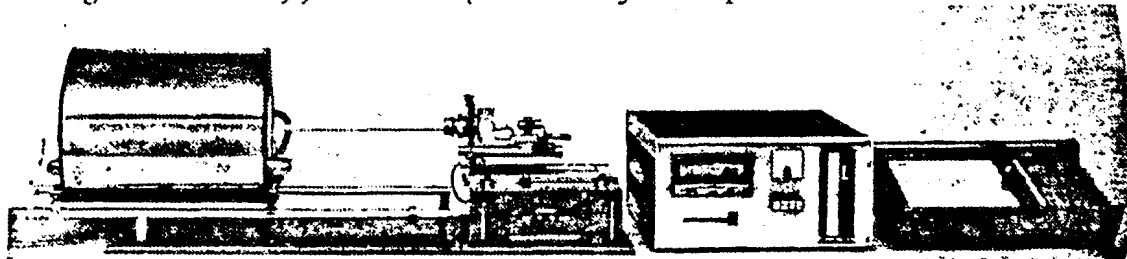


FIGURA III.16

de transmisión respecto al espécimen. Estos componentes están fabricados de Invar (aleación de hierro y níquel con el 36% de níquel).

El sujetador del espécimen se encuentra suspendido en el interior del horno, mismo que es montado sobre rodamientos para obtener la posición más conveniente con respecto al espécimen. Dado que el horno se desliza a la posición más adecuada de manera independiente al sujetador del espécimen, el delicado sistema de medición (Transductor diferencial) no es perturbado, este circuito de medición tiene errores del 0.25% con respecto a la expansión del espécimen.

El circuito de amplificación puede ser variado hasta por 5000 veces y permite el registro automático del incremento de longitud del espécimen.

Para el control de la temperatura del horno existen dos alimentaciones; una da energía al sistema termoelectrónico del horno y la otra suministra energía a un sistema regulador de la pri

mera, siendo sensible el sistema regulador para variaciones de  $0.1^{\circ}\text{C}$  en la temperatura del ensayo. El modelo Harrop TDA-H1 se encuentra disponible en tres rangos de temperatura que son:  $0-1000^{\circ}\text{C}$ ,  $0-1200^{\circ}\text{C}$  y  $0-1600^{\circ}\text{C}$ .

El sistema graficador se abastece con papel de 21.5 por 28 centímetros o de 17.8 X 28 centímetros, seleccionandose en el registrador XY. Las curvas dilatométricas obtenidas en este equipo son leídas directamente y no requieren manuales para corregir la expansión del cuarzo.

### 3.3.3.1) ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura.	1000-1600 grados Celsius
Máxima sensibilidad.	Aproximadamente $5.08 \times 10^{-3}$ mm. de l./mm. de la carta graficada.
Forma de la muestra.	11 mm. de diámetro y 100 milímetros de largo.
Amplificación.	0-5000X, continuamente variables.
Dimensiones del equipo.	176 cm. de ancho X 40 cm. de largo X 39 centímetros de alto, y con un peso de 39 kilogramos.
Potencia requerida.	1725 Watts a 115 volts de CA. a 60 Hz.

### 3.3.4) MODELO TDA-H2

Este dilatómetro es del tipo criogénico y está compuesto básicamente por dos unidades (véase figura III.17), la cámara criogénica y el sistema de control. El bastidor, la varilla de cuarzo de transmisión y el sistema de medición, es común a los



dilatómetros de la serie TDA-H.

La cámara criogénica tiene doble pared de acero inoxidable y consiste de un calentador helicoidal con válvula de seguridad y una válvula criogénica solenoidal; además de nitrógeno licuado que circula en el sistema proporcionando refrigeración uniforme al espécimen.

El sistema de control es programable y puede ser por: voltaje, corriente, función de desviación, doble función de encendido y apagado, y automático de temperatura. El programa de control automático de temperatura tiene velocidades de calentamiento de  $0.1^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  por minuto, además opera sobre el control de poder, y éste a la vez pone en funcionamiento el calefactor. El programa de encendido y apagado abre la válvula criogénica, la cual controla el fluido refrigerante.

Este dilatómetro utiliza un nuevo concepto para los sistemas de sujeción, calibración y amplificación, lo que permite -

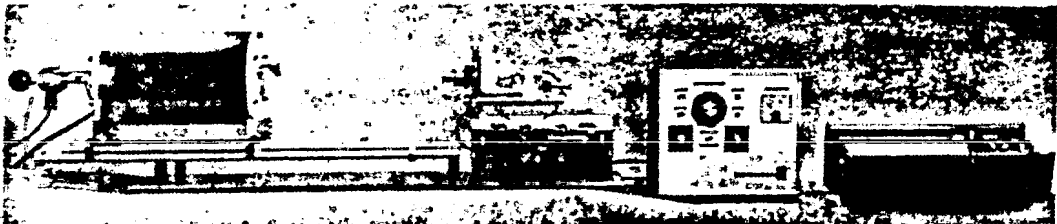


FIGURA III.17

ensayar muestras de una longitud mayor de 100 milímetros. El TDA-H2 está equipado con un corrector electrónico de recristalización, que incluye un control automático que detiene o pone en reversa el programa de temperatura. Esta característica ayuda a

prevenir desperfectos en el equipo causados por la fusión del es pécimen.

El dilatómetro Harrop TDA-H2 dispone de dos programas - de graficación que son: expansión contra temperatura y expansión contra tiempo.

#### 3.3.4.1) ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura.	-180 a 500 grados Celsius.
Refrigerante.	Nitrógeno líquido.
Amplificación.	Completamente variable 0-5000 veces.
Sensibilidad.	Aproximadamente $5.08 \times 10^{-3}$ mm/mV.
Forma de la muestra.	2.54 mm. a 101.6 mm. de largo y un ancho máximo de 11.1125 mm.
Potencia requerida.	600 Watts a 110 volts CA.

#### 3.4) DILATOMETROS ORTON

##### 3.4.1) CARACTERISTICAS

Estos dilatómetros utilizan tubos de alúmina y sílice - vítreo y están dispuestos horizontalmente. Cuatro de estos dilatómetros son para hacer ensayos hasta 1000°C. El modelo ES-1 y el ES-2 tienen una escala de temperatura con un límite máximo de 1000°C, con uno y dos hornos respectivamente. El dilatómetro EK-1 tiene un solo horno y el EK-2 tiene dos hornos y ambos poseen tres escalas de temperaturas con límites de 250°C, 500°C y 1000 grados Celsius. El Orton modelo 15-B-02 utiliza tubo de alúmina y

está disponible para hacer pruebas hasta 1500°C.

### 3.4.2) PRINCIPIO DE OPERACION

El espécimen reposa en un tubo (sujetador de la muestra) dentro del horno (véase figura III.18). El sujetador está integrado al cuerpo del transductor diferencial. La varilla de transmisión está apoyada en el sujetador en contacto con el espécimen y con el detector del transductor diferencial. El detector

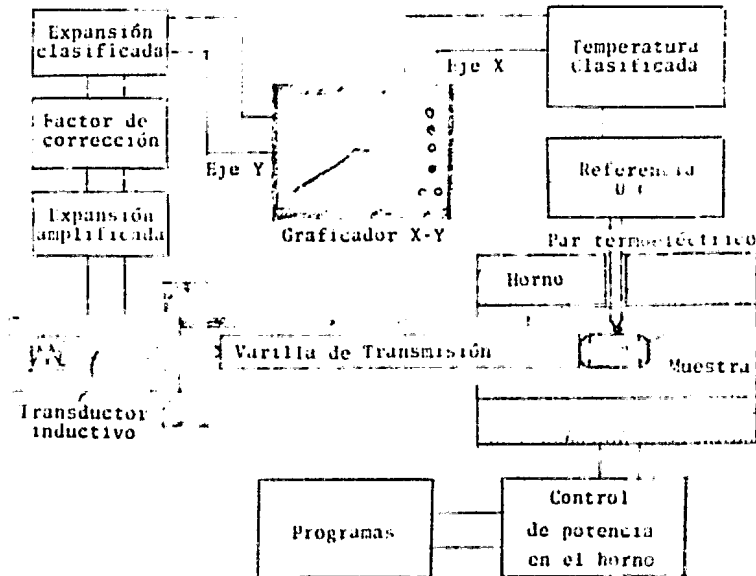


FIGURA III.18

se mueve con la muestra, cuando esta se contrae o expande, desplazando el núcleo del transductor diferencial; lo anterior produce un voltaje directamente proporcional al desplazamiento. Este voltaje es amplificado y corregido automáticamente de acuerdo al factor de expansión del sujetador de la muestra. Un par termoelectrico en contacto con el espécimen, provee la temperatura

del ensayo. La expansión se grafica sobre el eje de las Y, y la temperatura sobre el de las X.

### 3.4.3) MODELOS ES Y EK

Los dilatómetros Orton modelos ES-2 y EK-2 (véase figura III.19) son físicamente iguales, pero operan con diferente temperatura y sus requerimientos son de 115 volts, 10 amperes a 50 o 60 ciclos. En los párrafos siguientes se da una descripción de los componentes de estos dos sistemas (modelos ES-2 y EK-2).

A) Transductor diferencial con una linealidad de  $\pm 0.1\%$  y un límite de 2.5 milímetros de desplazamiento, que es el corazón del sistema de medición. Para asegurar la medida correcta de

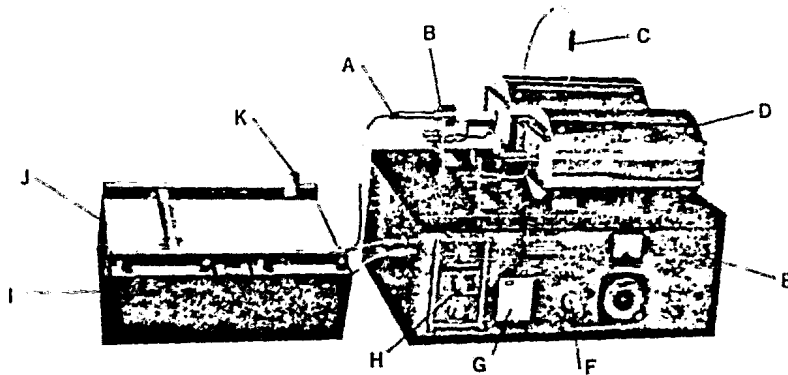


FIGURA III.19

las contracciones, el transductor tiene un resorte helicoidal -- de constante de elasticidad lineal.

