

2ej. 5



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**
facultad de ingeniería

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO DE
DILATOMETRIA PARA LA INVESTIGACION DE
TRANSFORMACIONES EN MATERIALES
METALICOS**

TESIS

**que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
presenta**

JUAN JOSE ALESSIO ROBLES G.

México, D.F.

1979



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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

	<u>PAG</u>
<u>C A P I T U L O I - D I L A T O M E T R I A</u>	
1.1 <u>GENERALIDADES</u>	1
1.1.1 ENLACES METALICOS	1
1.1.2 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS METALES	1
- Celdas Unitarias	
- Número de Coordinación	
- Estructura Cúbica Centrada en el Cuerpo	
- Estructura Cúbica Centrada en las Caras	
- Estructura Hexagonal Compacta	
1.1.3 INDICES DE MILLER	5
- Indices de Dirección en la Red Cúbica	
- Indices Cúbicos para Plano	
1.1.4 FACTOR DE ACOMODAMIENTO ATOMICO	9
1.2 <u>TRANSFORMACIONES EN MATERIALES METALICOS</u>	12
1.2.1 METALES PUROS	13
1.2.2 USO DE LAS CURVAS TERMICAS	15
1.2.3 TRANSFORMACIONES DE ESTADO SOLIDO	17
1.3 <u>TRANSFORMACIONES EN ALEACIONES Fe-C</u>	18
1.3.1 AUSTENIZACION	19
1.3.2 TRANSFORMACION DE LA AUSTENITA A PERLITA	20
1.3.3 MARTENSITA	21

		II
		<u>PAG</u>
1.3.4	INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS TRANSFORMACIONES	24
1.3.5	TRANSFORMACION AUSTENITA-FERRITA	25
1.3.6	FORMACION DE PERLITA	27
1.3.7	TRANSFORMACION MARTENSITICA	30
1.4	<u>DILATOMETRIA</u>	32
1.4.1	DILATOMETROS DE TIPO MECANICO	33
1.4.2	DIAGRAMAS T-T-T (Transformación-Tiempo-Temperatura)	37
1.4.3	METODOS PARA LA DETERMINACION DE LA CURVA "S" Y LOS DIAGRAMAS T-T-T	41
1.4.4	INTERPRETACION Y APLICACION PRACTICA DE LOS DIAGRAMAS T-T-T	42
<u>C</u>	<u>A</u>	
<u>P</u>	<u>I</u>	
<u>T</u>	<u>U</u>	
<u>L</u>	<u>L</u>	
<u>O</u>	<u>O</u>	
<u>II</u>	-	<u>DISEÑO DEL DILATOMETRO</u>
2.1	<u>INTRODUCCION</u>	51
2.2.	<u>DISEÑO DEL HORNO ELECTRICO</u>	51
2.2.1	PERDIDA DE CALOR	52
2.2.2	ELEMENTO CALENTADOR	56
2.2.3	CIRCUITO DE LA RESISTENCIA	61
2.2.4	CONTROL DE TEMPERATURA	63
2.2.5	CIRCUITO ELECTRICO DEL HORNO	64
2.3	<u>DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICION</u>	66
2.3.1	SISTEMA MECANICO	66
2.3.2	MECANISMO DE AJUSTE. TREN DE ENGRANES	67
2.3.3	PALANCA DE ESPEJO	72

	III
	<u>PAG</u>
2.3.4 SISTEMA OPTICO	74
- Cálculo del Sistema Optico	
- Lente	
2.3.5 PANTALLA	77
2.3.6 ESPEJO	78

C A P I T U L O III - CONSTRUCCION DEL DILATOMETRO

3.1	<u>PROCESO DE CONSTRUCCION</u>	105
3.1.1	HORNO ELECTRICO	105
	- Carcaza y Tapas	
	- Elemento de Calefacción	
	- Colado de Concreto aislante	
3.1.2	ESTRUCTURA	108
3.1.3	ALAMBRADO DE TABLERO DE CONTROL	109
3.1.4	SECUENCIA DE OPERACIONES SEGUIDA EN LA CONSTRUCCION	110
3.2	<u>COSTO DE MATERIALES</u>	117
3.3	<u>PRUEBAS DE HORNO DE CALENTAMIENTO</u>	120
3.3.1	LEVANTAMIENTO DE TEMPERATURA	120
3.3.2	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO EN EL HORNO	122

C A P I T U L O IV - INSTRUCTIVO DE MANEJO DEL DILATOMETRO

4.1	<u>INSTALACION</u>	125
-----	--------------------	-----

4.2	<u>MANEJO Y AJUSTE DEL DILATOMETRO</u>	125
4.2.1	TABLERO DE INSTRUMENTOS	125
4.2.2	MONTAJE DE PROBETA DE ESTUDIO	125
4.2.3	LAMPARA PROYECTOR Y PUNTO LUMINOSO	127
4.2.4	CALIBRADO DE LAS DILATAIONES EN LA PANTALLA	127
4.2.5	SELECCION DE AMPLIFICACION	127
4.3	<u>OBTENCION DE CURVAS</u>	128
4.3.1	OBTENCION DEL DIAGRAMA T-T-T O CURVA "S"	129
4.3.2	OBTENCION DEL DIAGRAMA T-C-R	132
<u>C A P I T U L O</u>	<u>V</u> - <u>CONCLUSIONES</u>	134
<u>B I B L I O G R A F I A</u>		135

1.1 GENERALIDADES**1.1.1** ENLACES METALICOS

Los enlaces metálicos, son tipos de ligas originadas por la fuerza de atracción de los iones positivos y negativos.

Los diferentes tipos de enlaces que se presentan por la atracción de los núcleos (positivos) y los electrones (negativos), determinan las características mecánicas del metal en estado sólido. Por ejemplo, los electrones libres, pueden moverse en un campo eléctrico. Los electrones de valencia con su libertad de movimiento, pueden transferir energía térmica de un alto a un bajo nivel de temperatura.

Los electrones de valencia desempeñan un papel importante en los enlaces metálicos. En estado sólido, estos electrones no están ligados permanentemente a un átomo, sino que son compartidos por varios átomos. A estos electrones, se les conocen como electrones libres y son capaces de moverse a voluntad, a través de una red cristalina.

Los metales se caracterizan por presentar una disposición ordenada de iones cargados positivamente, entre los cuales se mueven electrones en todas direcciones y a grandes velocidades. Este movimiento de electrones es equivalente a una distribución más o menos uniforme de electricidad negativa, que mantiene separados a los iones positivos. Las fuerzas de enlace que mantienen unido a un cristal metálico, proceden de la atracción de los iones con carga positiva, en combinación con la nube de carga negativa que queda entre ellos.

1.1.2 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS METALES

Existen muchos tipos diferentes de estructuras cristalinas, algunas de las cuales son bastante complicadas. Sin embargo, la mayoría de los metales, cristalizan en alguna de las siguientes estructuras:

Cúbica Centrada en el Cuerpo
Cúbica Centrada en las Caras
Hexagonal Compacta

Celdas Unitarias.

Las redes cristalinas están formadas por celdas unitarias que se repiten en todas direcciones y son el grupo más pequeño de átomos que posee la simetría de un cristal. Cuando las celdas unitarias forman parte de una red cristalina, los átomos no pertenecen únicamente a una celda unitaria sino que, éstos son compartidos por varias celdas. Así tenemos que un átomo de una red cúbica centrada en el cuerpo, forma parte de las ocho celdas unitarias que lo rodean. Por lo que sólo un octavo de átomo corresponde a cualquiera de esas celdas unitarias. Los átomos en el centro de la celda, no son compartidos por ninguna otra celda. Así que la red cúbica centrada en el cuerpo tiene dos átomos por cada celda; uno, por los átomos de las esquinas y el otro correspondiente al átomo del centro de la celda.

En la celda unitaria de la red cúbica centrada en las caras, se puede observar un átomo en el centro de cada una de las caras. Al formarse una red cristalina de este tipo de celdas, los ocho átomos de las esquinas contribuyen a formar un átomo de la celda unitaria.

Los átomos de las caras son compartidos cada uno por dos celdas por lo que, cada celda, cuenta con tres átomos, de esta forma, la red tiene un total de cuatro átomos por celda unitaria.

Número de Coordinación.

El número de coordinación de una estructura cristalina, se refiere

al número de átomos vecinos más cercanos de cualquier átomo de la red. Así en la red cristalina cúbica de cuerpo centrado, el átomo centrado en el cuerpo, tiene ocho vecinos que están en contacto con él. Los átomos de esta red, son equivalentes y en consecuencia, cada átomo de este tipo de estructura que no esté en la superficie, tiene ocho átomos vecinos; por lo que el número de coordinación de esta red es ocho.

Estructura Cúbica Centrada en el Cuerpo

Este tipo de estructura presenta un átomo en el centro de la celda, este átomo es colineal con cada átomo de las esquinas de la celda. Los átomos que conectan diagonalmente las esquinas opuestas del cubo, forman líneas rectas, tocando cada átomo al que le sigue en secuencia. Todos los átomos de esta red, son equivalentes, por lo que, el átomo del centro no tiene un significado especial sobre los que ocupan las esquinas, ya que éstos podrían ser escogidos como centro de la celda unitaria.

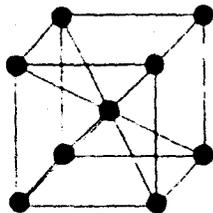


Figura 1-1 Estructura Cúbica Centrada en el Cuerpo

Estructura Cúbica Centrada en las Caras

En esta red, los átomos están situados de una forma muy compacta. En la Figura se muestra un plano compacto de la red cúbica centrada en las caras, se puede observar que estos átomos son colineales en direcciones com

pactas. Los átomos están en contacto sobre una misma línea.

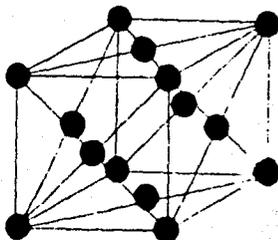


Figura 1-2 Estructura Cúbica Centrada en las Caras

Este tipo de red, tiene cuatro planos octaédricos compactos, y es la única que presenta tantos planos compactos y cada uno de éstos contienen tres direcciones compactas. Esta característica da a los metales cúbicos centrados en las caras, propiedades físicas diferentes a los otros metales; una de éstas, es la capacidad para soportar deformación plástica severa.

Estructura Hexagonal Compacta

Los planos de la estructura hexagonal compacta, son iguales a los de la red cúbica de cara centrada, con la diferencia que, al colocar un plano sobre otro, los átomos de un plano caen directamente sobre el átomo del plano anterior. Ambos tipos de estructuras, presentan una forma compacta ideal; sin embargo, son muy marcadas. La diferencia más evidente, es el número de planos compactos. En la red cúbica centrada en las caras, hay cuatro planos compactos (planos octaédricos), y la red hexagonal compacta sólo cuenta con un plano, (plano Basal), que es equivalente al plano octaédrico. El plano compacto simple de la red hexagonal da origen entre otras cosas, a propiedades de deformación plástica que son más direccionales, que

las encontradas en los cristales cúbicos.

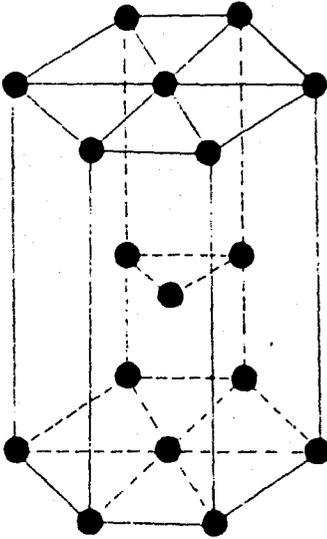


Figura 1-3 Estructura Hexagonal Compacta

1.1.3 INDICES DE MILLER

Para estudiar la orientación en el espacio de las redes cristalinas, Miller desarrolló un sistema para la designación de índices para planos y direcciones cristalográficas. Este sistema ha sido aceptado universalmente.

A continuación se presentan los índices de Miller para cristales cúbicos y hexagonales.

Índices de Dirección en la red Cúbica

Si consideramos un sistema de coordenadas cartesianas con ejes para

lejos al borde de la celda unitaria de un cristal cúbico, en el que se toma como unidad de medición, la longitud del borde de una celda unitaria. En la

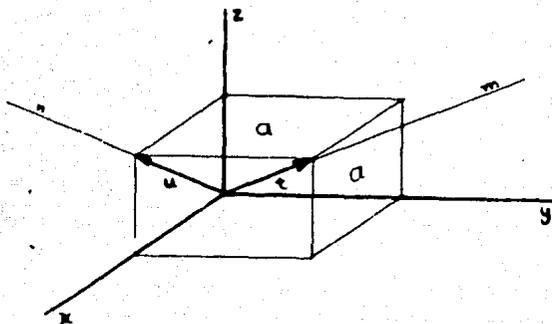


Figura 1-4 Dirección de los Índices de Miller

figura 1-4, la diagonal "m", tiene la misma dirección que un vector "t" del tamaño de la diagonal, a través de la celda. Este vector tiene un componente en cada uno de los ejes coordenados y es igual a "a", que es la unidad de medición (largo de la celda unitaria), por lo que, el vector tiene componentes 1,1,1, sobre los ejes "x, y, z". En este caso, los índices de Miller de la dirección "m", son (1,1,1).

Si consideramos ahora un vector que tiene la dirección de la diagonal "n", tendrá como índices de Miller, la representación (1 0 1).

Así mismo, los índices para el eje "x" son (1,0,0), del eje "y" (0,1,0) y del eje "z" (0,0,1).

De esta forma se puede establecer una regla para encontrar los índices de Miller de una dirección cristalográfica. Esto se logra trazando un vector desde el origen, paralelo a la dirección, cuyos índices se de sean. La magnitud del vector, debe ser tal, que sus componentes sobre los

ejes coordenados, tengan longitudes que sean números enteros simples. Por convención, se utilizan los índices (1,1,1) y no (2,2,2), que representa la misma dirección.

Los índices de la diagonal "1" de la figura 1-5, se representarán, haciendo pasar un vector "p", que tendrá como componentes en los ejes "x, y y z", los valores 1 - 1,1, respectivamente.

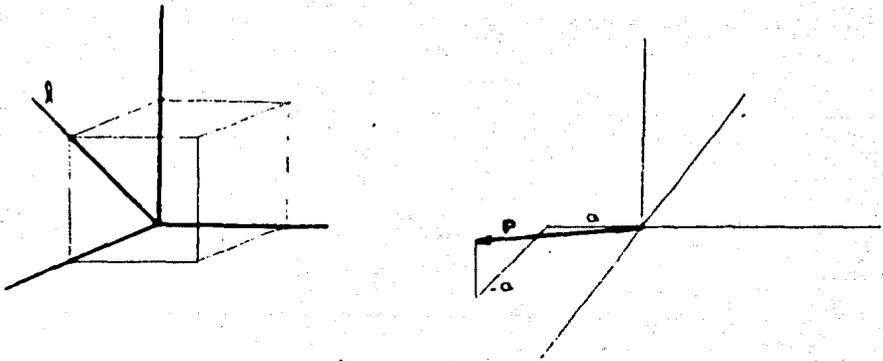


Figura 1-5

Donde los índices de Miller del vector "p" son (1,1,1). El signo negativo del índice y se indica colocando una barra sobre el índice correspondiente:

$$[\bar{1} \ 1 \ 1]$$

Los índices de Miller encerrados en corchetes, representan una dirección cristalográfica específica. Cuando se desea hacer referencia a todas las direcciones de la misma forma, se utilizan signos tales como $\langle 1,1,1 \rangle$ que representa el conjunto de las cuatro direcciones ($[1,1,1]$ $[\bar{1},1,1]$ $[1,\bar{1},1]$ $[1,1,\bar{1}]$).

Índices Cúbicos para Planos

Los planos cristalográficos al igual que las direcciones, se re

presentan por juegos de números enteros y se obtienen de la intercepción que forman los planos con los ejes coordenados. En la figura 1-6, el plano indicado intercepta a los ejes "x, y, z", en distintas celdas, 1, 3 y 2, respectivamente. Los índices de Miller son proporcionales, no a estos interceptores, sino a sus recíprocos, $1/1$ $1/3$ $1/2$ y por definición, los índices de Miller son números enteros, que tienen la misma relación que estos recíprocos, en este caso 6, 2, 3. Los índices de Miller de un plano, se encierran entre un paréntesis (6 2 3), para ser diferenciados de las direcciones.

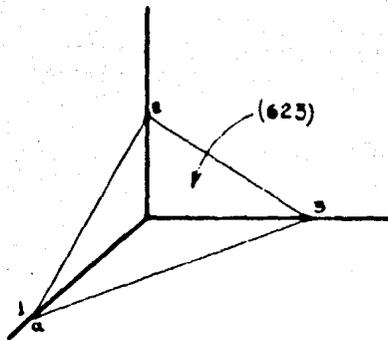
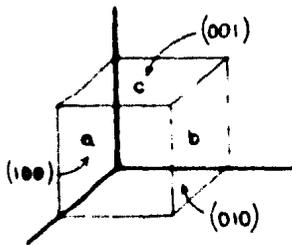


Figura 1-6 Índices de Miller para un Plano

A continuación se presenta varios planos importantes de los cristales cúbicos y sus respectivos índices.



cara a	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{\infty}$	(100)
cara b	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{\infty}$	(010)
cara c	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{\infty}$	$\frac{1}{1}$	(001)

Figura 1-7

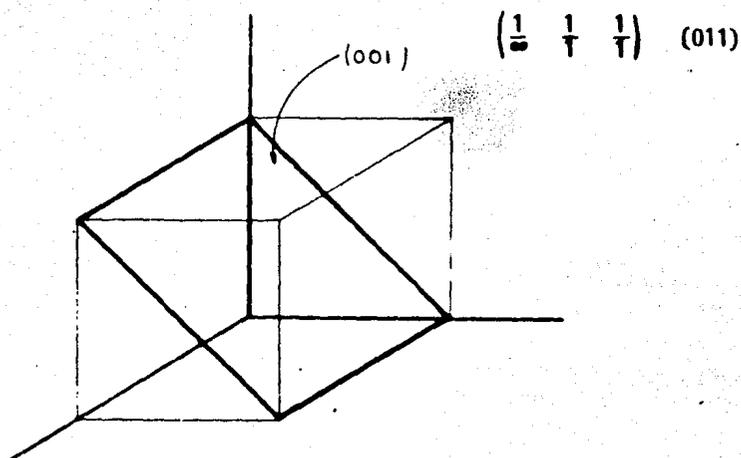


Figura 1-8

La barra sobre un dígito representa una intercepción negativa. El juego de planos de una forma dada, tal como los cuatro planos octaédricos $(1,1,1)$, $(1,\bar{1},1)$, $(\bar{1},1,1)$ y $(1,1,\bar{1})$, se representa como un grupo con ayuda de llaves que encierra uno de los índices, ésto es: $\{1,1,1\}$. Así, cuando se desea hacer referencia a un plano específico en un cristal de orientación conocida, se usan paréntesis, pero si la referencia se hacen en cuanto a la clase de planos, se emplean llaves.

1.1.4 FACTOR DE ACOMODAMIENTO ATOMICO

$$\begin{aligned} \text{Factor de acomodamiento átomico} &= \frac{\text{Volumen de los átomos}}{\text{Volumen de la celdilla}} \\ &= \frac{4 \pi r^2 \cdot 3/3}{(2r)^3} = 0.52 \end{aligned}$$

Esto es en el caso de una celda unitaria que contiene un átomo metálico.

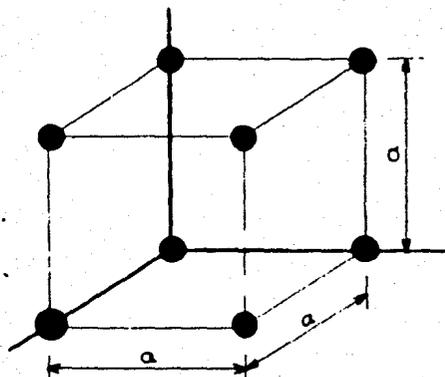


Figura 1-9

El hierro tiene una estructura cúbica, a temperatura ambiente; la celdilla unitaria del hierro, tiene un átomo en cada vértice del cubo y otro en el centro del cuerpo. En este tipo de estructura cúbica de cuerpo centrado (ccc), cada átomo está rodeado por ocho átomos adyacentes de hierro y esto hace que el átomo esté localizado en una esquina en el centro de la celdilla unitaria. Así, cada átomo tiene el mismo vecindario geométrico

En la estructura (ccc), hay dos átomos por celda unitaria, un átomo está en el centro del cubo y los ocho están en las esquinas, aportan $1/8$ de átomo para formar el 2º átomo. Así la constante de la retícula "a", es está relacionada con el radio atómico r por:

$$a_{bcc} = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$

Por lo tanto, el acomodamiento atómico es 0.68, éste es mayor que el de las estructuras simplemente cúbicas de metal. El hierro es el metal más común con este tipo de estructuras.

La estructura cúbica centrada en las caras, es más común que las estructuras cúbicas de cuerpos centrados, metales como el aluminio, cobre, plomo, níquel poseen este tipo de acomodamiento atómico. Los metales con este tipo de estructura, tienen cuatro veces más iones que las celdillas unitarias. Los ocho octavos de las esquinas, contribuyen a totalizar un átomo; y las seis mitades de los átomos, de las caras centradas contribuyen con un total de tres átomos por celda unitaria. La constante de retícula (a), está relacionada al radio atómico (r) por:

$$a_{\text{fcc}} = 4r / \sqrt{2}$$

La estructura cúbica de caras centradas, tiene el mayor factor de acomodamiento: (0,74), que es posible para un metal cúbico y así esta estructura es llamada "Estructura de Acomodamiento más Cercano".

En las estructuras hexagonales compactas, los metales no cristalizan en un patrón simple hexagonal, debido a que el factor de acomodamiento es muy bajo, sin embargo, se encontrarán compuestos conteniendo más de un tipo de átomos con estos patrones, en posiciones equivalentes.

La estructura hexagonal compacta, se caracteriza por tener cada átomo en una capa situada directamente arriba o abajo de los intersticios entre tres átomos de las caras adyacentes. Cada átomo toca tres átomos de la capa bajo un plano, seis átomos en su propio plano y tres en la capa superior.

El factor de acomodamiento atómico, para una estructura hexagonal, compacta metálica, resulta ser igual al factor de acomodamiento de un metal ya que tiene un número de coordinación de 12.

El factor de acomodamiento atómico, es determinante, en el estudio de transformaciones en estado sólido, ya que está ligado con las deformaciones que sufren los metales al ser calentados y enfriados.

1.2 TRANSFORMACIONES EN MATERIALES METALICOS

Es bien sabido que cuando un metal sufre una transformación de estado a causa de un calentamiento a presión constante (de sólido a líquido o de líquido a vapor), la transformación va acompañada por una absorción de calor a la temperatura de transición. A la inversa, cuando se pasa de un estado a otro al disminuir la temperatura, la transformación va acompañada por una evolución de calor. Este fenómeno térmico está relacionado con una diferencia en el contenido de energía de una fase con respecto a la fase que será formada y se manifiesta de acuerdo a los efectos de calor conocidos como: calor latente de fusión y de evaporización.

En muchos aspectos es una circunstancia favorable, que algunos metales puros y aleaciones atraviesen por transformaciones de fase, en estado sólido. Estas transformaciones pueden ser cambios alotrópicos asociados a los metales puros o cambios de fase en las aleaciones (descomposición de soluciones sólidas en otras fases, formación de solución sólida a partir de dos o más fases existentes, precipitación de constituyentes secundarios para satisfacer los límites del equilibrio de solubilidad, etc.). Estas transformaciones de estado sólido, son generalmente acompañadas de efectos de calor, que no son siempre detectables en un análisis térmico; y por cambios al volumen que son detectados al medir la expansión o contracción de una muestra de metal con ciertas características de forma.

Cuando el hierro puro es enfriado a partir de una temperatura elevada ($1,000^{\circ}\text{C}$), donde se conoce como hierro γ , se presenta una transformación alotrópica a los 910°C . Esta transformación involucra la formación de hierro alfa con una marcada evolución de calor conocida como recalcificación. El efecto de calor es de tal magnitud, que el hierro se verá brillar mientras se termina el proceso de transformación, a causa de la diferencia en el acomodamiento atómico del hierro γ , (cúbico de cara centrada con respecto al hierro alfa, la transformación será acompañada por una marcada expansión que podrá ser medida).

1.2.1 METALES PUROS

Si un metal puro es uniformemente calentado a partir de la temperatura ambiente hasta su estado líquido y si la temperatura es anotada a intervalos regulares de tiempo con ayuda de un termopar o algún dispositivo para medir la temperatura, una irregularidad se presentará en la velocidad de calentamiento que marca la temperatura a la cual se funde el metal. Este punto de transición, se puede observar al graficar los resultados obtenidos de temperatura contra calentamiento, produciendo lo que se conoce como una curva de tiempo-temperatura de calentamiento, de la misma forma al graficar los datos obtenidos al enfriar un metal en estado líquido al estado sólido, se obtiene una curva de tiempo-temperatura de enfriamiento. Las curvas para un metal puro se muestran en la figura 1-10, el cambio brusco en la curva indica la temperatura a la cual se presenta la transformación de estado.

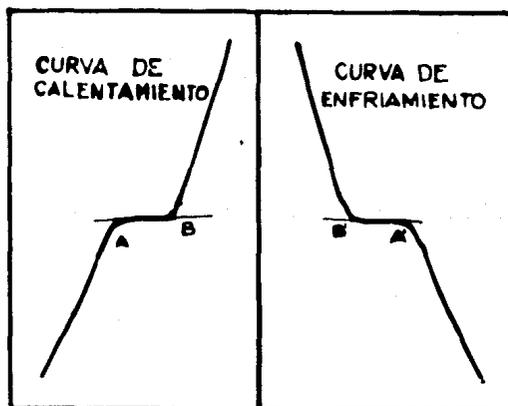


Figura 1-10 Curva Tiempo-Temperatura de calentamiento y enfriamiento de un metal puro.

En un caso ideal, la temperatura del metal permanecerá constante en el punto de fusión o solidificación como consecuencia, los segmentos AB, A'B', de las curvas serán horizontales y paralelas al eje del tiempo. La curva ideal se caracterizará por un cambio discontinuo en lugar de un cam

bio gradual. En un caso real sólo una pequeña parte de los segmentos serán horizontales y esta parte en la curva de calentamiento será más oblicua que en la curva de enfriamiento. Como consecuencia, la información de la curva de enfriamiento es más confiable cuando se desea determinar el punto de fusión de un metal puro. La primera parte del segmento plano de la curva de enfriamiento y la parte plana final del segmento de la curva de calentamiento muestran los puntos reales de solidificación y fusión respectivamente.