B) Las características constructivas del tubo contenedor y la varilla de transmisión, aseguran la traslación estable y precisa de los cambios dimensionales del espécimen durante el ensayo. La longitud del espécimen debe ser de 50 milímetros, sin

embargo un accesorio del equipo permite ensayar especímenes de 5 a 100 milímetros.

C) El modelo S utiliza un enchufe de platino rodio al 10% y un par termoeléctrico del mismo material para mayor resistencia a la corrosión, y para que a largo plazo mantenga estable la temperatura de 1000°C.

El modelo K utiliza un par termoeléctrico de Cromel-Alumel para asegurar la temperatura exacta en la función automática de enfriamiento.

D) Los modelos de horno doble son útiles en laboratorio donde se manejan cargas altas de temperatura. El segundo horno permite ensayar muestras, mientras el primero se está enfriando. La conversión de un modelo de horno simple a uno de horno doble puede ser realizada.

Las resistencias de los hornos utilizados por todos los modelos son de Nicromel de larga duración.

E) Los controles de operación están provistos de un sistema programable. El sistema puede ser programado con solo 9 operaciones, requiriendo para este menos de 10 minutos, desde la remoción del espécimen hasta el inicio de la siguiente operación.

F) Los programas de control analógico permiten un amplio rango de capacidad. El sistema está provisto de un ajuste fino que permite hacer muy pocos cambios en programas normales de capacidad. Los programas son para enfriamiento, calentamiento y temperatura constante.

G) El condicionador de la señal de expansión, contiene controles para establecer electrónicamente el centro del rango lineal del transductor, así como del rango de expansión.

H) El dilatómetro Orton suministra automáticamente la señal de corrección para el transductor y da una lectura directa del porcentaje de la expansión o contracción del espécimen.

I) Limitador de temperatura que puede ser fijado en alguna temperatura dentro del rango considerado. Esta unidad corta automáticamente el ensayo y traza el inicio del enfriamiento.

J) El graficador es confiable, estable y fuerte. Permite papel de hasta 216 milímetros de ancho por 432 milímetros de largo y grafica expansión en el eje X y temperatura en el eje Y.

K) Interruptor de contracciones que proporciona protección automática contra la fusión del espécimen.

### 3.5) DILATOMETROS CARBORUNDUM

#### 3.5.1) CARACTERISTICAS

Dilatómetros de tipo vertical que utilizan sílice vítreo y alúmina para sujetar el espécimen. Los dilatómetros Carborundum realizan ensayos hasta 1600°C, además están disponibles para hacer pruebas en atmósferas especiales.

#### 3.5.2) MODELOS TD-710 y 716

La simplicidad de operación es una característica de las unidades carborundum.

El horno de estos dilatómetros está dispuesto de forma vertical (véase figura III.20), equipado con válvulas y controles electricos para determinar las características de la atmósfera. El sujetador del espécimen es de cuarzo en el modelo TD-710 y de alúmina para el TD-716 y sus rangos de temperatura son de 1000°C y 1600°C respectivamente. El espécimen está en contacto con un transductor diferencial, y el conjunto se localiza en la zona isotérmica del horno.

La temperatura y la señal del transductor, por la contracción y expansión del espécimen, son transmitidas a un amplificador, que convierte la medición a una señal eléctrica proporcional, que es graficada en una parte integrada de la consola de control.

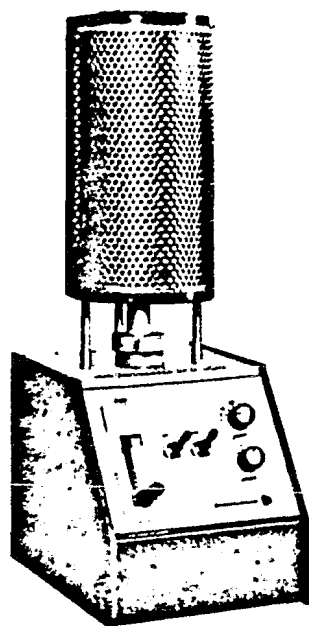


FIGURA III.20

#### 3.5.2.1) ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura.	TD 710 subambiente a 1000°C
	TD 716 subambiente a 1600°C
Par termoeléctrico.	TD 710 tipo K de Cromel-Alumel
	TD 716 tipo S de Pt/PtRh al 10%

Las especificaciones siguientes son para ambos modelos.

Forma de la muestra.	De 3 a 10 milímetros de diámetro y de 3 a 51 milímetros de largo
----------------------	---

Medio ambiente del sistema.	Aire, gas inerte o vacío a 0.1333 Pascuales.
Sensibilidad.	$2.54 \times 10^{-4}$ mm. de longitud de la muestra por milímetros de la carta graficada.
Dimensiones.	228.6 de ancho X 254 de fondo X 838.2 milímetros de alto y peso de 13.607 kilogramos.
Potencia requerida.	1725 Watts a 115 Volts de CA. a 60 Hz.

### 3.6) DILATOMETROS EKO

#### 3.6.1) CARACTERISTICAS

Equipos con aplicación en alfarería y metalurgia, detectan expansiones y contracciones térmicas, así como puntos de fusión de especímenes sobre la temperatura de 1550°C, además manejan atmósferas controladas.

#### 3.6.2) MODELO (DILANORM) HIGHDILA

El dilatómetro está constituido de dos unidades (véase figura III.21), un tablero de control provisto de dos plumas graficadoras y el horno con sus componentes.

El sujetador del espécimen está situado dentro de un tubo de alúmina sinterizada, con objeto de proteger al espécimen de la oxidación. La expansión y contracción del espécimen es detectada con un dispositivo de inducción. La temperatura del en-



sayo es medida mediante un par termoeléctrico de platino platino-rodio al 13%. Ambos valores son registrados por un graficador electrónico autobalanceado. El orificio localizado sobre el domo de vidrio, puede ser usado para llenar el sistema de gas inerte.

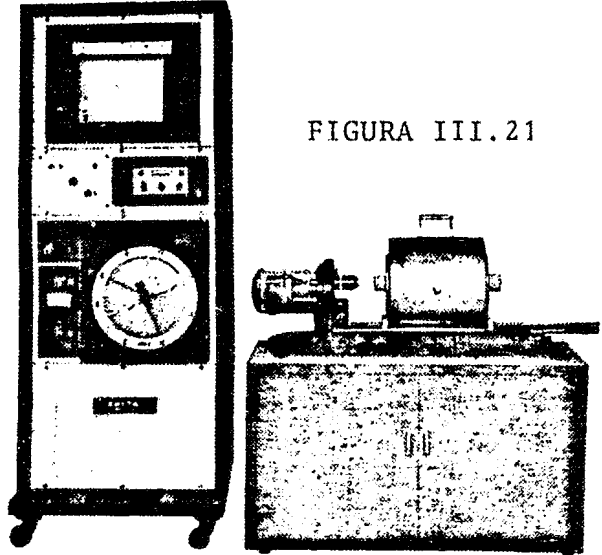


FIGURA III.21

#### 3.6.2.1) ESPECIFICACIONES

Rangos de temperatura.	Pt.PtRh13%, 550°, 800°, 1200° y 1550°C.
Sensibilidad.	Salida: C.D. 5 mV/escala máxima de 2.5, 1.5, 0.75, 0.25 mm.
Grabador.	Electrónico de exacto balanceo propio, sistema de 2 plumas.
Precisión.	+1.5%
Razón de incremento.	3°, 5° y 8°C/min., Máxima temperatura -- 1550°C.
Forma del espécimen.	5-10 milímetros de diámetro por 50 milímetros de largo.
Atmósfera.	Para alfarería- aire Para metalurgia- aire, vacío o gas inerte.

### 3.7) DILATOMETROS ADAMEL LHOMARGY

#### 3.7.1) MODELO DD-01

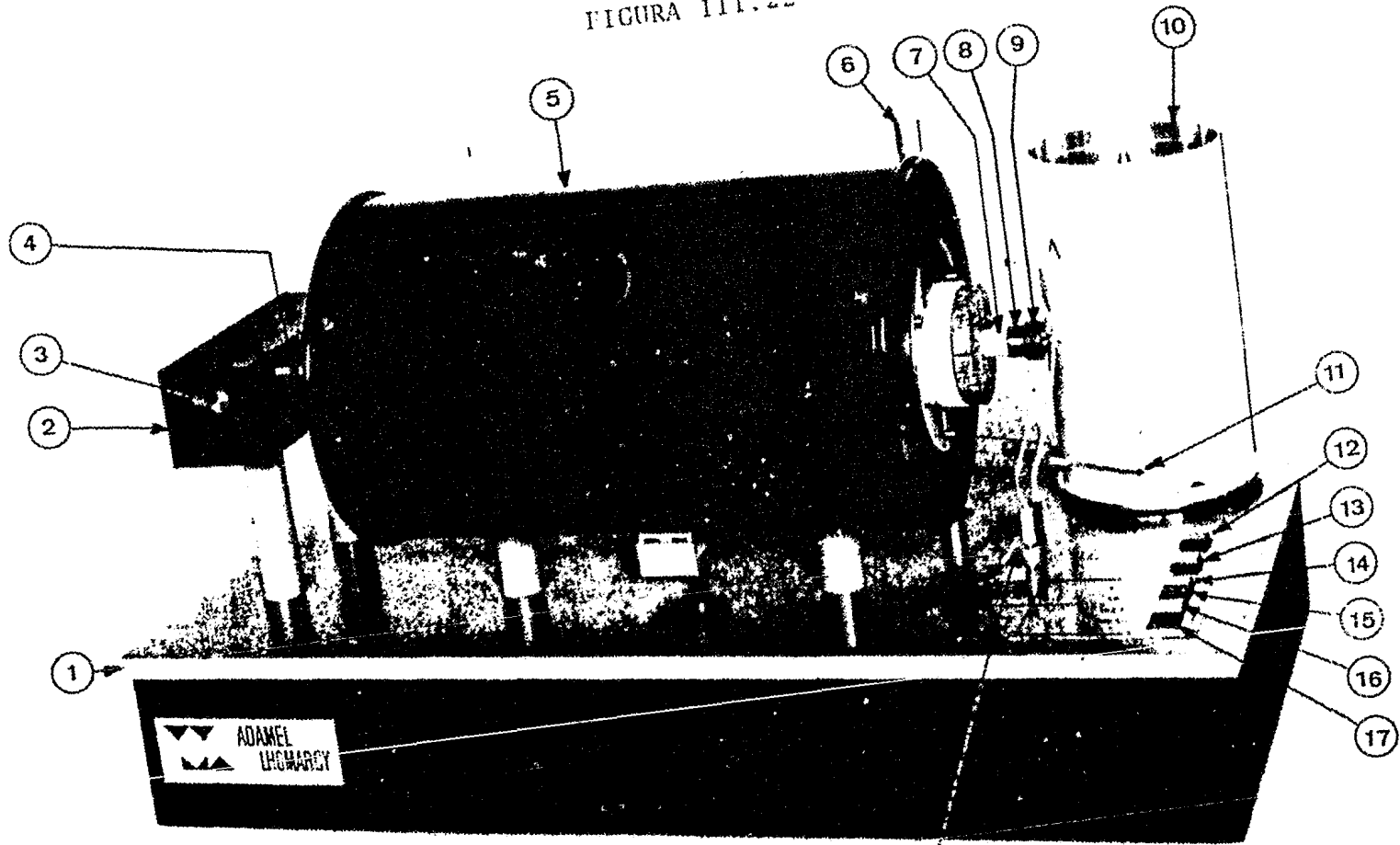
El dilatómetro DD-01 (véanse figuras III.22 y III.23) es de tipo básico. Este modelo proporciona gráficas de expansión contra temperatura de especímenes cilíndricos con dimensiones máximas de 65 mm de largo por 6.5 mm de diámetro.