Las curvas de enfriamiento de algunos metales puros, tales como el antimonio y aleaciones de tipo eutéctico, son poco marcadas a causa de las condiciones de sobre-enfriamiento y sub-enfriamiento. Por una parte el super-enfriamiento resulta de condiciones experimentales que no favorecen el equilibrio entre las fases líquida y sólida a la temperatura real de solidificación. Esta circunstancia, se muestra en la curva de enfriamiento y se muestra en la figura 1-11. A medida que el metal es enfriado uniformemente, la solidificación se presentaría a la temperatura representada en el punto A, pero a causa de las condiciones que favorecen el super-enfriamiento, el metal se enfría a una temperatura B. A esta temperatura, el metal fundido se encuentra en un estado metastable. Una vez que la solidificación empieza, la rapidez a la cual continúa es muy alta y como consecuencia más calor será necesario durante la reacción. La curva se alza hasta la verdadera temperatura de solidificación, (punto A), después de esto, el proceso de enfriamiento sigue su curso normal.

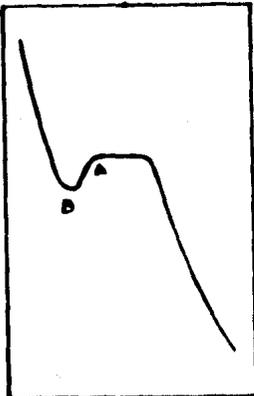


Figura 1-11 Curva de Tiempo-Temperatura de enfriamiento de un metal puro sometido a un super-enfriamiento.

1.2.2 USO DE LAS CURVAS TERMICAS

Con relación a los metales puros, el uso principal de la información obtenida de las curvas de calentamiento y enfriamiento, es establecer la temperatura a la cual se presenta un cambio de estado, puntos de fusión o solidificación y en ciertos metales, es de determinar la temperatura a la cual uno o más cambios alotrópicos se presentan en estado sólido. La determinación de cambios de fase en estado sólido por análisis térmico, en comparación con otros métodos, depende principalmente de la magnitud de los efectos de calor a un nivel de transformación-temperatura alotrópica. Si los efectos del calor son pequeños y no afectan la pendiente de la curva térmica, se deben utilizar otros métodos de detección más precisos.

En el caso de aleaciones, la información obtenida de las curvas de calentamiento y enfriamiento, son muy útiles en la determinación de las temperaturas a las cuales se inicia y termina la fusión, cuando se calienta el metal o las temperaturas de solidificación cuando se enfría. En general la determinación del punto de inicio de solidificación, es determinada por la información de la curva de enfriamiento, mientras que el fin de la solidificación o su temperatura equivalente (el inicio de la fusión), se establece de una manera más exacta utilizando la curva de calentamiento. Durante el enfriamiento, la fase sólida precipitada, rara vez se mantiene en equilibrio con el líquido del cual se ha formado. Además del análisis térmico, otros métodos son usados para determinar la temperatura a la cual se inicia la fusión y estos otros métodos particularmente, el metalográfico, consiste en calentar una serie de muestras a temperaturas progresivas, templando cada muestra después de que ha alcanzado equilibrio, a la temperatura a la que fue calentada, y finalmente, examinando la muestra metalográficamente para detectar la evidencia de un fundido deficiente.

Si la aleación presenta cambios de fase en estado sólido, la temperatura a la cual ocurren estos cambios, pueden ser detectados por el análisis térmico. Los cambios de fase al igual que los cambios alotrópicos de metales puros, debe de ser acompañada por varios efectos del calor para que

sean adecuadamente observados en las curvas de calentamiento o enfriamiento. Si los efectos de calor, son de pequeña magnitud, la temperatura de esa transformación será mejor determinada por otros métodos.

Con la recopilación de datos térmicos relativos a una serie de aleaciones compuestas de dos mismos metales, es posible construir un diagrama de equilibrio de ese sistema de aleación. Ya sea que el diagrama de equilibrio esté completo o parcialmente establecido, dependerá del método de análisis, el poder detectar cambios en el estado sólido. Cuando se interpreta correctamente un diagrama de equilibrio, se obtendrá información adecuada de cualquier aleación de interés en el sistema, ya sea, de solidificación o fusión y sus rangos de temperatura, equilibrios de fase a una determinada temperatura, cambios de concentración de fase con cambios en temperatura, etc. A causa de la importancia de los diagramas de equilibrio, cuando se estudian los constituyentes de la aleación. La construcción de diagramas de un sistema simple de aleación sin tomar en cuenta las transformaciones en estado sólido, se discutirán a continuación:

Al considerar una serie de aleaciones entre cadmio y bismuto, los metales son completamente solubles entre ellos, en estado líquido, e insolubles en estado sólido, y forman un metal eutéctico. Si la serie de aleaciones tiene una variación en su composición de 20% de cadmio puro, (punto de fusión de 321°C), y bismuto puro (punto de fusión 271°C). Las curvas de enfriamiento que se obtienen para cada aleación, serán similares en las mostradas en la figura 1-12. Se notará que estas curvas son similares con excepción de la obtenida de una aleación de 40% de cadmio, y 60% de bismuto Cada curva muestra el inicio de la solidificación de la aleación respectiva a una temperatura mostrada en el punto A; la solidificación a través del rango de temperatura con rechazo del constituyente excedente; y finalmente formando una aleación eutéctica a temperatura constante (140°C) obteniéndose la solidificación completa. La aleación compuesta de 40% de cadmio y 60% de bismuto, es la formación eutéctica de la aleación y por eso solidifica a temperatura constante, y no dentro de un rango de temperaturas.

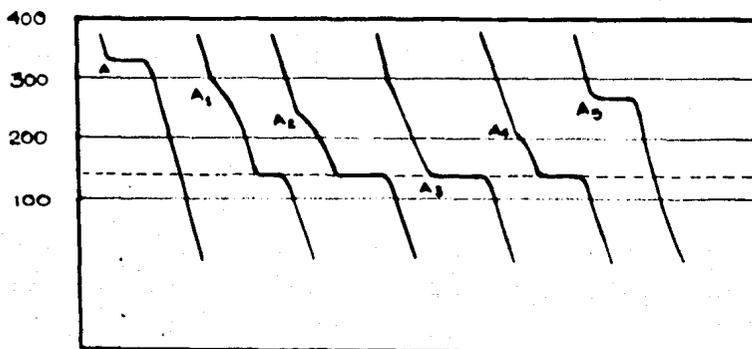


Figura 1-12 Curvas de temperatura de enfriamiento y tiempo de una serie de aleaciones entre cadmio y bismuto.

A medida que los porcentajes de bismuto aumentan de 0 a 60%, y como los porcentajes de cadmio aumentan de 0 a 40%, la temperatura a la cual se inicia la solidificación, es progresivamente más baja.

1.2.3 TRANSFORMACIONES DE ESTADO SOLIDO

Los métodos de análisis térmico, son técnicas para determinar las temperaturas de transformación que están asociadas con las reacciones por la detectabilidad de los cambios térmicos. La exactitud del análisis depende en gran parte de las velocidades de calentamiento y enfriamiento, por esto, errores de mucha magnitud se presentan con frecuencia, cuando se trata de determinar los puntos de transformación en soluciones sólidas cuyos componentes tienen velocidades de reacción lenta. El análisis cuantitativo de velocidad de reacción, requiere de una medición precisa y cuando estas velocidades varían, dentro de límites muy amplios, es prácticamente imposible estudiar el fenómeno por los métodos de análisis térmico ordinario.

Las transformaciones de estado sólido, se determinan con mayor exactitud por alguno de los siguientes métodos: método metalográfico, medida de la resistividad eléctrica, análisis de difracción de Rayos X, o análisis de cambios dimensionales o de volumen.

1.3 TRANSFORMACIONES EN ALEACIONES Fe-C

Es importante considerar las transformaciones que se presentan en las aleaciones hierro-carbono. Existen varias razones para esto: primero; el acero al carbono, es el metal más usado por el hombre, segundo; este tipo de aleaciones ha sido estudiado con detalle, y tercero; los cambios de fase que ocurren en el acero son variados e interesantes. Además, se ha observado, que las reacciones de estado sólido en el sistema hierro-carbono, son similares a las que se presentan en otras aleaciones. El estudio de las transformaciones del acero es de gran utilidad, porque ayuda a comprender las propiedades de este tipo de aleaciones, así como también las reacciones de estado sólido en general.

Enfocaremos nuestra atención a las transformaciones de fase que se presentan en la región eutectoide del diagrama de equilibrio. Para esto tenemos que considerar las transformaciones de fase en equilibrio y las que ocurren bajo condiciones fuera de equilibrio.

Si aplicamos un enfriamiento lento, es posible predecir los cambios de fase en algún tipo de acero con cierta precisión, auxiliándonos del diagrama de equilibrio. Por otra parte, cuando enfriamos un metal rápidamente, las transformaciones no ocurren bajo condiciones de equilibrio, formando nuevas y diferentes fases metaestables y constituyentes. Estas estructuras son de considerable importancia en la teoría del endurecimiento de los aceros.

1.3.1 AUSTENIZACION

Se conoce con el término de austenización de un acero, a la formación de la fase austenita. La formación de esta fase, se obtiene a partir de la fase ferrita más cementita. Esta transformación puede efectuarse a partir de la martensita. Calentando el acero, se descompondrá en ferrita y cementita para llegar después a la zona austenítica homogénea.

Es importante analizar el mecanismo de la formación de la austenita. En la figura 1-13, se representa la composición hipoeutectoide de un acero. Por debajo de la temperatura eutectoide, se encuentran partículas de cementita en una matriz de ferrita. Al calentar la probeta a una temperatura T_1 , la cementita (punto5), en contacto con la ferrita (punto4), dejará de ser estable. A la temperatura T_1 , la cementita reaccionará con la ferrita adyacente, formándose así una capa de austenita alrededor de la partícula de cementita, quedando una austenita entre la cementita y la ferrita, formándose así la siguiente configuración: Cementita (punto5), cementita+austenita (punto3), ferrita+austenita (punto2), ferrita (punto4).

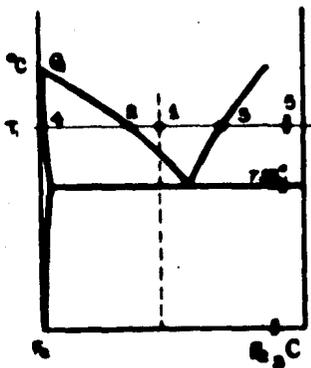


Figura 1-13 Concentraciones en la austenización

A medida que aumenta el tiempo de permanencia en la zona austenítica, los valores límites de 2 y 3 de la concentración de carbono, permanecen

constantes hasta que la partícula de cementita queda disuelta. Mientras tanto, la concentración máxima de carbono en austenita se reduce del punto 3 al punto 1. La concentración mínima de carbono representada por el punto 2 permanecerá constante mientras la ferrita esté presente. La concentración mínima de carbono evolucionará del punto 2 al punto 1.

El mecanismo de austenización para una composición hipereutectoide es análogo, sólo que la ferrita desaparece antes y la cementita después.

1.3.2 TRANSFORMACION DE LA AUSTENITA A PERLITA

En la práctica, los aceros son enfriados desde la región austenítica a la temperatura ambiente. Para obtener un acero recocido, se enfría lentamente, en ocasiones, dejando un metal dentro del horno, para que no sufra un cambio brusco de temperatura. Un acero normalizado, se obtiene cuando el metal es sacado del horno y enfriado en el aire.

Las reacciones que sufren los aceros al disminuir la temperatura son más fáciles de apreciar cuando la velocidad de enfriamiento es alta.

Si se permite que la austenita se transforme isotérmicamente a temperaturas menores de 723°C, el resultado será el mismo que el de un proceso de enfriamiento continuo muy lento. Las fases estables por debajo de la temperatura eutectoide, son ferrita y cementita, y la estructura eutectoide es una mezcla de estas fases. Este constituyente, se conoce con el nombre de Perlita.

La temperatura a la cual es transformada la austenita, tiene un fuerte efecto sobre la separación interlaminar de la Perlita. A medida que baja la temperatura es más pequeña la separación entre estas laminillas y de esto depende la dureza del metal.

La transformación perlítica es una reacción cuyo mecanismo está determinado por nucleación y crecimiento de los núcleos.

1.3.3 MARTENSITA

El mecanismo de formación de martensita a diferencia de la perlita es provocado por la importante baja de temperatura de transformación. La difusión del carbono se detiene y aumenta la tendencia al cambio, esto origina la transformación fase ($\gamma - \alpha$), sin difusión de carbono obteniéndose así un cambio brusco en la red cristalina.

El término martensita era anteriormente una denominación metalográfica de una determinada estructura de acero templado. El término cristalográfico martensita, se refiere a una solución super saturada de carbono en hierro. El término estructura martensítica, indica una estructura en la que puede existir una combinación de martensita, cementita, ferrita y un alto contenido de austenita residual,

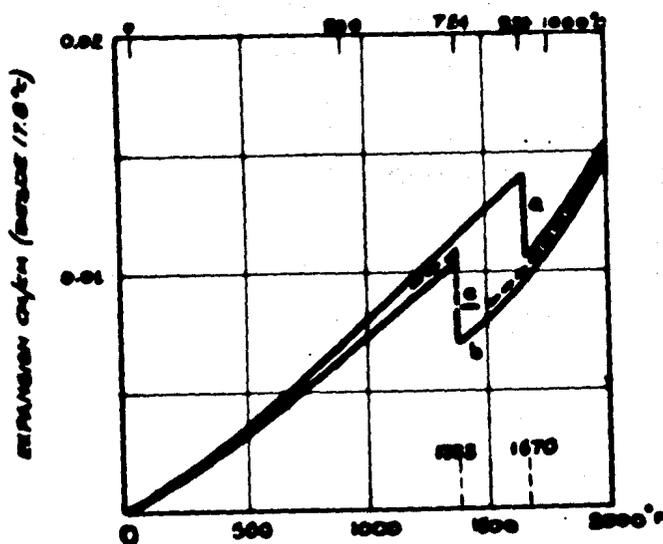


Figura 1-14 Cambios dimensionales en transformaciones de fase en hierro-carbono. (a) hierro puro, (b) 99.2 Fe, 0.8C (c) 99.6 Fe-C, 0.4C.