El instrumento está construido por un plato base (1) sobre el que están montados: el contenedor del sistema mecánico de detección y amplificación de la expansión del espécimen (2), el horno (5), el soporte del tambor graficador (30), la varilla desviadora (6), las terminales para el par termoelectrico (13) y el tablero de control de botones (12 a 17).

La muestra a ensayar está localizada dentro del tubo de cuarzo (7) que está en el interior del horno. La expansión del espécimen es transmitida por una varilla de cuarzo (22) a un sistema mecánico que la amplifica y activa el mecanismo de la pluma graficadora. La curva es grabada en papel puesto sobre el tambor graficador (10) que gira en función de la temperatura del ensayo. Así pues la curva básica del análisis térmico dilatométrico, se obtiene con la combinación de la rotación del tambor y el movimiento de abajo hacia arriba de la pluma debido a la expansión del espécimen.

La temperatura máxima de prueba es de 1200°C y es ajustable en intervalos de 100°C; esto es hecho mediante un par de botones localizados en el soporte del tambor graficador, los cuales

FIGURA III.22



va un interruptor del incremento de la temperatura del ensayo. - Los programas de temperatura con que cuenta este equipo son dos, uno para incrementar la temperatura del ensayo a razón de  $150^{\circ}$  C/hr. y otro para hacerlo a razón de  $300^{\circ}$  C/hr.

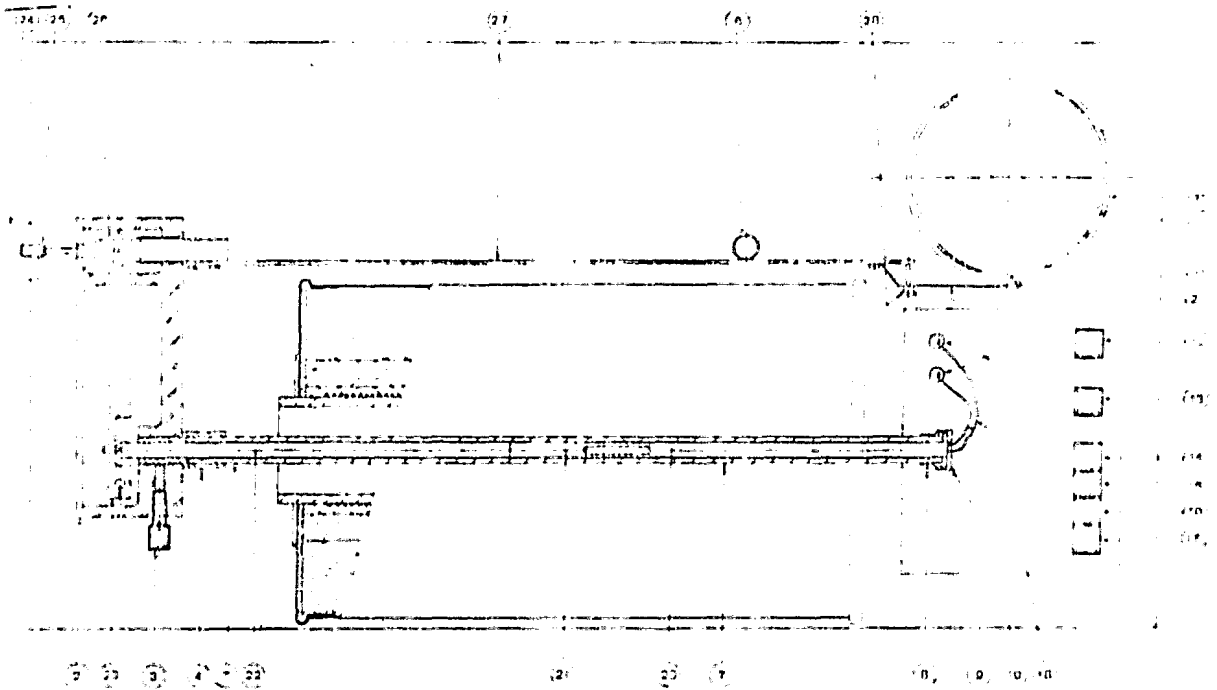


FIGURA III.25

3.7.1.1) COMPONENTES Y PARTES

- 1 Base.
- 2 Contenedor del sistema mecánico de detección y amplificación de la expansión.
- 3 Tornillo fijador del tubo de cuarzo contenedor del espécimen.
- 4 Extremo anterior del contenedor del espécimen para la sujeción de este.

- 5 Horne.
- 6 Varilla desviadora.
- 7 Tubo de cuarzo contenedor del espécimen.
- 8 Extremo posterior del contenedor del espécimen, apoyo  
de la tuerca de argolla.
- 9 Tuerca de argolla para fijar el tubo de apoyo.
- 10 Tamber.
- 11 Pluma.
- 12 Interruptor principal.
- 13 Calibración automática a 0°C.
- 14 Interruptor de arranque secundario.
- 15 Interruptor del ensayo.
- 16 Programa de calentamiento 150°C/hr.
- 17 Programa de calentamiento 300°C/hr.
- 18 Terminales para el termopar.
- 19 Termopar.
- 20 Tubo de apoyo del espécimen.
- 21 Especimen.
- 22 Varilla transmisora.
- 23 Primer amplificador mecánico.
- 24 Contrapeso del brazo de la pluma.
- 25 Tornillo de ajuste para la posición de la pluma.
- 26 Segundo amplificador mecánico.
- 27 Brazo de la pluma.
- 28 Tornillo de ajuste para la presión de la pluma.

29 Soporte de la pluma.

30 Soporte del Tambor.

### 3.7.1.2) ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura. Temperatura ambiente a 1200°C.

Razón de calentamiento. 2.5°C/min y 5°C/min.

Amplificación del coeficiente de  $\Delta L$ . K=122.3

Dimensiones.

490 mm de largo X 265 mm de ancho X 265  
milímetros de alto y de peso -  
15 kilogramos.

Potencia requerida. 220 Volts monofásica a 50Hz.

BIBLIOGRAFIA

- Tube Type Dilatometers  
Joseph Valentich  
I.S.A. 1981
- Folleto de Netzsch-Geratebau GMBH SELB  
México 1982
- Boletín de Dilatronic  
México 1981
- Folleto de Carborundum  
México 1981
- Folleto de EKO  
México 1980
- Instructivo de Operación del Dilatómetro DD.01  
Francia 1977

## C A P I T U L O    I V

### PUNTOS CRITICOS DE LOS ACEROS

#### 4.1) DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO

##### 4.1.1) CARACTERISTICAS GENERALES.

Durante muchos años ha sido objeto de estudio la aparición o desaparición de diferentes estructuras cristalinas durante el proceso de enfriamiento de un metal o de una aleación, y la mejor manera de hacer esto es mediante los diagramas de equilibrio, también conocidos como diagramas de fase.

Para que el estado de un material o sistema en equilibrio quede definido es necesario conocer los valores de tres variables que son la temperatura, la presión y la composición.

El diagrama de equilibrio es tan solo un sistema de coordenadas cartesianas, en el que se representa la temperatura en grados Celsius o Fahrenheit en las ordenadas, y la composición



ción de la aleación en las abscisas; esta composición puede ser expresada en por ciento de átomos o peso de sus constituyentes A, B. La transformación de los porcentajes en peso a porcentaje en átomos puede ser hecha mediante las fórmulas siguientes:

$$X_a = 100X_p / (X_p + Y_p(M/N))$$

$$Y_a = 100Y_p(M/N) / (X_p + Y_p(M/N))$$

X Porcentaje de metal A ( $X_a$  en átomos,  $X_p$  en peso)

Y Porcentaje de metal B ( $Y_a$  en átomos,  $Y_p$  en peso)

M Peso atómico del metal A

N Peso atómico del metal B

#### 4.1.2) OBTENCION DE LOS DIAGRAMAS

Los datos requeridos para la construcción de un diagrama de equilibrio se obtienen por métodos experimentales como son el metalográfico, difracción de rayos X o térmicos.