Las reacciones mostradas en la transformación isotérmica figura 1-14, para un acero eutectoide indican que entre más baja es la temperatura mayor es el tiempo requerido para la transformación, por esta razón, la austenita es más inestable a temperaturas bajas, pero superior a la temperatura ambiente, la estructura del acero cambia, pero el carbono presente permanece en solución. De esta transformación resulta la Martensita.

Con un examen de Rayos X, no se puede determinar que modificaciones sufren los átomos de carbono durante la transformación y en que parte de la red quedan ubicados. Hasta el momento no se puede afinar con exactitud si los átomos quedan en el centro de la celda unitaria, como en el caso de la austenita o como se considera en algunas situaciones en solución substitucional. Tampoco, se ha podido determinar, si la formación de la martensita es un fenómeno de nucleación. Esta transformación ocurre sin difusión y sin una dependencia del tiempo, por lo que normalmente no necesita nucleación. Sin embargo, en casos especiales la transformación depende del tiempo por lo que se considera probable la nucleación.

Casi todas las aleaciones hierro-carbono, contienen austenita después de un templado al llegar a temperaturas justamente por debajo de Mf. También se encontrará una parte más o menos grande de austenita residual, cuya transformación a martensita se presenta a temperaturas más bajas. La compresión que ejerce σ sobre la martensita, es consecuencia del aumento de volumen que acompaña a la transformación martensítica. Un fenómeno que está aparentemene en contradicción con esto, es el aumento de estabilidad de la austenita que se presenta a temperatura constante como función del tiempo. Cuando un acero es templado hasta una temperatura entre M_s y M_f, figura 1-15, de modo que sólo una parte de la austenita se transforma y cuando se deja el acero a esa temperatura durante un tiempo determinado, la austenita no transformada (residual), aumenta su estabilidad y sólo se transformará a una temperatura bastante inferior a M_f. Este efecto de esta bilización, aumenta cuando hay más formación de martensita en la primera fase de la transformación.

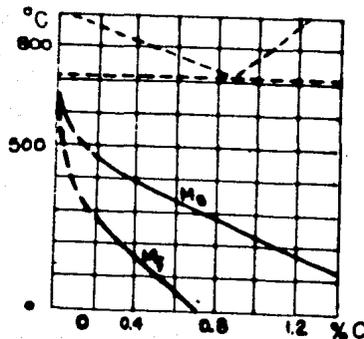


Figura 1-15 Temperatura de comienzo (Ms) y de final (Mf) de la transformación martensítica en relación con el contenido de carbono.

La austenita residual, tiene dos efectos importantes sobre los fenómenos de endurecimiento del acero:

Primeramente: la austenita puede en condiciones determinadas, transformarse isotérmicamente a martensita a temperatura ambiente, de modo que en una pieza de acero templado, pueden aparecer tensiones y cambios de volumen cuando el acero se enfría durante su uso a temperaturas bajas. También la deformación en frío y los choques de partes templadas, pueden provocar una transformación parcial de la austenita residual.

En aceros al carbono, el contenido en austenita residual, depende principalmente de la concentración del carbono y así tenemos que con 0.4% de carbono, la austenita residual alcanzará un máximo de 10%, con 1.3% de carbono aproximadamente un 40%, y con más de 1.7% de carbono, tendrá 80% de austenita residual.

Si tenemos un contenido de carbono menor del 0.3%, la estructura martensítica, además de obtener una dureza máxima, presenta propiedades de

ductibilidad y tenacidad favorables. Así tenemos que cuando calentamos el material a una temperatura entre 150 y 200°C, se eliminan las tensiones mecánicas provocadas por el temple anterior. (A este fenómeno se le conoce como "Stress Relieving").

1.3.4 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO SOBRE LAS TRANSFORMACIONES

En el caso de hierro puro, se puede observar que el punto de transformación γ - α , se desplaza a temperaturas más bajas cuando aumenta la velocidad de enfriamiento. Si por ejemplo, un acero conteniendo carbono en un 0.2% se enfria desde la zona homogénea austenítica, con una velocidad de enfriamiento constante, la formación de los primeros cristales de ferrita, no se iniciará sobre la línea de equilibrio GS, sino en un punto "a" situado más abajo; figura 1-16. En este caso, el carbono que está desalojando a la austenita, que lo rodea y a la austenita en contacto con la ferrita tiene una concentración representada por la c-a y es la concentración de la austenita en equilibrio con la ferrita a la temperatura t-a. La línea representa la evolución a causa del enfriamiento de la concentración de carbono en la austenita, en el límite austenita ferrita. La evolución de la concentración promedio de carbono en la austenita, está indicada por la línea a'b'. La línea a-b representa las temperaturas de inicio de la temperatura de transformación en función del contenido de carbono. Para la velocidad de enfriamiento V-Vo. Esta línea, además de estar situada por debajo de GS, presenta una mayor inclinación, ya que la estabilidad de la austenita y el super-enfriamiento aumentan cuando el contenido de carbono de la austenita residual se eleva.

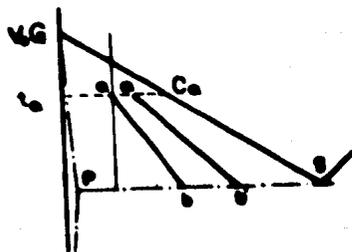


Figura 1-16 Influencia de la velocidad de enfriamiento.

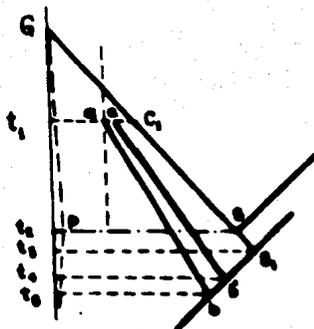


Figura 1-17 Influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la posición de la línea GS.

1.3.5 TRANSFORMACION AUSTENITA-FERRITA

El mecanismo de formación de ferrita se puede observar por el método metalográfico, cuando una probeta es templada en agua a partir de su zona de transformación, el crecimiento de los cristales de ferrita y los cristales formados, queda repentinamente interrumpido; y la austenita residual, se transforma en un nuevo constituyente (martensita), de esta forma es posible distinguir exactamente entre la ferrita formada antes del enfriamiento brusco y la austenita residual transformada a martensita durante el templeado.

Quando se estudia la formación de la ferrita, se toman en cuenta tres factores que afectan en forma independiente, estos son: el contenido en carbono de las probetas, la velocidad de enfriamiento y el grado de transformación en el momento del templeado. Tomando en cuenta estos factores, se pueden distinguir tres formas de cristales de ferrita que evolucionan paulatinamente de una forma a otra. Estos cristales son afectados por los factores antes mencionados de la siguiente forma:

- 1.- Con una velocidad de enfriamiento pequeña, bajo contenido

de carbono; al inicio de la transformación se forman cristales regulares y poliédricos de ferrita, cuyos ángulos y aristas, están más o menos redondeados por la tensión de la superficie.

2.- Cuando se tiene un grado de formación más avanzado o con velocidad de enfriamiento más grande o con mayor contenido de carbono los cristales se forman de manera menos regular y los ángulos de arista de éstos se vuelven más agudos.

3.- Con velocidad de enfriamiento bastante elevada y aumento del grado de transformación o del contenido de carbono, se forman cristales grandes y con forma de aguja, creciendo desde los límites de grano hacia el interior de los granos de austenita y con una orientación recíproca pronunciada. (Estructura Widmannstätten).

Parece entonces que los tres factores discutidos actúan en el mismo sentido para modificar la formación de cristales regulares hasta cristales irregulares y en forma de agujas. Esto puede explicarse como sigue: en la formación de un cristal de ferrita, el crecimiento de éste está determinado de un lado por la velocidad a la cual se transporte el calor latente de transformación y por otro lado, por la expulsión de carbono, que no puede disolverse en la ferrita formada. Cuando el calor formado así, y el carbono no puedan ser transportados con velocidad suficiente, el cristal podrá desarrollarse libremente en su forma poliédrica, con ángulos y aristas creciendo más rápidamente, pero al mismo tiempo rodeándose por la energía de superficie.

Cuando se aumenta la velocidad de enfriamiento y al mismo tiempo la velocidad de transformación, es preciso transportar por unidad de tiempo más energía de formación y más carbono. Esto va a favorecer el crecimiento de las aristas y puntas de los cristales de ferrita, ya que en ellos el calor puede ser intercambiado con el medio en varias direcciones, mientras que en un plano, esto únicamente puede ocurrir en una dirección perpendicular a éste. Lo mismo sucede para la difusión de carbono que está expelido por la

ferrita en la austenita. Según sigue la transformación, el contenido en carbono de la austenita aumenta en lugares cerca de la ferrita, o si el contenido en carbono original era alto, la difusión se vuelve más difícil y los cristales de ferrita crecen de manera angulosa y finalmente como agujas creciendo hacia el centro de los granos de austenita, donde está más bajo el contenido de carbono.

Además en la difusión de carbono en austenita, la anisotropía cristalográfica juega un papel importante. En la red cúbica centrada en las caras de la austenita, la velocidad de difusión del carbono es mayor en una dirección paralela a los planos de máximo empaquetamiento, o sea los planos (111). Además existe una relación cristalográfica entre la austenita y la ferrita: los planos (111), de la austenita serán los planos (110) de la ferrita centrada en el cuerpo. Esto explica porque los cristales de ferrita en forma de placas o agujas que se forman con velocidades de enfriamiento y contenidos de carbono relativamente grandes, aparecen con ángulos constantes sobre grandes superficies de la probeta metalográfica, en correspondencia con la austenita original. Esto es la estructura Widmannstätten que ocurren con frecuencia en acero de colado y de soldadura.

1.3.6 FORMACION DE PERLITA

La formación de perlita se puede estudiar de la misma forma que la ferrita. La dificultad en este caso, es que la formación de perlita no se presenta en un intervalo de tiempo determinado, sin embargo, con una velocidad de enfriamiento bastante grande. La transformación eutectoide se extenderá sobre un intervalo de temperatura pequeña, lo que facilitará el templado en la zona de transformación.

La formación de la estructura eutectoide está determinada por la nucleación y el crecimiento de los núcleos. La perlita está siempre nucleada por la cementita y éstos núcleos de cementita se forman generalmente en los límites de grano de la austenita, donde la energía de superficie a pro

ducirse es mínima, y crecen en la fase austenítica, figura 1-18A. La austenita más próxima a ésta primera laminilla, se vuelve más pobre al carbono, lo que provoca precipitación de ferrita sobre la cementita ya existente. A causa de esto, el contenido en carbono de la austenita adyacente aumenta y se forma un segundo núcleo de cementita, el que se muestra en la figura 1-18 B. Ambas fases crecen entonces con un frente común, mostrado en la figura 1-18C, hacia el centro del grano de la austenita (Nucleación Recíproca).



Figura 1-18 A



Figura 1-18 B



Figura 1-18 C

Cuando la velocidad de enfriamiento aumenta y se tiene una temperatura de transformación reducida, se presenta una aceleración pronunciada de la transformación austenita-perlita.

La influencia de la temperatura reducida de transformación, sobre el mecanismo de transformación se produce de la siguiente forma:

1.- Con una baja de temperatura, el coeficiente de difusión del carbono disminuye; en cambio el gradiente de concentración aumenta a causa de la disminución de la distancia entre las laminillas.

2.- Cuando se presenta un super-enfriamiento importante aumenta el potencial de nucleación y se forman más núcleos, haciendo que los granos de perlita se vuelvan más pequeños y numerosos.

3.- Con una baja de temperatura, la perlita tiende a desarrollarse en forma de abanico o esferoidal, lo que trae como consecuencia el aumento de la superficie de contacto entre la austenita y el frente de crecimiento perlítico. Esto también incrementa la velocidad de transformación.

Como resultado de estos tres factores, se tiene un aumento de la velocidad de transformación con una baja de la temperatura de transformación y un aumento de la velocidad de enfriamiento.

La velocidad de enfriamiento máxima a la cual la transformación perlítica puede ocurrir totalmente para una composición determinada de acero, se llama "Velocidad Crítica". La figura 1-19, muestra la temperatura de formación de la perlita, en función de la velocidad de enfriamiento. Estos puntos de transformación dinámica, se llaman Ar' . Desde la velocidad crítica V_c , la temperatura de transformación baja repentinamente y aparece un nuevo mecanismo de transformación, la formación de martensita en Ar' .