Para comprender de que manera se construye un diagrama de equilibrio, consideremos una serie de curvas de enfriamiento correspondientes a diversas concentraciones del material B en el A, -

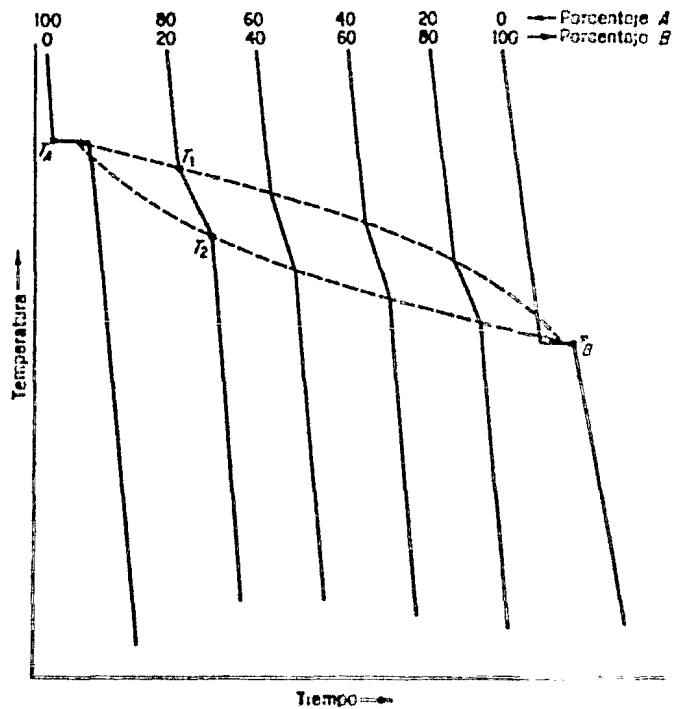


FIGURA IV.1

así como sus respectivas curvas de enfriamiento en estado puro - (véase figura IV.1). Las curvas de enfriamiento de los materia-- les puros presentan un tramo horizontal, ya que la solidifica--- ción se verifica a temperatura constante. Sin embargo, las cur-- vas de enfriamiento de las aleaciones presentan dos puntos de -- cambio de pendiente, el correspondiente a la temperatura más al-- ta marca el inicio de la solidificación, y el otro el final de - esta. Así pues, uniendo con una línea todos los puntos que indi-- can el inicio de la solidificación, y con otra los correspondien-- tes al término de esta, obtenemos una figura que nos permitirá - formarnos una idea de lo que es el diagrama de equilibrio del -- sistema A-B.

La línea, resultado de unir los puntos donde empieza la solidificación se llama de "líquidus", mientras que la trazada -- por los puntos donde termina la solidificación se llama de "soli--dus". La superficie situada por encima de la línea de liquidus - representa una región monofásica que se halla bajo la forma de - una solución líquida homogénea. Análogamente, la superficie bajo la línea de solidus representa una región monofásica bajo la for--ma de sólido homogéneo. Finalmente, la zona comprendida entre -- las líneas de liquidus y de solidus corresponde a una región bi--fásica que estará formada por una mezcla de líquido y sólido.

Es importante tener en cuenta que el diagrama de equili--brio es válido sólo cuando se verifican las condiciones de equi--brio durante el enfriamiento y calentamiento de las aleaciones

es decir, cuando los procesos son suficientemente lentos. Una variación rápida de la temperatura puede ser causa de que no se realicen los cambios de fase que se presentarían en las condiciones normales de equilibrio.

Es evidente la simplicidad del diagrama de equilibrio aquí manejado, pero sumamente explicativo para el proceso de cambios de fase. Sin embargo, en estos diagramas se representan no sólo los cambios de fase, sino también los de estructura cristalina de las aleaciones.

#### 4.1.3) COMPOSICION QUIMICA DE LAS FASES

La región comprendida entre las líneas de solidus y liquidus es una zona de tipo bifásica, y para determinar la composición real de las fases presentes, veamos el ejemplo típico que es el de la aleación cobre-níquel.

Consideremos una aleación en la fase líquida. Al enfriarse esta fase se forman cristales de solución por sustitución, que en general tendrán más átomos del elemento de mayor punto de fusión, en este caso de níquel; esto significa que los cristales formados a partir de la solución líquida, tienen una composición diferente a la del líquido que los genera.

Por lo anterior, es importante saber la composición de los cristales que se están formando a una temperatura dada. Para esto, consideremos la aleación de 45% Cu - 55% Ni a una temperatura de 1300°C (véase figura IV.2), donde se traza una línea isotérmica (línea de enlace o conode) que cortará a las líneas de

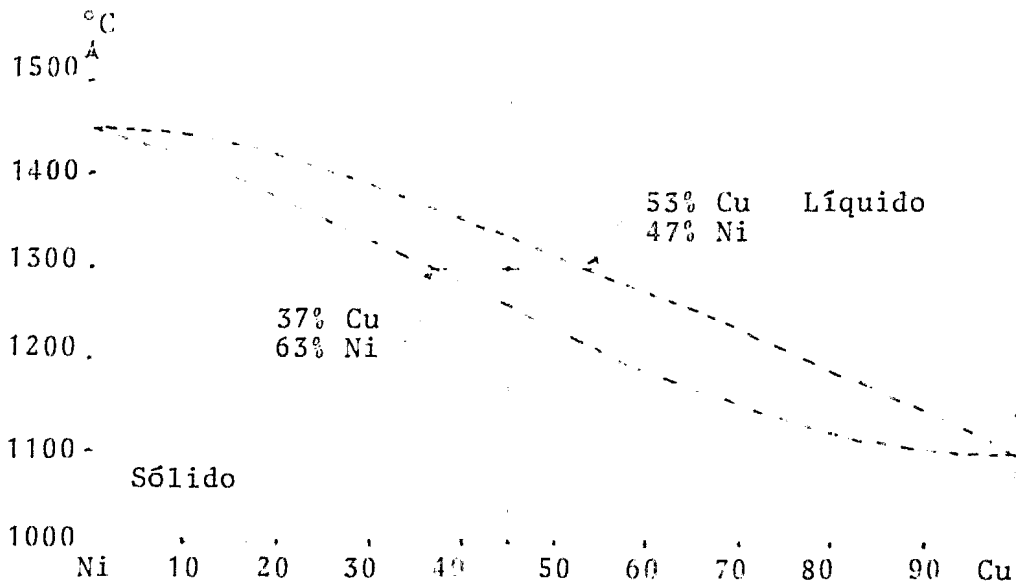


FIGURA IV.2

solidus y liquidus. Estos puntos de intersección de las líneas, representan las composiciones reales de las fases sólida y líquida que son 63% Ni-37% Cu y 53% Cu- 47% Ni respectivamente.

#### 4.1.4) REGLA DE LA PALANCA

En el párrafo anterior vimos la composición química de las fases, pero no la cantidad presente de cada una de estas en la región bifásica.

Una relación muy importante aplicable a cualquier región de cualquier diagrama de equilibrio binario es la regla de la palanca, que es el procedimiento para determinar la cantidad relativa de cada fase presente a una temperatura específica. Para la explicación de esta regla usaremos la aleación a 1300°C de la figura IV.2. La aleación se compone de sólido de composición 63% Ni-37% Cu y de líquido de composición 53% Cu-47% Ni; siendo

estas composiciones fijas, mientras la temperatura sea constante. Ahora tomemos 100 gramos de la aleación, o sea que tenemos 55 -- gramos de níquel y 45 gramos de cobre. Representemos por "w" el peso de la fase sólida y por "(100-w)" el peso de la fase líquida. La cantidad de cobre en forma sólida es igual al peso de la fase sólida (w) por el porcentaje de cobre que contiene. Similarmente, la cantidad de cobre en forma líquida es igual al peso de la fase líquida (100-w) por el porcentaje de cobre que contiene. Además, el peso del cobre en la aleación, debe ser igual a la suma de sus pesos en las fases líquida y sólida.

$$\text{Peso de cobre sólido} = 0.37w$$

$$\text{Peso de cobre líquido} = 0.53 (100-w)$$

$$45 = 0.37w + 0.53 (100-w)$$

$$45 - 53 = (0.37-0.53)w$$

$$w = (45-53)/(0.37-0.53)$$

$$w = 50$$

Del resultado anterior sabemos que 50 gramos de la aleación están bajo la forma de sólido, por tanto, tenemos otros 50 gramos de aleación en fase líquida.

#### 4.1.5) REACCIONES EN LOS DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO

Algunas aleaciones presentan un diagrama de equilibrio altamente complejo (véase figura IV.3). Sin embargo, las reacciones que se desarrollan en estos son similares a las mostradas en la figura IV.1.

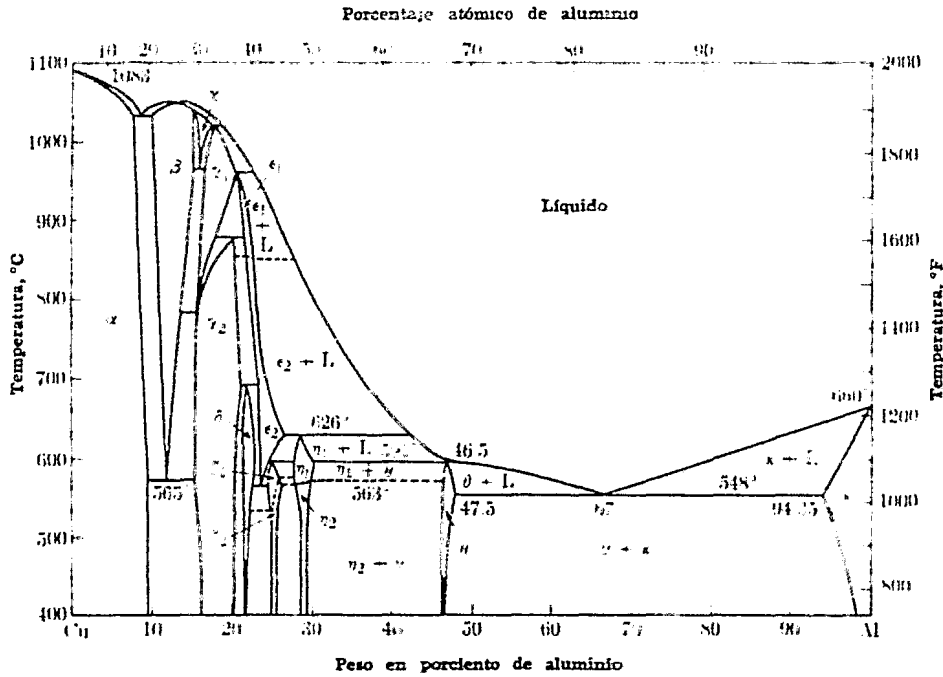


FIGURA IV.3

Nombre de la reacción	Ecuación general	Forma que adopta en el diagrama
Monotéctica	$L_1 \xrightleftharpoons[\text{calentamiento}]{\text{enfriamiento}} L_2 + \text{sólido}$	$\frac{L_1}{L_2 + \text{sólido}}$
Eutéctica	$\text{Líquido} \xrightleftharpoons[\text{calentamiento}]{\text{enfriamiento}} \text{sólido} + \text{sólido}$	$\frac{L}{\text{sólido} + \text{sólido}}$
Eutectoide	$\text{Sólido} \xrightleftharpoons[\text{calentamiento}]{\text{enfriamiento}} \text{sólido} + \text{sólido}$	$\frac{\text{sólido}}{\text{sólido} + \text{sólido}}$
Peritéctica	$\text{Líquido} + \text{sólido} \xrightleftharpoons[\text{calentamiento}]{\text{enfriamiento nuevo}} \text{sólido}$	$\frac{\text{Líquido} + \text{sólido}}{\text{nuevo sólido}}$
Peritectoide	$\text{Sólido} + \text{sólido} \xrightleftharpoons[\text{calentamiento}]{\text{enfriamiento nuevo}} \text{sólido}$	$\frac{\text{sólido} + \text{sólido}}{\text{nuevo sólido}}$