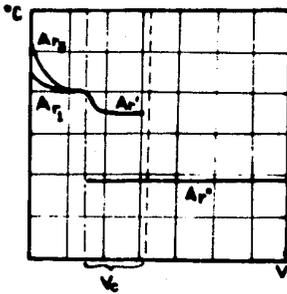


Figura 1-19 Baja del punto de transformación $A_{r'}$ en relación con la velocidad de enfriamiento

1.3.7 TRANSFORMACION MARTENSITICA

La figura 1-15, muestra el inicio (M_s), y el final (M_f) de la temperatura de transformación austenita-martensita, en función del contenido de carbono. Se puede observar que la estabilidad de la austenita, aumenta con el contenido de carbono y por esto bajan los puntos M_s y M_f . Además el intervalo M_s - M_f aumenta. Por otro lado, estos dos puntos casi no dependen de la velocidad de enfriamiento, figura 1-19, sin embargo es necesario contar con una velocidad de enfriamiento suficientemente alta para llegar a la transformación martensítica sin formarse precedente de perlita.

En la figura 1-15, hay que observar que la zona entre las líneas M_s y M_f , no pueden ser utilizadas como una zona de segregación, en la cual se podría determinar el porcentaje de cada fase con la posición de un punto ya que estas curvas no son líneas de equilibrio, sino que indican el comienzo y final de un fenómeno dinámico.

Velocidad de Nucleación

La velocidad de nucleación N , es el número de núcleos que se forman en un volumen unitario por segundo (usualmente un milímetro cúbico).

En la austenita de composición homogénea, los núcleos se forman heterogéneamente en los límites de grano, a diferencia de velocidad de desarrollo isotérmico, la velocidad de nucleación isotérmica es una función del tiempo. La figura 1-20, muestra que para comparar las velocidades de nucleación a temperaturas diferentes, es necesario considerar la velocidad de

nucleación promedio para cada temperatura. La variación del promedio N con la temperatura se indica en la figura 1-21, en esta misma figura se muestra la velocidad de desarrollo, como una función de la temperatura. Gran parte de los cambios en la estructura perlitica que ocurren como función de la temperatura, pueden ser deducidos mediante el estudio de estas curvas.

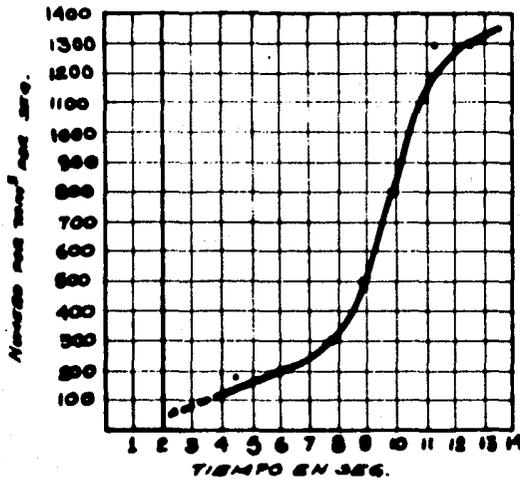


Figura 1-20 Velocidad de nucleación (N) de la perlita en función del tiempo de un acero eutectoide transformados a 680°C

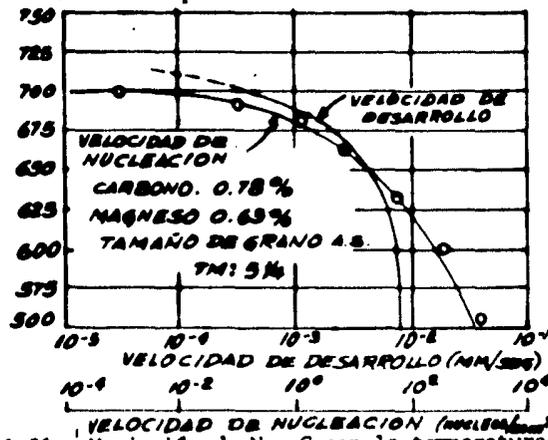


Figura 1-21 Variación de N y G con la temperatura en un acero eutectoide.

1.4 DILATOMETRIA

La dilatometría se debe principalmente a Bain y Davenport, los cuales desde 1930 investigaron de manera científica y sistemática, las transformaciones del acero. Estas transformaciones se estudiaron sobre todo por dos métodos diferentes: el metalográfico y por dilatometría.

Los principios de la dilatometría, están asociados con el fenómeno del cambio de volumen que prácticamente todos los materiales sólidos presentan en sus transformaciones de fase (algunos metales, aleaciones, vidrio, cerámica, etc.). Estos materiales al alcanzar su temperatura de transformación, presentan un cambio detectable en su volumen y en su longitud. Los métodos dilatométricos, son aplicados sólo para determinadas transformaciones de estado sólido, que ocurren muy por debajo de la temperatura de fusión. Cerca del punto de fusión, este método no se podrá usar con seguridad.

En general la medición dilatométrica es sencilla y la información obtenida de ésta es precisa, confiable y fácil de interpretar. Las reacciones secundarias que pueden presentarse en el material a causa de la presencia de impurezas, no causan errores considerables. Las características dilatométricas del metal están afectadas por la presencia de otros elementos pero es posible compensar las consecuencias que éstos causan.

Las características dilatométricas del metal o la aleación, son mejor observadas con el uso de un dilatómetro, que consiste en un dispositivo muy sensible que mide y amplifica a través de sistemas mecánicos y ópticos. Los cambios en longitud de una probeta, con dimensiones apropiadas, que varía su volumen, con la temperatura. Para que pueda ser registrada la transformación, la velocidad del cambio dimensional de una transformación de fase, debe ser relacionada con la temperatura a la que se presenta.

Se pueden adquirir comercialmente instrumentos de dilatometría, que indican los cambios dimensionales a través de sistemas combinados mecánicos y ópticos. El tipo mecánico registra la expansión y contracción de una muestra por un arreglo de palancas. Estos cambios son generalmente regis

trados fotográficamente, algunos dilatómetros son diseñados para poder observar las transformaciones de un metal durante su templeado.

1.4.1 DILATOMETROS DE TIPO MECANICO

El principio de operación del dilatómetro mecánico, es muy simple y se ilustra en la figura 1-22. La probeta S de investigación, está apoyada en la plataforma B, compuesta de una aleación que tiene un coeficiente lineal de expansión uniforme. Una barra de cuarzo R, está en contacto con la superficie superior de la probeta, su otro extremo acciona la palanca que acciona la aguja P, en dirección horizontal, trazando una curva en el papel de registro C. El papel está enrollado y se mueve a una velocidad constante. A medida que la probeta es calentada en el horno F, la aguja se rá movida por la palanca y se trazará una curva correspondiente a los cambios de longitud de S, el soporte B y la barra R.

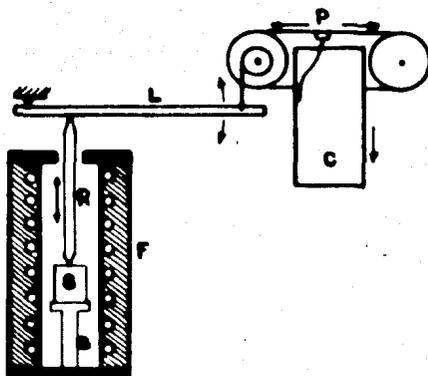


Figura 1-22 Esquema ilustrativo del funcionamiento de un dilatómetro mecánico.

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| B - Base | L - Palanca |
| C - Papel grafica
dor | P - Pluma graficadora |
| F - Horno eléctric
o | R - Barra de cuarzo |

El dilatómetro Bristol, es representativo de los instrumentos de tipo mecánico, y está diseñado para registrar automáticamente los cambios de temperatura-tiempo y temperatura-dilatación. El sistema para medir la dilatación, consiste en dos barras de cuarzo, una de ellas descansa directamente en la probeta de estudio, y la otra en la plataforma que sostiene a la probeta, dentro del horno. A través de un sistema de palancas de amplificación interrelacionadas, la expansión y contracción de la plataforma, y las partes del mecanismo que son afectadas por el calor, son compensadas de tal forma, que, el registro gráfico que se produce representa sólo las características dilatométricas de la probeta. Con ayuda de un termopar colocado cerca de la probeta, la temperatura de ésta es medida con un sistema de registro pironométrico, en la misma gráfica donde se registran las características de la curva dilatométrica. Este instrumento está diseñado para registrar la expansión y la contracción de una forma segura, cuando la probeta se está templando. Cuando se ha llegado a la temperatura de interés, se abre el horno dejando expuesta la probeta, la plataforma y la barra de cuarzo. Un tanque de templado se alza rápidamente para que la probeta quede dentro de él, realizándose así el templado.

Una curva típica de dilatación-temperatura y una curva de temperatura-tiempo, se registra durante la prueba, figura 1-23. Estas curvas representan las características de un acero SAE 1112, colocado en un horno a una temperatura de 1400°F, y enfriando dentro del horno hasta una temperatura de 250°F y después enfriando en el aire hasta aproximadamente 200°C. Como se indica en la curva de dilatación-temperatura, la muestra atraviesa por una marcada contracción a los 1250° F, que define la temperatura A_c1 relacionada a la velocidad de enfriamiento. Estas temperaturas de transformación causadas por el calentamiento y enfriamiento son mostradas de la misma forma por los cambios bruscos en las pendientes de la curva temperatura-tiempo de la gráfica.

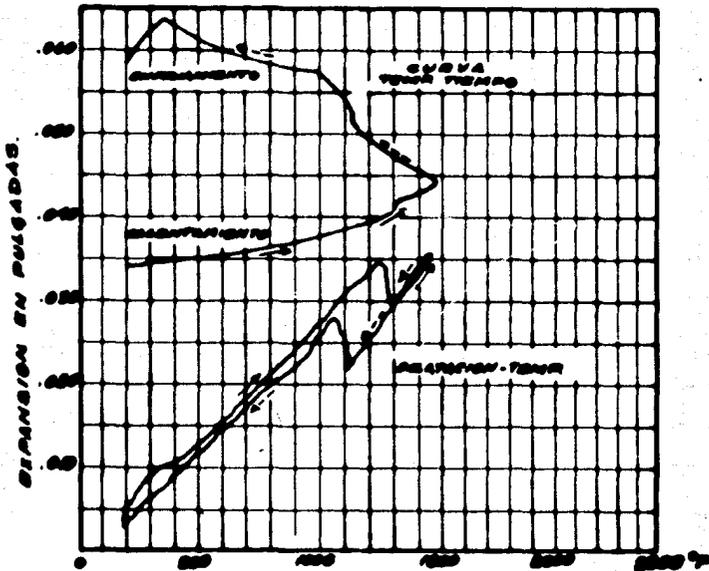


Figura 1-23 Gráfica de las características de expansión y contracción de un acero SAE 1112, calentado y enfriado desde una temperatura de 1450°F, utilizando un dilatómetro Bristol.

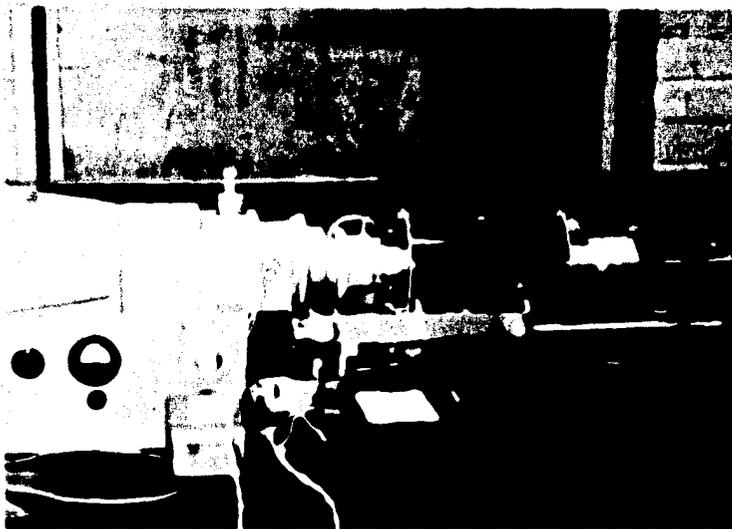


Figura 1-24 Dilatómetro Leitz con pantalla y dispositivo para montaje de papel foto sensible.

1.4.2 DIAGRAMAS T-T-T (Transformación-Tiempo-Temperatura)

Cuando se estudia el desarrollo de la transformación a temperatura constante, se observa que la velocidad de la transformación, en primer lugar, aumenta en función del tiempo y disminuye asintóticamente al cero. Cuando se representa el grado de transformación, o sea, el porcentaje de austenita transformada en una escala logarítmica para el tiempo, se obtiene una curva conocida como curva "S", el resultado global de todas estas curvas para temperaturas diferentes, se puede dar en un solo diagrama o sea el diagrama T-T-T, (transformación-temperatura-tiempo), el tiempo se dará siempre en una escala logarítmica y los puntos del comienzo y del fin de todas las transformaciones isotérmicas determina las curvas del inicio a la izquierda y final a la derecha de la transformación, figura 1-25.

Con la ayuda de los diagramas T-T-T, es posible clasificar sistemáticamente los constituyentes de endurecimiento y distinguir las diferencias entre los mecanismos de transformación.

A partir de una serie de curvas de reacción isotérmicas determinadas a cierto número de temperaturas, se puede obtener información de naturaleza muy importante y práctica.