FIGURA IV.4

## 4.2) ALEACION FIERRO-CARBONO

### 4.2.1) CURVA DE ENFRIAMIENTO DE FIERRO PURO

El hierro es un metal alotrópico, lo que significa que puede presentarse en más de una estructura cristalina, cuando está en estado sólido, dependiendo de la temperatura a que se encuentre (véase IV.5).

El hierro es gas por arriba de los 2740 grados Celsius y líquido entre los 2740 y los 1539 grados Celsius. Al solidificar lo hace en la estructura cristalina con celda unitaria cúbica centrada en el cuerpo o también llamado hierro  $\delta$  (delta). Cuando desciende su temperatura a 1400°C tiene lugar un cambio de fase al reagruparse los átomos, dando origen a la estructura cristalina con celda unitaria cúbica centrada en las caras o hierro  $\gamma$  (gamma) - que es no magnético. Al proseguir su enfriamiento, se presenta un nuevo cambio de fase a la temperatura de 910°C, que es al de celda unitaria cúbica

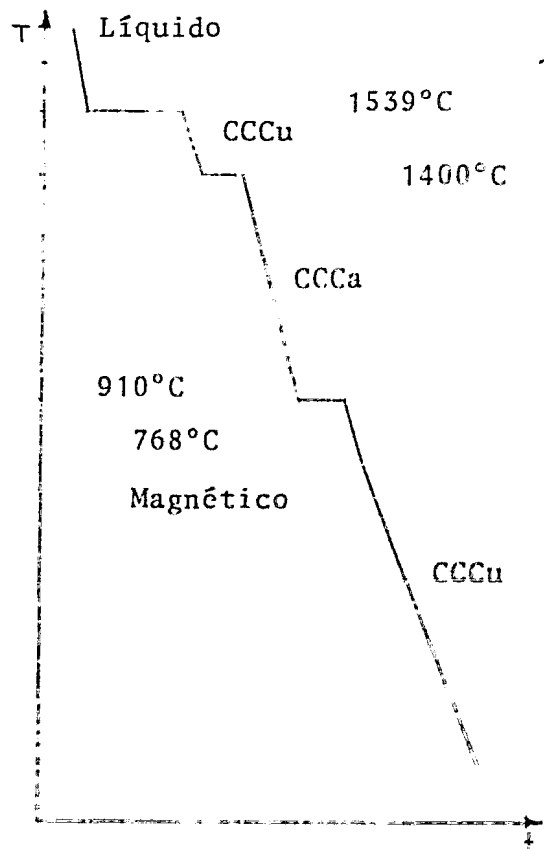


FIGURA IV.5

FIGURA IV.6

# DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBONO

CARBONO, ATOMOS EN PORCIENTO

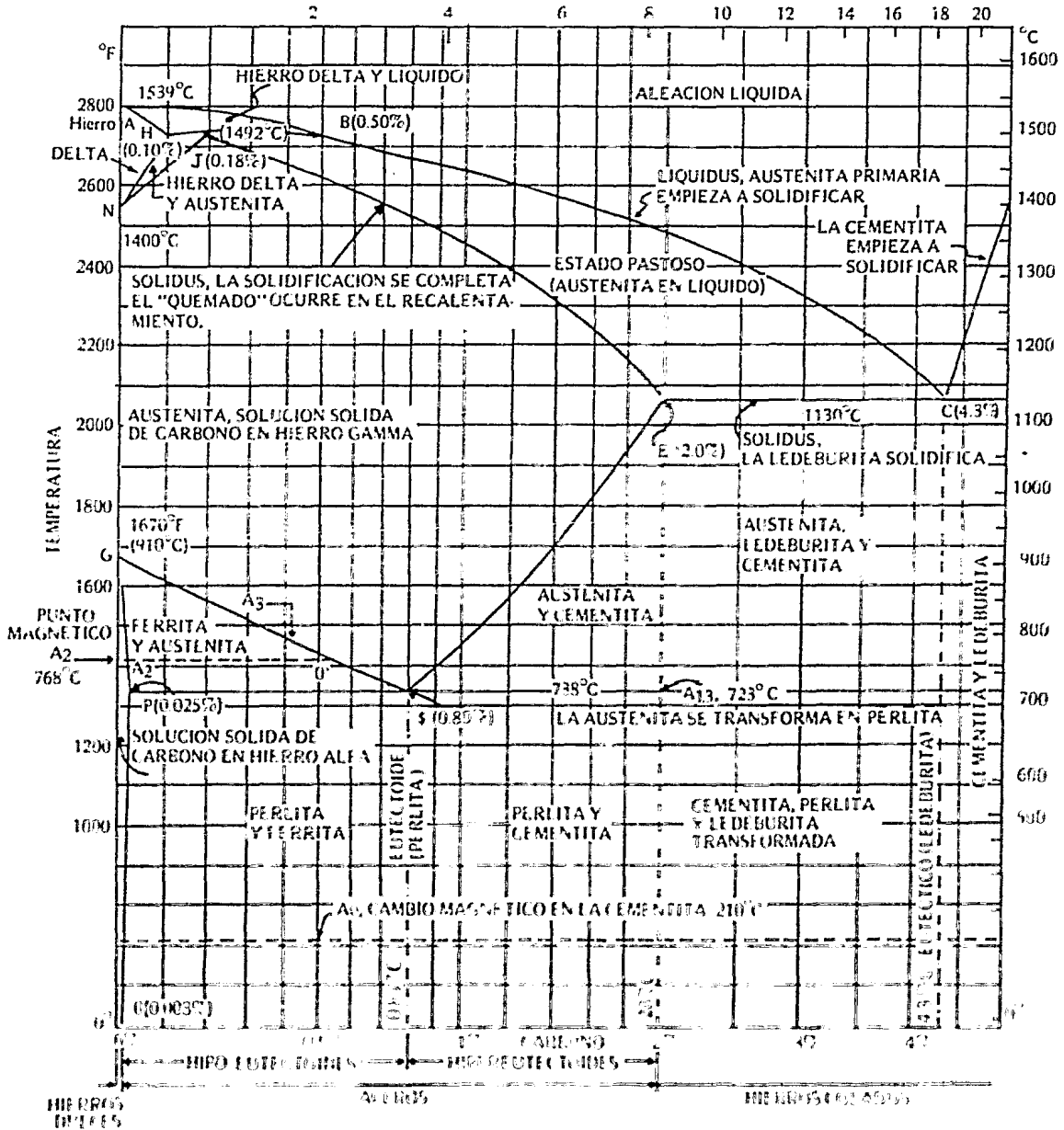
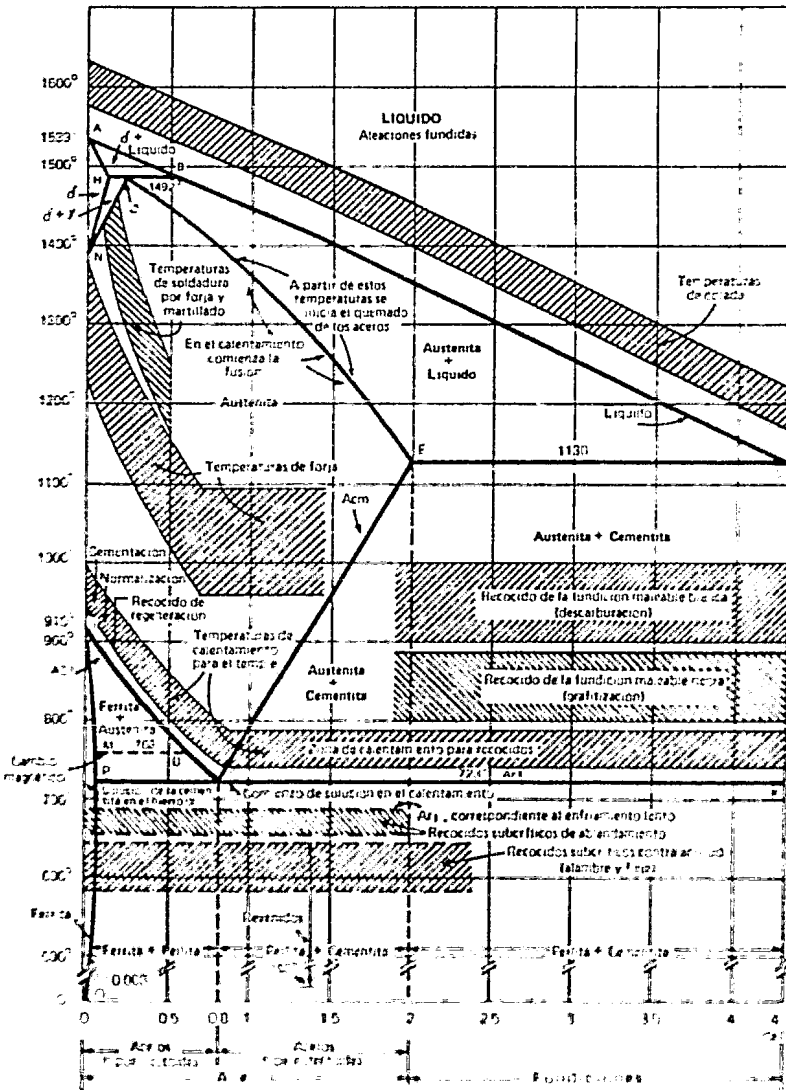




FIGURA IV. 7

# DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBONO Y SU RELACION CON LOS TRATAMIENTOS TERMICOS DE USO MAS FRECUENTE



Colores de revenido	Temperatura °C
Paja	225°
Oro	250°
Púrpura	275°
Azul oscuro	300°
Azul oscuro	325°

Temperatura de puntos importantes		
Punto	% C	°C
A	0	1539°
B	0.5	1492°
C	4.3	1130°
E	2	723°
G	0	910°
H	0.1	1402°
J	0.18	1492°
K	-	723°
M	-	768°
N	0	1400°
O	0.55	739°
P	0.525	723°
S	0.8	723°
Q	0.533	0°

centrada en el cuerpo o fierro  $\alpha$  (alfa) que sigue siendo no magnético. Finalmente a  $768^{\circ}\text{C}$  ocurre un cambio en el fierro  $\alpha$ , pasando de no magnético a magnético sin que la estructura cristalina prevaleciente se modifique.

#### 4.2.2) DIAGRAMA DE EQUILIBRIO FIERRO - CARBONO

La adición de un elemento a otro influye en las temperaturas a que se presentan las transformaciones de fase y de tipo alotrópicas, y es el caso de la adición del carbono al fierro (véanse figuras IV.6 y IV.7).

El diagrama de equilibrio fierro - Carbono suele dividirse en dos partes en función del contenido de carbono: Una que comprende las aleaciones con menos de 2% de carbono y que se llaman aceros, y otra integrada por las aleaciones con más del 2% de carbono, las que se llaman fundiciones. A su vez, la región de los aceros se subdivide en aceros hipoeutectoides, aleaciones con menos del 0.8% de carbono y aceros hipereutectoides, aleaciones cuyo contenido de carbono se encuentra entre 0.8% y 2%.

La solubilidad del carbono en el fierro, al ser muy pequeño para una solución sólida por sustitución, es función de los espacios intersticiales de la celda unitaria prevaleciente en la estructura cristalina. Así, la mayor abertura en la celda unitaria cúbica centrada en el cuerpo (véase figura IV.8), es --- apreciablemente menor que el átomo de carbo

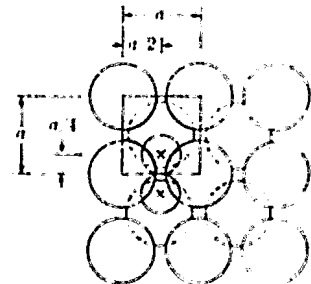


FIGURA IV.6

no. A su vez, la mayor abertura en la celda unitaria cúbica centrada en las caras (véase figura IV.9), es casi el tamaño del átomo de carbono. Por lo anterior, la solubilidad máxima de carbono en fierro  $\alpha$  es de 0.025%, en el fierro  $\delta$  es de 2.0% y del 0.1% en el fierro  $\gamma$ , que es apreciablemente mayor que en el fierro  $\alpha$ , debido a la mayor temperatura.

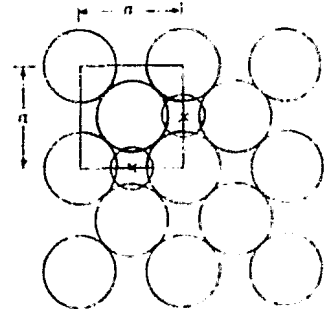


FIGURA IV.9

#### 4.2.2.1) FIERRO $\alpha$ O FERRITA

A la estructura del fierro puro a temperatura ambiente, se le llama indistintamente ferrita o fierro  $\alpha$ , y es bastante suave y dúctil; en la pureza encontrada comercialmente su resistencia a la tensión es de 28 Kg/mm<sup>2</sup> y su dureza es inferior a la Rockwell C, con un alargamiento de 40% en 50 milímetros. El material es magnético a temperatura abajo de 768°C.

#### 4.2.2.2) FIERRO $\delta$ O AUSTENITA

La estructura modificada en cúbica centrada en las caras se llama austenita o fierro  $\delta$ . Los valores medios de sus propiedades son: su resistencia a la tracción es de 80 a 105 Kg/mm<sup>2</sup>, su dureza es de 32 Rockwell C, alargamiento de 30 a 60% en 50mm.

#### 4.2.2.3) CEMENTITA O CARBURO DE FIERRO

Este material responde a la fórmula química Fe<sub>3</sub>C y contiene 6.67% de carbono, es duro y frágil, tiene pequeña resistencia a la tracción pero presenta una resistencia elevada a la compresión. De todas las estructuras que aparecen en el diagrama es

la que ofrece mayor dureza.

#### 4.2.2.4) PERLITA

La perlita es una mezcla particular de dos fases, formada por la transformación de austenita de composición eutectoide en ferrita y carburo. Como el carburo y la ferrita se forman simultáneamente, quedan íntimamente mezcladas y es una característica el que sea mediante láminas alternadas de ferrita y cementita (véase figura IV.10).

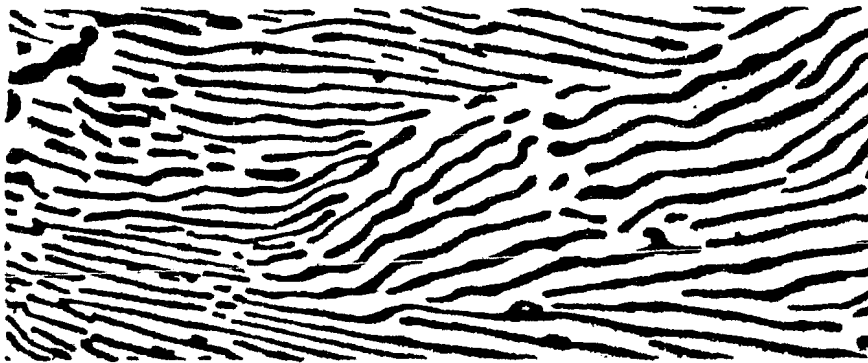


FIGURA IV.10

#### 4.2.2.5) LEDEBURITA

Con este nombre se conoce la mezcla eutéctica de austenita y cementita, la cual contiene 4.3% de carbono y se forma a 1130°C.

### 4.3) CLASIFICACION DE LOS ACEROS

Los aceros pueden ser clasificados por el procedimiento de su fabricación, por su utilización o por su composición química.

ca. Es claro que el último procedimiento de clasificación es el más representativo, y dentro de este sistema hay varios códigos como son los de AISI, SAE, ASME, ASTM, DIN y en algunos casos los establecidos por el fabricante. De los códigos el más difundido es el de AISI-SAE, donde el contenido aproximado de los elementos más importantes de aleación, vienen indicados por medio de un sistema numérico (véase figura IV.11).

10xx	Aceros al carbono obtenidos en horno Martin Siemens y en convertidor Bessemer ácido.
11xx	Aceros al carbono, altos en azufre y bajos en fósforo, obtenidos en horno Martin Siemens y en convertidor Bessemer ácido.
12xx	Aceros al carbono, altos en azufre y en fósforo obtenidos en horno Martin Siemens.
13xx	Manganeso 1.60 a 1.90 %.
23xx	Níquel 3.50 %.
25xx	Níquel 5 %.
31xx	Níquel 1.25 %; cromo 0.60 %.
32xx	Níquel 1.75 %; cromo 1.00 %.
33xx	Níquel 3.50 %; cromo 1.50 %.
40xx	Molibdeno 0.25 %.
41xx	Cromo 1.00 %; molibdeno 0.20 %.
43xx	Cromo-níquel-molibdeno.
46xx	Níquel 1.75 %; molibdeno 0.25 %.

48xx	Níquel 3.50 %; molibdeno 0.25 %.
51xx	Cromo 0.80 %.
52xx	Cromo 1.50 %.
61xx	Cromo-vanadio.
81xx	Níquel 0.30 %; cromo 0.45 %; molibdeno 0.1 %.
86xx	Níquel 0.55 %; cromo 0.50 %; molibdeno 0.20 %.
87xx	Níquel 0.55 %; cromo 0.50 %; molibdeno 0.25 %.
92xx	Manganeso 0.80 % ; silicio 2.00 %.
93xx	Níquel 3.25 %; cromo 1.20 % ; molibdeno 0.12 %
98xx	Níquel 1.00 %; cromo 0.80 %; molibdeno 0.25 %.

FIGURA IV.11

Las especificaciones de algunos de los aceros más representativos son las siguientes:

AISI No*	% C	% Mn	% P max	% S max	SAE No
Aceros ordinarios al carbono					
C1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,04	0,05	1010
C1015	0,13-0,18	0,30-0,60	0,04	0,05	1015
C1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,04	0,05	1020
C1025	0,22-0,28	0,30-0,60	0,04	0,05	1025
C1030	0,28-0,34	0,60-0,90	0,04	0,05	1030
C1035	0,32-0,38	0,60-0,90	0,04	0,05	1035
C1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,04	0,05	1040
C1045	0,41-0,50	0,60-0,90	0,04	0,05	1045
C1050	0,48-0,55	0,60-0,90	0,04	0,05	1050
C1055	0,50-0,60	0,60-0,90	0,04	0,05	1055
C1060	0,55-0,65	0,60-0,90	0,04	0,05	1060
C1065	0,60-0,70	0,60-0,90	0,04	0,05	1065
C1070	0,65-0,75	0,60-0,90	0,04	0,05	1070
C1074	0,70-0,80	0,50-0,80	0,04	0,05	1074
C1080	0,75-0,88	0,60-0,90	0,04	0,05	1080
C1085	0,80-0,93	0,70-1,00	0,04	0,05	1085
C1090	0,85-0,98	0,60-0,90	0,04	0,05	1090
C1095	0,90-1,03	0,30-0,50	0,04	0,05	1095

FIGURA IV. 11

#### 4.4) OBTENCION DE LOS PUNTOS CRITICOS

El objetivo fundamental de este trabajo es encontrar los puntos críticos de diferentes aceros al carbono, llevándose a cabo esto en el laboratorio de pruebas mecánicas de la facultad de ingeniería. El dilatómetro empleado es el Adamel Lomargy modelo DD.01 descrito en el párrafo 3.7.