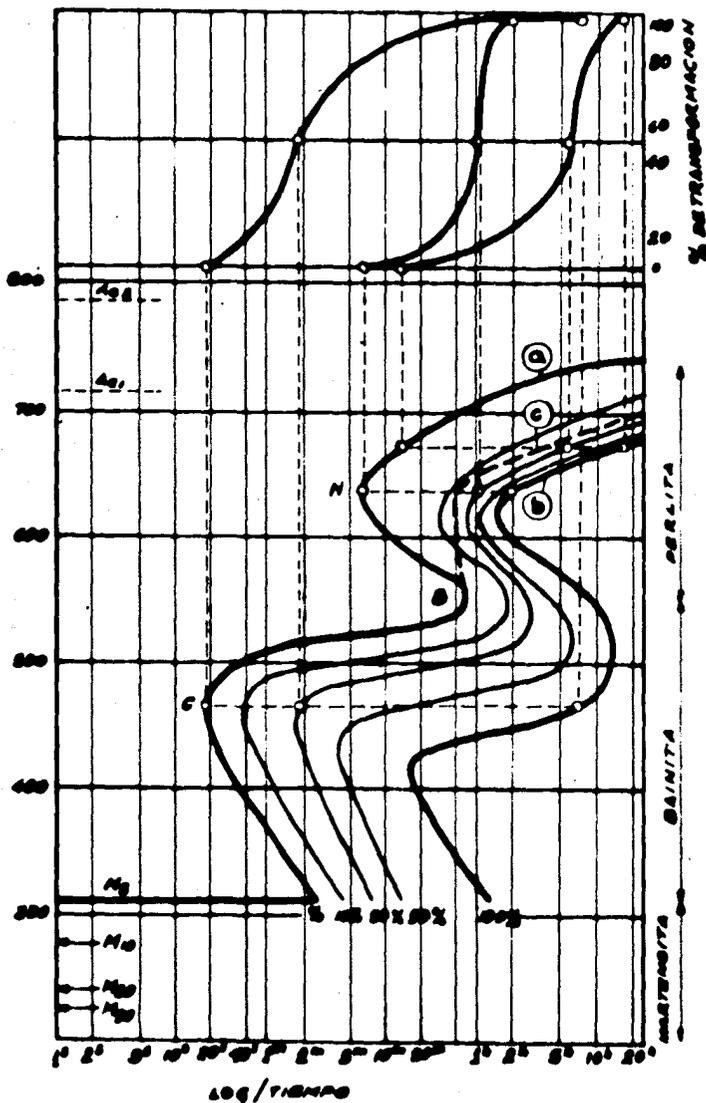


Figura 1-25 Diagrama T-T-T de un acero de ligera aleación (C:40; Mn:1.38; Ni:0.74; Cr:0.53; Mo:0.16). a=comienzo de la transformación, c=línea de carburos, b=fin de la transformación.

Si consideramos la curva teórica de la figura 1-26, se obtienen duplicados experimentales de estas curvas, haciendo reaccionar cierto número de probetas durante períodos de tiempo diferentes y determinando la fracción del producto de la transformación en cada probeta. Una gráfica de estos datos, como una función del tiempo, se representa en la figura 1-27.

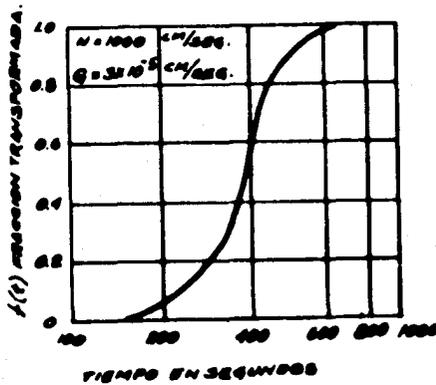


Figura 1-26 Curva de reacción teórica obtenida de la ecuación de Johnson y Mehl.

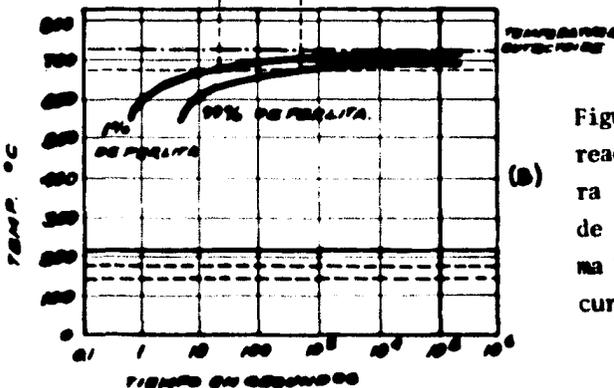


Figura 1-27 (A) Curva de reacción (esquemática) para la formación isotérmica de la perlita. (B) Diagrama T-T-T obtenido de las curvas de reacción.

Si tomamos de esta curva de reacción el tiempo requerido para comenzar la transformación y el tiempo necesario para completar la misma, observando el tiempo requerido para obtener una cantidad limitada del producto de la transformación, usualmente 1%, correspondiente al inicio de la transformación. Se toma arbitrariamente el final de la transformación como el tiempo para transformar 99% de austenita a perlita. Una gráfica de estos datos para una serie de temperaturas da la figura 1-28.



Figura 1-28 Diagrama de transformación isotérmica, parcial, para un acero eutectoide: 0.79% carbono, 0.76% manganeso.

El diagrama T-T-T, de esta figura, corresponde solamente a la reacción de la austenita a perlita. No es completo en el sentido de que las transformación de la austenita que ocurre por debajo de 500°C, no se muestran. Para completar este estudio, es necesario considerar otros dos tipos de reacciones austeníticas: Austenita-bainita y austenita-martensita.

1.4.3 MÉTODOS PARA LA DETERMINACION DE LA CURVA "S" Y DIAGRAMAS T-T-T

Método basado en una variación física del material.

La transformación γ - α origina un cambio en la red cristalina, acompañado de una variación importante en las propiedades físicas del acero, particularmente cambio de volumen específico, coeficiente de dilatación, magnetismo y resistividad eléctrica.

El estudio de las variaciones que origina cualquiera de estas propiedades en el curso de un temple isotérmico, permite estudiar y determinar las curvas "S", el principio del método consiste en austenizar correctamente la probeta y templearla rápidamente en un baño caliente, a una temperatura estipulada.

Durante la transformación que experimenta la probeta en el enfriamiento controlado, son estudiados los cambios de las propiedades físicas de el acero.

Determinación de la curva por el Método Metalográfico.

El método estudiado por Bain y Davenport, es uno de los que más información se puede obtener. Consiste en austenizar correctamente pequeñas probetas e introducir las en un baño caliente de sales o metales fundidos a temperaturas desde los 720°C, hasta la temperatura ambiente.

Estas probetas son mantenidas en el baño caliente a temperatura constante, siendo retiradas una a una, a intervalos sucesivos de tiempo y enfriamiento, éste es ejecutado rápidamente en agua bien fría. El examen microscópico, permite definir el principio y el fin de la transformación de la estructura correspondiente a cada temperatura y tiempo de permanencia en sayadas. Dado el rápido enfriamiento de la probeta, la austenita que aún no había sido transformada se convierte en martensita, los constituyentes

que formaron la temperatura elevada y en el curso del tiempo de permanencia isotérmica corresponden en cierto porcentaje de austenita quedando fijada gracias al rápido enfriamiento, en el mismo estado en que se encontraban cuando fueron retirados del baño isotérmico. Por este método metalográfico se puede poner en evidencia la aparición de nuevos constituyentes estructurales. Los puntos correspondientes a cada temperatura, tiempo y transformación, son llevados sobre un diagrama, marcando las distintas fases de transformación.

1.4.4 INTERPRETACION Y APLICACION PRACTICA DE LOS DIAGRAMAS T-T-T

El estudio de los tratamientos térmicos dio un paso decisivo, gracias a ciertos pioneros de la metalografía, tales como: TCHENOFF, OSMOND, LE CHATELIER, GJELLET, MARTENS, BALIER, SANVEUR, y otros, en la época actual, tales como PORTEVIR Y CHEVERNARD. Por el año de 1930, la investigación de Bain, separó la acción de dos factores, tiempo y temperatura, en el curso de la transformación, con la aplicación de los tratamientos isotérmicos. El método se ha estudiado anteriormente y como hemos podido apreciar, los resultados se representan por una curva en forma de S sobre un diagrama de temperatura-logaritmo de tiempo.

En la figura 1-29, el diagrama representa la cantidad de austenita transformada en el curso de un mantenimiento isotérmico a 600°C. La curva de trazo continuado a la izquierda, corresponde al inicio de la transformación de la austenita.

la curva de trazo discontinuo corresponde al 50% de la transformación y la segunda curva de trazo también continuado, indica el fin de la transformación.

Los puntos Ac_3 y Ac_1 , corresponden a la zona de dominio de las altas temperaturas.

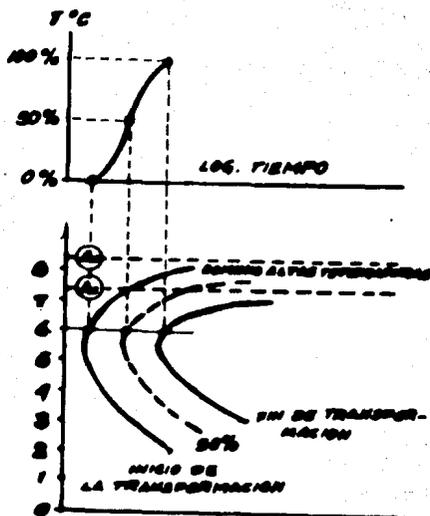


Figura 1-29

El punto Ac_3 , corresponde al de temperaturas de equilibrio de la fase alfa.

Estos puntos son determinados por el método dilatométrico, con una velocidad de calentamiento de 150°C , por hora.

En la figura 1-30, los puntos Ar_1 - Ar_2 - Ar_3 , corresponden a las temperaturas de transformación isotérmicas.

El punto Ar_1 , corresponde al del dominio de las estructuras perlticas.

El punto Ar_2 , corresponde al del dominio de las estructuras aciculares o bainfíticas.

El punto Ar_3 , corresponde al del dominio de las estructuras martem

síticas. En este punto quedan establecidos los puntos Ms y Mf, que señalan el dominio de las bajas temperaturas de transformación.

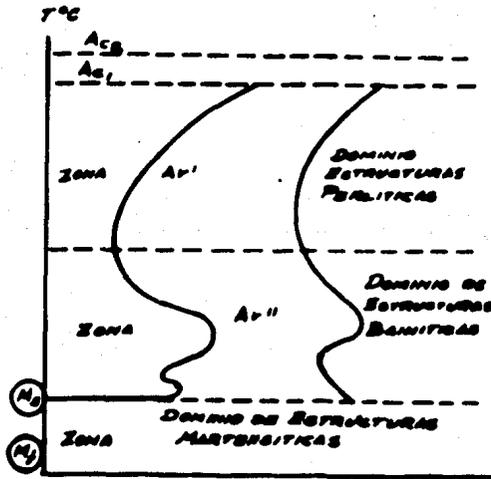


Figura 1-30

La figura 1-31, representa, de una forma esquemática, los distintos dominios de la austenita y su transformación.

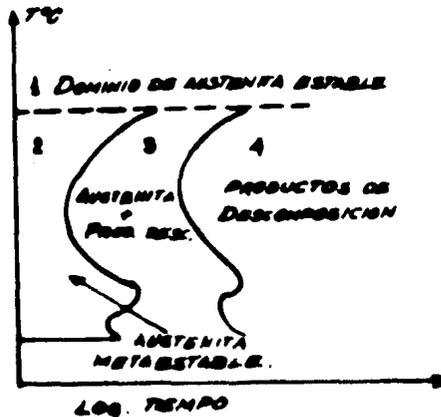


Figura 1-31

- 1.- Dominio de la austenita estable
- 2.- Zona donde domina la austenita metastable
- 3.- Dominio austenítico + productos de descomposición de la misma
- 4.- Productos de descomposición de la austenita.

A medida que las temperaturas decrecen, la transformación pasa progresivamente del tipo perlítico, a la de tipo bainítico, ya que la zona correspondiente a la formación ferrita disminuye.

La figura 1-32, representa los distintos constituyentes, productos de la descomposición de la austenita.

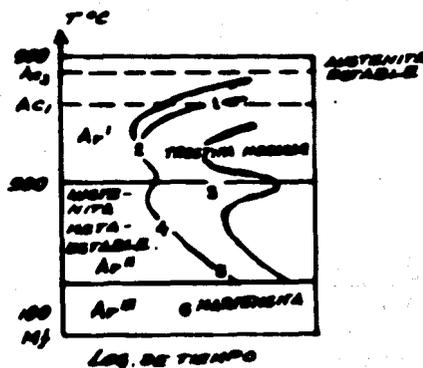


Figura 1-32

En el punto Ar₁, encontramos perlita y troosita nodular. (1), (2).

En el punto Ar₂, encontramos la austenita transformada en bainita denominada: Superior-Intermedia e Inferior (3), (4) y (5).

El punto Ar₃, (comprendiendo los puntos Ms y Mf), la austenita se ha transformado casi en su totalidad en martensita.

La zona de dominio de la austenita metastable (situada a la izquierda del diagrama), marca donde la austenita está en constante susceptibilidad de ser transformada.

La figura 1-33, representa los diagramas de modificación de la curva. La forma de la curva de la S, depende en primer lugar, de la composición química del acero.

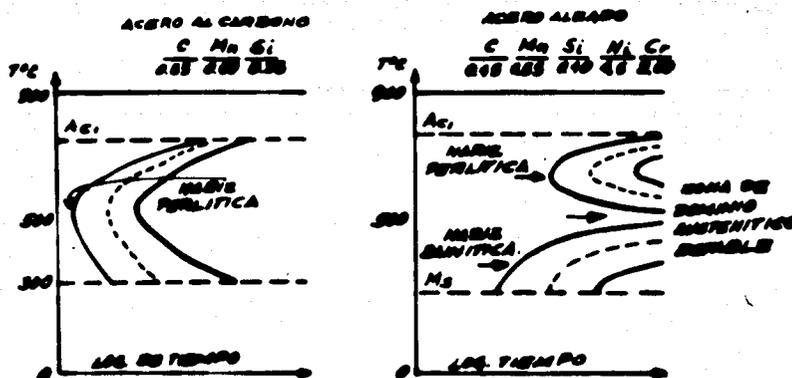


Figura 1-33

Los elementos de aleación desvían la curva hacia la derecha (a excepción del cobalto), y generalmente esta acción es más acusada cuando los porcentajes de los elementos de aleación son más elevados.

Los elementos de aleación que tienden a la formación de carburos, sabemos que son el Cr, Mo, W, Va, Ti, etc. Estos, como hemos visto, desplazan la curva de la derecha, haciendo aparecer las dos narices: la perlita y la bainita, separándolas una zona denominada por la estabilidad de la austenita, que juega un factor muy importante.

La posición de la curva T-T-T, da, pues, una idea de la templabilidad de un acero, siendo esta más elevada, cuando más se sitúe a la derecha.

En la curva representada, en la figura 1-34, encontramos unas líneas de trazos intermitentes complementarias; estas marcan la aparición de constituyentes micrográficos nuevos en el mismo curso de la transformación.

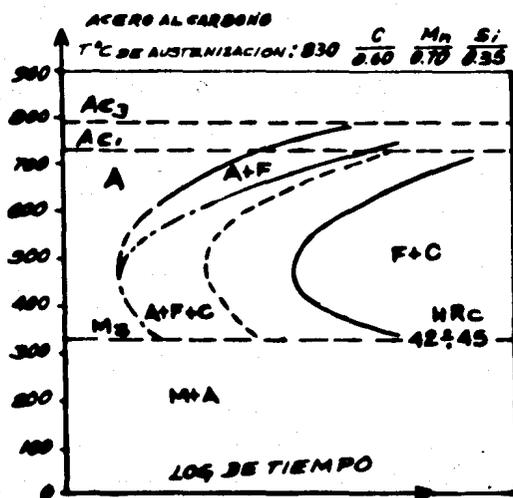


Figura 1-34

La figura 1-35, corresponde a la curva de un acero aleado, de la siguiente composición química:

C	Mn	Si	Cr	Mn
0.45	0.55	1.31	0.60	0.22

y una austenización a 900°C.

Vemos que para este tipo de acero, los dos dominios, perlítico y bainítico, están separados por una zona de estabilidad de la austenita, altamente marcada entre los 500 y 550°C.

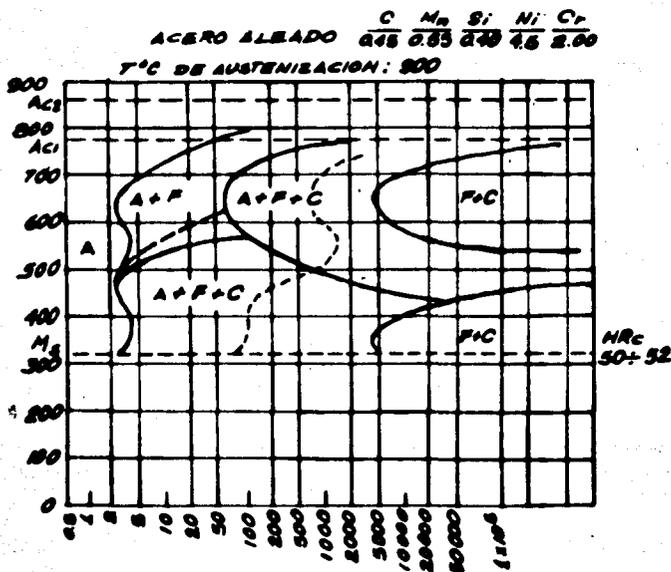


Figura 1-35

Las cantidades de ferrita pro-perlítica y de ferrita-pro-bainítica disminuyen en función de la temperatura; a 500°C, la transformación empieza con la formación directa de la bainita, siendo que al cabo de 15 minutos, la austenita transformada sobrepasa el 50% apareciendo las primeras placas de carburos de tipo perlítico.

Estas placas ya no aparecen más, cuando las temperaturas son inferiores a los 460-450°C, dando nacimiento a los constituyentes de tipo bainítico a partir de este punto, únicamente en la transformación.

Por el contrario, a elevadas temperaturas, los constituyentes formados, son únicamente del tipo perlítico (ferrita pro-perlítica y perlita).

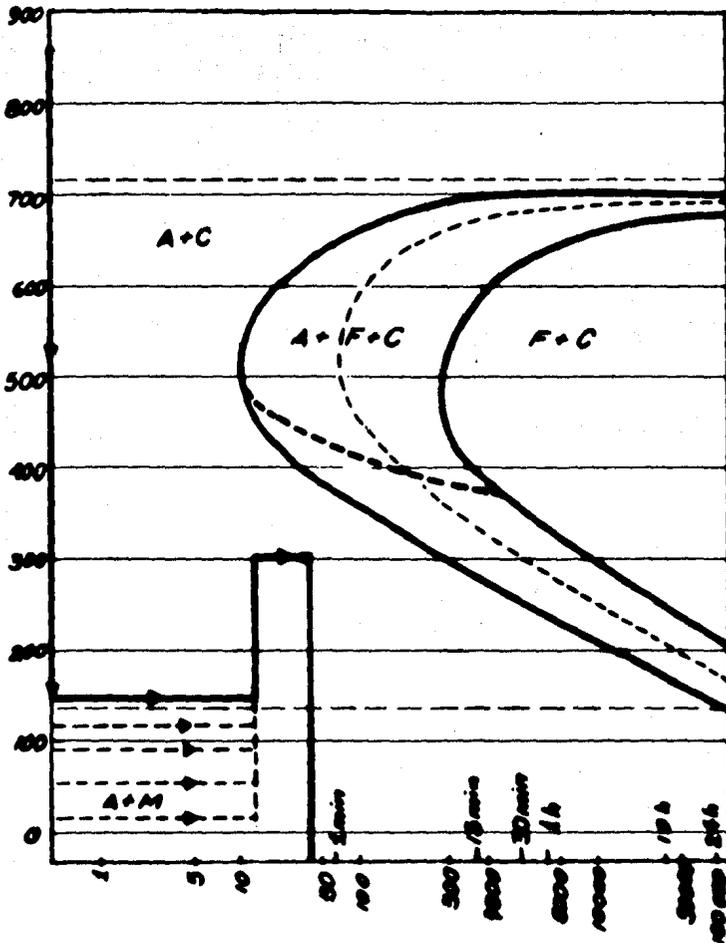


Figura 1-36 Representación esquemática de los tratamientos realizados durante el curso del estudio de la transformación martensítica por el método de Greninger y Troiano.

C A P I T U L O I I - DISEÑO DEL DILATOMETRO

2.1 INTRODUCCION

El equipo de dilatometría será utilizado en el laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería; en el que se efectuarán pruebas y prácticas de tipo didáctico.

Uno de los objetivos de este trabajo, ha sido realizar un diseño sencillo, cuyo funcionamiento y operación, no resulte complicado para los estudiantes; de fácil construcción y de bajo costo.

Sin embargo, se ha tomado especial cuidado, en que el equipo tenga la calidad necesaria, sobre todo en la parte correspondiente al horno y sistema de medición, para que las pruebas y datos que se obtengan, sean lo suficientemente exactas para ilustrar, de una forma práctica, los conceptos de la dilatometría y utilizar la información obtenida de las mediciones para el estudio de las transformaciones en Materiales Metálicos.

El diseño del dilatómetro está dividido en tres partes:

- 1.- Diseño de Horno Eléctrico
 Control de Temperatura
- 2.- Diseño de Sistema de Medición
 Sistema Mecánico
 Sistema Optico
- 3.- Diseño de Conjunto
 Estructura
 Sistemas Auxiliares

2.2 DISEÑO DEL HORNO ELECTRICO

El propósito de este horno, es el de calentar una probeta de material metálico, cuyas dimensiones son alrededor de 20 mm. de largo y 3 mm. Ø

la temperatura de operación será de 20° a 1000°C.

El horno debe tener un desplazamiento hacia arriba y abajo para permitir que el punto de la barra de cuarzo, en donde se coloca la probeta de estudio, quede libre. Una vez que la probeta ha sido colocada, el horno no debe subir para iniciar el calentamiento. Además, el horno necesita estar montado sobre una estructura móvil, que permita un desplazamiento lateral para que el lugar del horno eléctrico, sea ocupado por un horno de baño de sales o algún otro dispositivo de enfriamiento o templado.

Las condiciones de trabajo anteriores, hacen que el horno sea diseñado de tal forma, que su peso y dimensiones sean lo más reducido posible.

Una forma sencilla de construir el horno es el que se muestra en la figura 2-1. Consiste en una cámara de calentamiento formada por un tubo de cerámica alrededor de la cual se encuentra el elemento calentador. Este elemento a su vez, está rodeado de material refractario y aislantes.

2.2.1 PERDIDA DE CALOR

Ya que la temperatura de la cámara de calentamiento es bastante elevada, se requiere colocar una capa de material refractario, que resista una temperatura de 1000°C.

Existen en el mercado varios tipos de refractarios, que se presentan en diferentes formas (ladrillos, concretos, polvos, etc.), y aplicaciones.

La forma más sencilla de colocar una capa de refractario, es utilizando un material de tipo concreto aislante, ya que su aplicación no requiere de equipo especial.

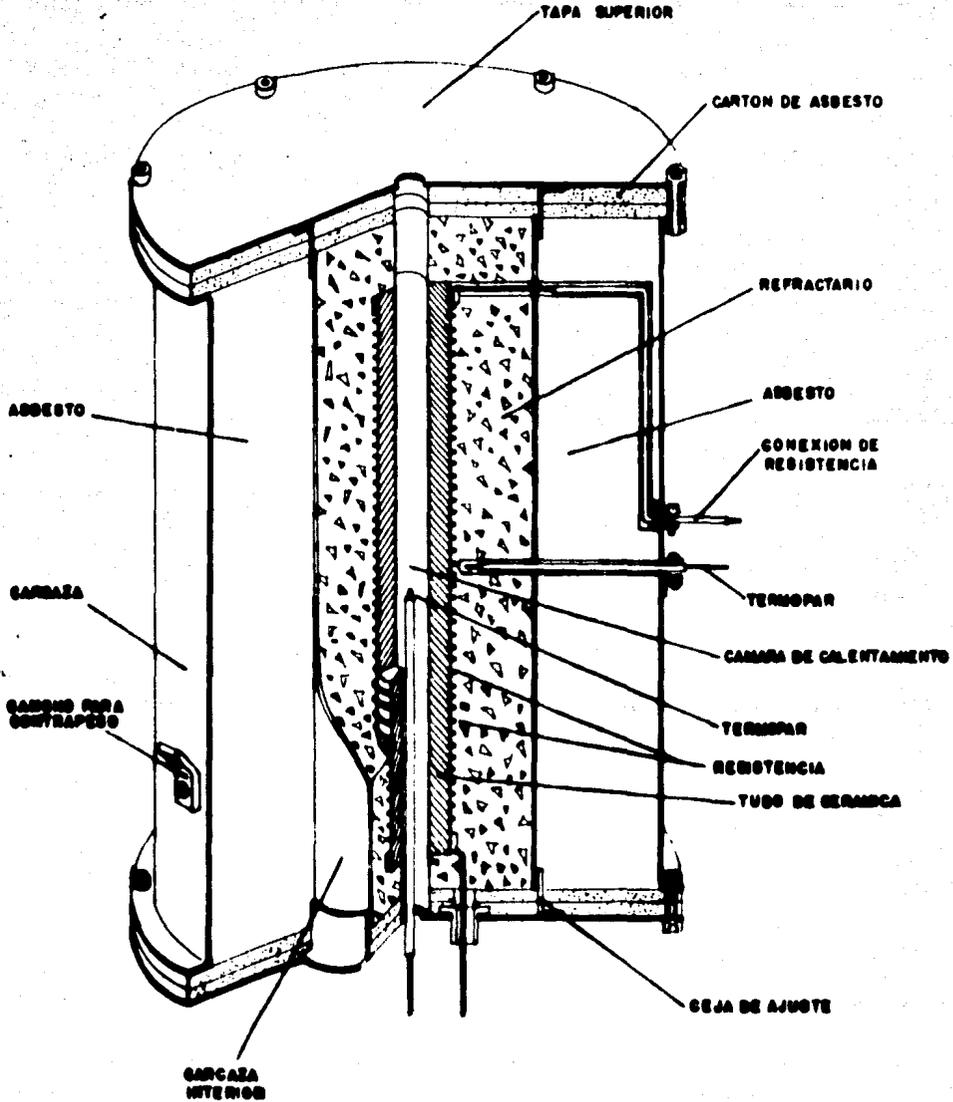


Figura 2-1 Croquis que muestra los componentes del horno.

La marca Plfbrico, fabrica concretos aislantes tipos Plicast que resultan muy adecuados a las condiciones de trabajo y diseño para hornos de laboratorio.

Tabla 2-1

Concretos Aislantes Plicast					
TIPO	Temp/max	RANGO		Peso/m ³	FRAGUADO
Plicast LNI-26	1432°C	93-1415°C	55-36	1328 kgs.	hidráulico
Plicast LNI-24	1350°C	93-1330°C	39-39	1200 kgs.	hidráulico
Plicast LNI-20	1093°C	93-1085°C		917 kgs.	hidráulico
Plicast Tuff-Lite	1430°C	93-1315°C	39-39	1280 kgs.	hidráulico
Plicast Verilite	816-982°C	93- 975°C	15-36	640 kgs.	hidráulico
Plicast Air-Lite	980°C	93- 980°C		320 kgs.	hidráulico

Se ha seleccionado el Plicast LNI-20, ya que es el material que más se adapta a las condiciones de trabajo y además tiene una baja capacidad de transmisión de calor y baja densidad.