##### 4.4.1) ESPECIMEN

El espécimen a ensayar requiere de una forma y dimensiones específicas, siendo este un cilindro de 65 milímetros de largo y 7 de diámetro, con un barreno concéntrico de 35 milímetros de profundidad y 4 de diámetro ( véase figura IV.13).

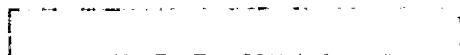


FIGURA IV.13

##### 4.4.2) ENSAYO

Para hacer las pruebas se debe de seguir la siguiente secuencia; primero se balancea el brazo de la pluma (27) mediante el contrapeso (24), de tal suerte que la pluma (11) esté al ras del soporte del tambor (30); en seguida se coloca el papel para graficar sobre el tambor graficador (10), haciendo coincidir la línea de 0°C del papel con la pluma mediante el movimiento del papel según se requiera, esto cuando el botón de ajuste a 0°C es presionado, y teniendo cuidado de que la pluma no toque el papel. El contenedor (7) es introducido en el horno y fijado en su soporte que se encuentra en (2) mediante el tornillo fijo

dor (3), en seguida se rellenan los extremos del horno con la fibra térmica. La varilla de transmisión (22) se introduce primeramente en el contenedor, posteriormente el espécimen (21) con el barrenado hacia atrás y finalmente el tubo de apoyo del espécimen (20), sujetándose el conjunto introducido mediante la tuerca de argolla (9), hasta que tope el conjunto con el sistema amplificador contenido en (2). El termopar (19) se introduce a través de la tuerca argolla pasando por el tubo de apoyo hasta el espécimen y se conecta en las terminales (18). Realizando lo anterior, se selecciona la razón de calentamiento mediante los botones -- (16) o (17) y se pone en marcha con el interruptor secundario -- (14).

#### 4.4.3) RESULTADOS GRAFICOS

La gráfica obtenida en el ensayo al calentar, presenta primeramente una línea recta que corresponde al rango de expansión lineal de la estructura prevaleciente, posteriormente se registra un cambio de signo en la pendiente de la curva, segmento que representa el cambio de estructura cristalina, para finalmente cambiar a una recta de pendiente positiva correspondiente a la expansión lineal de la nueva estructura cristalina. Teóricamente la gráfica de enfriamiento debe ser la antes trazada pero en sentido contrario, siendo las temperaturas a las que se presentan los cambios estructurales (cambios en el signo de la pendiente) una característica del material ensayado.



## 4.4.3.1) ACERO GB1 (1015)

Composición química 0.18%C; 0.25%Si; 0.40%Mn.

Razón de calentamiento 300°C/hr.

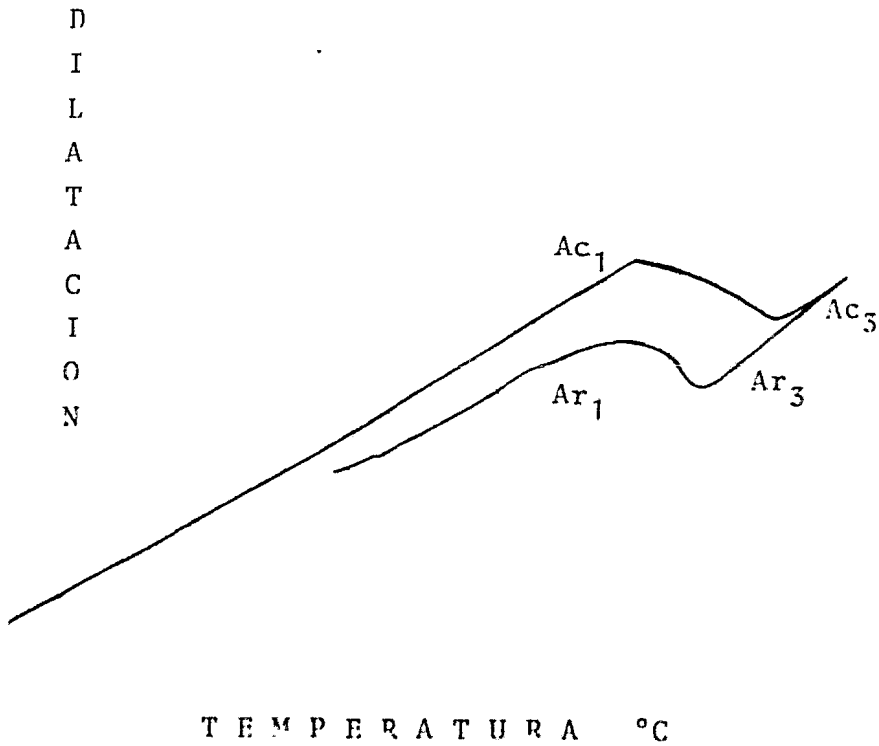


FIGURA IV.15.

## 4.4.3.2) ACERO 1020

Composición química 0.20%C.

Razón de calentamiento 300°C/hr.

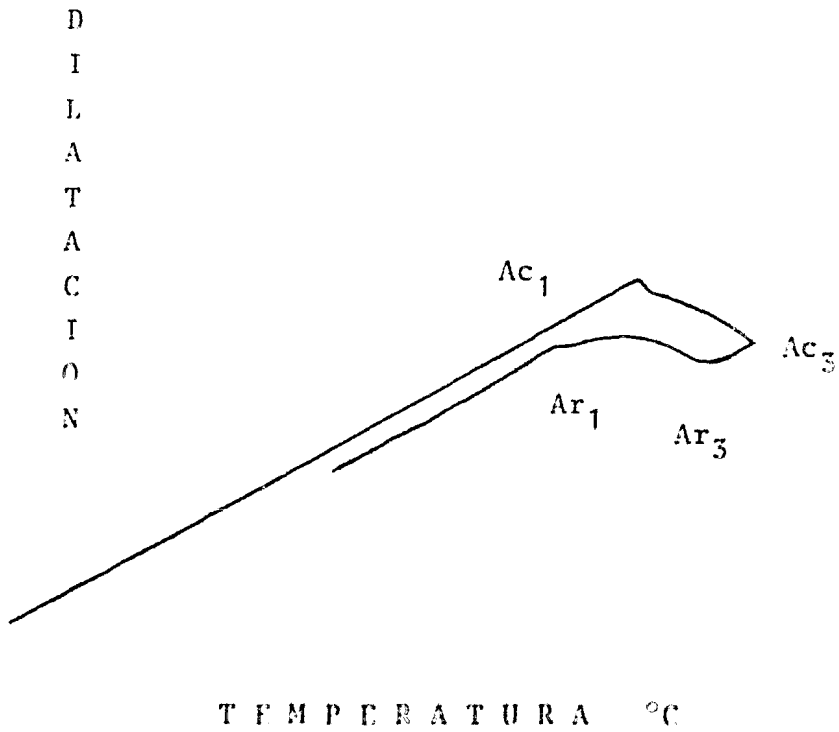


FIGURA IV.16.

## 4.4.3.3) ACERO GB4 (1045)

Composición química 0.45%C; 0.25%Si; 0.65%Mn.

Razón de calentamiento 300°C/hr.

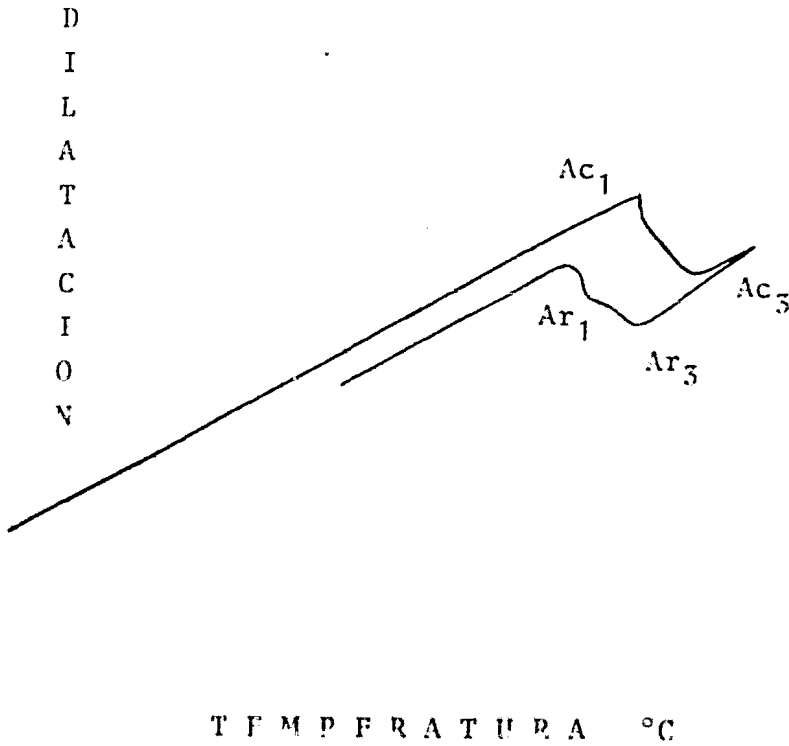


FIGURA IV.17.

## 4.4.3.4) ACERO GB6 (1060)

Composición química 0.60%C; 0.25%Si; 0.65%Mn.

Razón de calentamiento 300°C/hr.

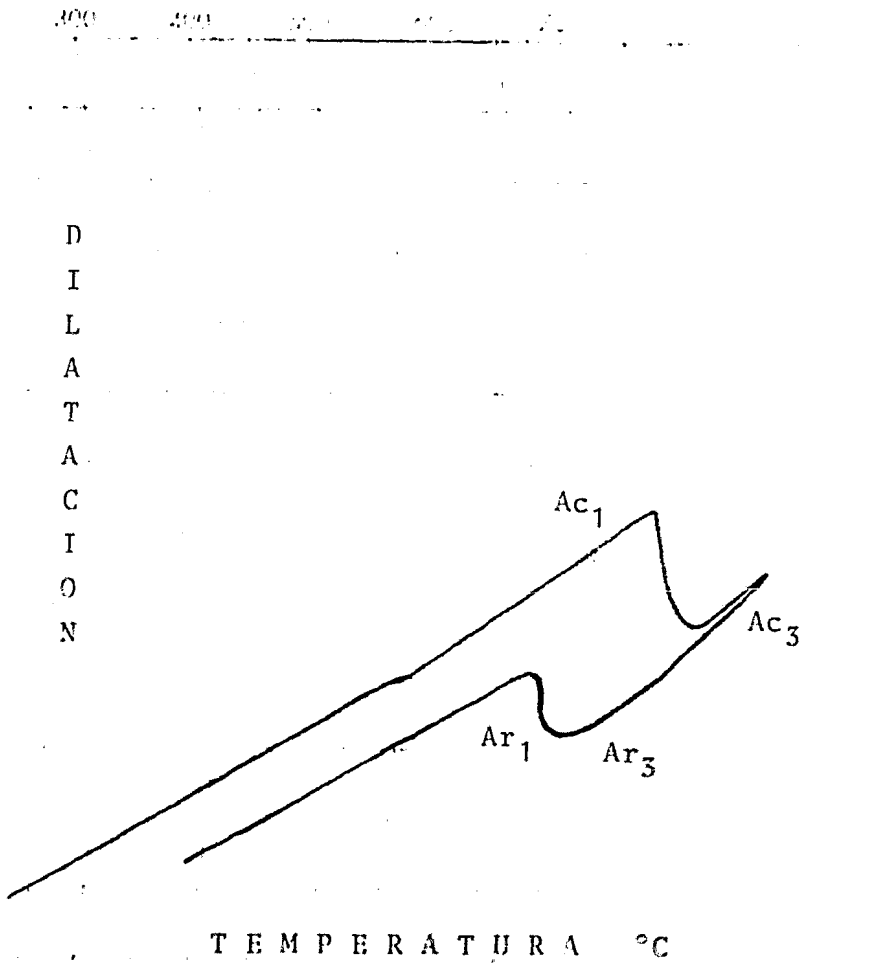


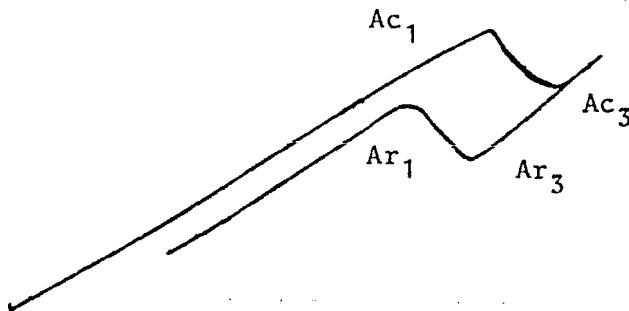
FIGURA IV.18.

## 4.4.3.5) ACERO WA255 (S1)

Composición química 0.60%C; 0.40%Si; 0.30%Mn; 0.10%Cr;  
2.00%W; 0.20%V.

Razón de calentamiento 300°C/hr.

D  
I  
L  
A  
T  
A  
C  
I  
O  
N



TEMPERATURA °C

FIGURA IV.19.

## 4.4.3.6) ACERO W10V (W2)

Composición química 1.00%C; 0.20%Si; 0.20%Mn; 0.10%V.

Razón de calentamiento 300°C/hr.

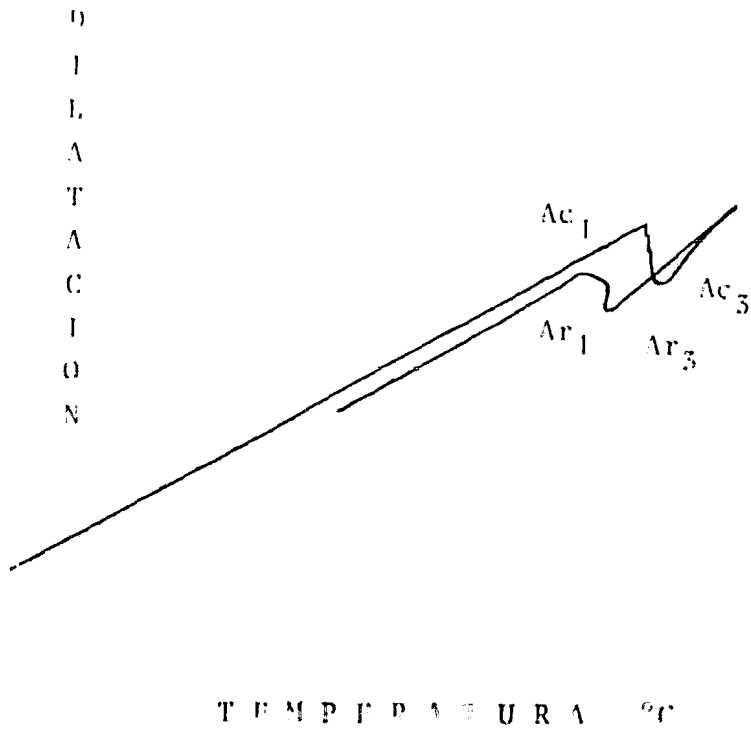


FIGURA IV.20.

## 4.4.3.9) COMENTARIOS A LAS GRAFICAS

Los aceros 1015, 1020, 1045, 1060 y K2 (veáanse figuras IV.15; IV.16; IV.17; IV.18 y IV.20) presentan primeramente en sus respectivas gráficas, una línea recta correspondiente al rango de expansión lineal de estos materiales, no así los aceros S1, D2 y D3 (veáanse figuras IV.19; IV.21 y IV.22), donde esta parte de la gráfica es no lineal, siendo esto claramente apreciable en la gráfica del acero D3. El comportamiento no lineal de la dilatación en esta parte de la gráfica, es atribuible a la cantidad tan alta de los elementos de aleación.

El punto donde debe de iniciarse la transformación alotrópica ( $A_{c1}$ ), sólo para el acero 1060 coincide con el teórico. Para el acero S1 este punto está por arriba del teórico, mientras que para los aceros 1015, 1020, 1045, K2, D2 y el D3, su punto de inicio de la transformación está por abajo de su punto teórico. El inicio anticipado de la transformación alotrópica se debe a que los elementos de aleación son predominantemente de tipo gammágeno, y el retraso de esta se debe a que la composición química de los elementos de aleación es de tipo alfégeno.

La forma de la curva graficada durante la transformación alotrópica, es función de la difusión del carbono y de la cinética de la reacción permitida por los elementos de aleación.

La terminación del cambio estructural ( $A_{c2}$ ) es cuando la curva retorna la forma de una línea recta correspondiente al rango de expansión lineal de la nueva estructura del.

Durante el enfriamiento, el punto correspondiente a el inicio de la transformación ( $Ar_3$ ) de la estructura CCCa a la estructura CCCu se desfasa con respecto a su equivalente en la curva de calentamiento, pues la cantidad de carbono admitida en la estructura CCCu es menor que la que contiene la estructura CCCa, lo que ocasiona que la dinámica de la difusión del carbono sea función del sentido en que se realiza la transformación.

El final del cambio de estructura en el enfriamiento -- ( $Ar_1$ ), es cuando la curva retoma la forma de una línea recta, la cual tiene la misma pendiente que la de la curva de calentamiento en el segmento correspondiente.



BIBLIOGRAFIA

Introducción a la Metalurgia Física  
Sidney H. Avner  
Mc. Graw-Hill 1978

Materiales para Ingeniería  
Van Vlack  
C.F.C.S.A. 1979

Metalurgia General  
J. Bernard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot  
Hispano Europea 1973

Catálogo General de Acero Solar  
México 1981

Instructivo de Operación del Dilatómetro DD.01  
Francia 1977

## CONCLUSIONES

El objetivo del trabajo era obtener los puntos críticos mediante el dilatómetro mecánico, de algunos aceros representativos. Esto se llevó a cabo de manera satisfactoria en el dilatómetro Adamel Lomargy modelo DD.01, en el cual se obtuvieron las -- curvas de dilatación contra temperatura que ponen de manifiesto la existencia de cambios en la estructura cristalina de los materiales, y por ende sus puntos críticos.

La razón directa del porqué de la obtención de los puntos críticos de los aceros, es la de trazar la parte correspondiente del diagrama de equilibrio fierro-carbono; desafortunadamente los puntos críticos aquí obtenidos no nos permiten de manera alguna hacer esto.

Las causas de lo anterior son debidas primeramente a -- las grandes limitantes del dilatómetro en cuanto a temperatura -- se refiere, pues un espécimen hipoeutectoide con el 0.6% de carbono cambia de la estructura cúbica centrada en el cuerpo a la cúbica centrada en las caras a 760°C aproximadamente, al igual que lo hace el acero hipereutectoide con el 0.9 % de carbono, -- siendo necesario alcanzar temperaturas por arriba de los 1200 °C para lograr la plena identificación de las muestras, cosa no posible en el equipo usado. Otra de las limitantes para el trazo -- correcto del diagrama de equilibrio, es que los materiales obtenidos comercialmente para los especímenes, son aceros aleados, -

impidiendo esto la obtención de los puntos críticos reales de -- las aleaciones fierro-carbono. Aunado a los problemas anteriores tenemos la baja sensibilidad del dilatómetro que es de tan sólo 122.3 ampliificaciones de la expansión, así como la poca preci--- sión del mismo, causada esta por los sistemas de detección, am-- plificación y graficación de baja eficiencia con que cuenta el - dilatómetro.

Por lo antes expuesto, es evidente que el dilatómetro - AdameL Lomargy modelo DD.01 no es adecuado para un estudio meta- lúrgico aislado, pero sí para uso académico, pues las gráficas - obtenidas son de muy fácil interpretación y son altamente demos- trativas en cuanto a poner de manifiesto los cambios de estructura cristalina, puntos críticos, así como las expansiones línea-- les de las estructuras encontradas durante el ensayo del especí- men; teniendo como única limitante para este uso, el tiempo que se emplea en cada uno de los ensayos.

Con la esperanza de haber despertado en el lector el interés por el tema, una disculpa a él, por lo escueto con que fueron tratados los capítulos.