Es conveniente combinar el material refractario con algún otro tipo de aislante, que tenga una conductividad térmica baja. Para que el diámetro exterior del horno pueda ser menor, un material adecuado es el asbesto en polvo.

Para efecto de calcular la pérdida de calor del horno, se ha idealizado como un cilindro hueco de paredes compuestas.

La cámara de calentamiento está formada por un tubo de cerámica, con un diámetro interior de 1.37 cm. y la carcasa metálica será de acero (lámina #22), con una conductividad térmica de $K_{\text{acero}} = 22 \text{ BTU/HR}^\circ\text{F ft.}$ La cerámica y el acero no afectan considerablemente la pérdida de calor, por lo que no han sido incluidos en el cálculo. La conductancia de superficie

unitaria en la cámara de calentamiento y en el exterior son $h_i = 30 \text{ BTU/HR}^\circ \text{F ft}^2$ y $h_o = 1.5 \text{ BTU/HR ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$, respectivamente.

DATOS PARA EL DISEÑO:

Longitud del Horno	$l = 27 \text{ cm.}$	$= 0.89 \text{ pies}$
Radio de la cámara	$r_c = 1.37 \text{ cm.}$	$= 0.045 \text{ pies}$
Radio Exterior	$r_a = 10 \text{ cm.}$	$= 0.33 \text{ pies}$
Temperatura de la cámara	$T_i = 1000^\circ\text{C}$	$= 1832^\circ\text{F}$
Temperatura exterior	$T_o = 21^\circ\text{C}$	$= 70^\circ\text{F}$
Conductividad térmica del refractario	$K_r = 1.04$	$\text{BTU/HR}^\circ\text{F ft}$
Conductividad térmica del asbesto	$K_a = 0.13$	$\text{BTU/HR}^\circ\text{F ft}$

LA PERDIDA DE CALOR ES:

$$q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2 r_c h_i} + \frac{\ln(r_R/r_c)}{2 K_R l} + \frac{\ln(r_a/r_R)}{2 K_a l} + \frac{1}{2 r_a h_o}}$$

$$q = \frac{1832 - 70}{\frac{1}{7.54} + \frac{\ln(3.55)}{5.81} + \frac{\ln(2.06)}{0.72} + \frac{1}{3.11}}$$

$$q = \frac{1762}{0.13 + 0.21 + 0.32} = \frac{1762}{1.66}$$

$$q = 1050 \text{ BTU/HR}$$

COEFICIENTE DE AREA ES

$$A_o = 2 \pi r l$$

SELECCIONANADO EL RADIO EXTERIOR

$$A_o = 2 \pi (10) 27$$

$$A_o = 1696 \text{ cm.}^2$$

A la pérdida de calor es necesario agregarle la pérdida de calor correspondiente a las tapas superior e inferior del horno que representan a proximadamente el 10% de la superficie exterior.

$$q_{\text{total}} = 1060 + 106 = 1166 \text{ BTU/HR}$$

2.2.2 ELEMENTO CALENTADOR

Será necesario diseñar un elemento calentador, que colocado en forma de bobina, a lo largo del tubo de cerámica que forma la cámara de calentamiento, proporcione una potencia equivalente a la pérdida de calor del Horno (1160 BTU/HR) 340 watts. Aplicando un factor de seguridad de un 5%, el elemento calentador debe estar diseñado para una potencia de 360 watts.

La vida del elemento calentador depende de las condiciones de trabajo, tales como atmósfera, radiación, oxidación, calidad y diseño de soportes, etc., por lo que es muy importante seleccionar un material y un diámetro adecuado al uso que tendrá el equipo, sobre todo, cuando la temperatura de operación es elevada.

Los fabricantes de resistencias, recomiendan usar un diámetro de alambre no menor de 1.5 mm. Para hornos de alta temperatura, es imperativo usar alambre grueso, ya que la vida del elemento está en proporción al diámetro.

Las siguientes tablas muestran el diámetro recomendable para operación a diferentes temperaturas de varias aleaciones.

Tabla 2-2

Calidad	Diámetro Recomendable ϕ mm.					
	0.15-0.4	0.41-0.95	1.0-3.0	3	3.10-6	6
	ϕ C	ϕ C	ϕ C	ϕ C	ϕ C	ϕ C
KANTHAL A-1	925-1050	1050-1175	1225-1350	1375		
KANTHAL A	925-1050	1050-1175	1175-1300	1330		
KANTHAL DSD	925-1025	1025-1100	1000-1200	1280		
KANTHAL DS1	-	-	1100-1150	1150		
NICROTHAL 80	925-1000	1000-1075	1075-1150	-	1150-1120	1200
NICROTHAL 60	900- 950	950-1000	1000-1075	-	1075-1125	1125
NICROTHAL 40	900- 950	950-1000	1000-1050	-	1050-1100	1100
NICROTHAL 20	875- 925	925- 975	975-1025	-	1025-1050	1050

Otro factor importante en el diseño del elemento de calefacción y selección de la resistencia, es la carga de superficie. A continuación se muestran los valores de la carga de superficie para diferentes temperaturas de operación.

Tabla 2-3

TEMPERATURA MAXIMA DEL HORNO	CARGA EN LA SUPERFICIE PARA ALAMBRES KANTHAL W/CM^2
870°C	3.0
930°C	2.7
980°C	2.3
1040°C	1.9
1090°C	1.6
1150°C	1.4
1200°C	1.3
1250°C	1.2

La resistencia deberá estar diseñada para que la carga de la superficie no exceda los límites recomendables, tomando como valor de carga en la superficie = 1.25 W/cm^2 . El diámetro del alambre a utilizar es:

$$N = \pi X d X 100$$

$$M = \frac{P}{\pi X d X \Gamma}$$

$$I = (D+d) \pi X w$$

$$w = \frac{L}{2d} = \frac{L}{s/d \cdot d}$$

$$I = \frac{(D+d) \pi w}{2d}$$

$$d = \frac{P}{\pi U \left[\frac{D+d \pi X L}{2d} \right]}$$

$$d = \frac{2d (P)}{\pi^2 \delta (D+d) L}$$

DONDE N = superficie/metro cm^2
 U = superficie total de carga w/cm^2
 I = longitud de resistencia cm
 P = potencia en watts
 L = longitud disponible para la espiral
 w = número de espiras
 D = diámetro de la espiral
 d = diámetro del alambre
 s/d = relación de paso entre espiras

$$d = \frac{2 P}{\pi^2 U L} \cdot D$$

$$d = \frac{2 (360)}{2 (1.25) L} \cdot D = \frac{720}{2.48} \cdot 2.75$$

$$d = 2.90 - 2.75 = 0.15 \text{ cm} = 1.5 \text{ mm.}$$

En base a este cálculo se selecciona un alambre con diámetro igual o similar.

Utilizando un alambre Kanthal A-1 de 1.5 mm. ϕ se tendrá una longitud de

$$I = D + d \pi w$$

con un valor de $L = 21$ cm.

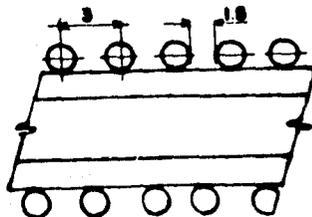
El fabricante recomienda una relación de separación entre espiras de $s/d = 2$

$$I = \frac{(D+d) \pi L}{2 d} = \frac{(2.75 + 0.15) \pi (21)}{2 (0.15)} = \frac{191.32}{2(0.15)}$$

$$I = 6.37 \text{ mts.}$$

y tendrá

$$w = \frac{L}{s/d \cdot d} = \frac{21}{2(0.15)} = \frac{21}{0.30} = 70 \text{ espiras que se colocarán como se muestra en la figura}$$



Temperatura máxima de operación 1375°C

Resistividad a 20°C 1.45 Ω mm²/m

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1350	1375
C _e	1000	1000	1001	1002	1005	1010	1017	1023	1028	1032	1036	1038	1040	1042	1043	1044

Ø mm.	/m 20°C	cm ² /m	m/kg	g/m	/kg	cm ² / 20°C
2.40	0.3205	75.40	31.13	32.12	9.979	235.2
2.30	0.3490	72.26	33.90	29.50	11.83	207.1
2.20	0.3815	69.12	37.05	26.99	14.13	181.2
2.10	0.4186	65.97	40.66	24.59	17.02	157.6
2.00	0.4616	62.83	44.83	22.31	20.69	136.1
1.90	0.5114	59.69	49.68	20.13	25.41	116.7
1.80	0.5698	56.55	55.35	18.07	31.54	99.24
1.70	0.6388	53.41	62.05	16.12	39.64	83.86
1.60	0.7212	50.27	70.05	14.28	50.52	69.70
1.50	0.8205	47.12	79.70	12.55	65.40	57.43
1.40	0.9419	43.98	91.49	10.93	86.17	46.69
1.30	1.092	40.84	106.1	9.424	115.9	37.39
1.25	1.182	39.27	114.8	8.713	135.7	33.24
1.20	1.282	37.70	124.5	8.030	159.6	29.40
1.15	1.396	36.13	135.6	7.375	189.3	25.88
1.10	1.526	34.56	148.2	6.747	226.1	22.65
1.05	1.675	32.99	162.7	6.148	272.4	19.70
1.00	1.846	31.42	179.3	5.576	331.1	17.02

De la tabla 2-4 de Kanthal A-1, para alambre de 1.5 mm, de diámetro podemos obtener los valores de resistividad $0.8205 \Omega/\text{m}$ y calcular la resistencia total que es:

$$R_t = 0.8205 \Omega/\text{m} \times 6.37 \text{ m}$$

$$R_t = 5.22 \Omega$$

Revisando ahora la carga de superficie con los valores de tablas se tiene que:

$$6.37 \text{ m} \times 47.12 \text{ cm}^2/\text{m} = 300 \text{ cm}^2$$

Como se desea obtener una potencia de 360 w en el elemento calentador la carga de superficie es de

$$U = \frac{360 \text{ W}}{300 \text{ cm}^2}$$

$$U = 1.2 \text{ w/cm}^2$$

Lo que indica que el elemento calentador estará trabajando dentro de los límites de seguridad.

2.2.3 CIRCUITO DE LA RESISTENCIA

Resistencia en caliente

$$R_t = \frac{V^2}{P}$$

$$t = 1000^\circ\text{C}$$

$$C_t = 1000^\circ\text{C} = 1,036$$

Resistencia en frío

$$R_t = \frac{120^2}{360} = 40 \Omega$$

$$R_{20} = \frac{40}{1.036} = 38.6 \Omega$$

$$\frac{\text{cm}^2}{\Omega \cdot 20^\circ} = \frac{360}{38.6 (1.2)} = \frac{360}{46.32} = 7.77$$

Si utilizamos 120 v. en el circuito, se tendrá que usar un diámetro de alambre muy pequeño que no resultaría adecuado, así tenemos que reducir el voltaje en el circuito para utilizar un alambre adecuado para una temperatura entre 100-1250°C.

$$\text{Voltaje: } E = \sqrt{P \times R_t}$$

$$E = \sqrt{360 \times 5.22}$$

$$E = \sqrt{1.879.2}$$

$$E = 43.35 \text{ volts}$$

Haciendo ahora la revisión para un voltaje = 43.35 volts.

$$R_t = 1000^\circ\text{C} = \frac{E^2}{P} = \frac{1879.2}{360}$$

$$R_t = 5.22 \Omega$$

$$R_{20} = \frac{R_t}{C_t} = \frac{5.22}{1.036} = 5.038$$

$$\frac{\text{cm}^2}{\Omega \cdot 20^\circ} = \frac{P}{p \cdot R_{20}} = \frac{360}{1.2 (5.038)} = 59.60$$

El valor más cercano en la columna cm^2/Ω 20°C de la tabla 2-4 es 57.43 que corresponde al alambre de $\phi = 1.5\text{mm}$.

Para reducir el voltaje en el circuito de la resistencia a 43V, es necesario reducir el voltaje de la línea (120V), esto se puede lograr conectando en serie con la resistencia un "triac". Con este dispositivo es posible graduar el voltaje que pasa por la resistencia consiguiendo así tener diferentes potencias en el elemento calentador. Esto permite regular la velocidad de calentamiento de la cámara.

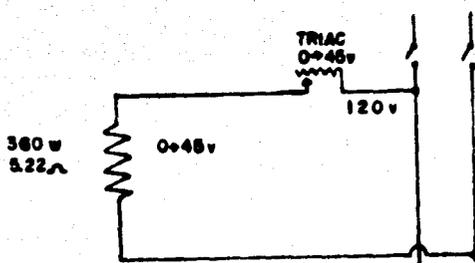


Figura 2-2 Circuito de la Resistencia

2.2.4 CONTROL DE TEMPERATURA

Para efecto de controlar la temperatura se utilizará un pirómetro marca West, tipo J. Este pirómetro está provisto de un indicador de la temperatura registrada por el termopar que se encuentra en la cámara de calentamiento. También consta de una aguja graduable con la que es posible fijar una temperatura. Así cuando la aguja del termopar alcanza la temperatura deseada, el circuito de la resistencia quedará cortado por el relevador del pirómetro. Cuando la temperatura descienda, el relevador conectará el circuito nuevamente, dejando pasar corriente a la resistencia.

2.2.5 CIRCUITO ELECTRICO DEL HORNO

Se ha diseñado el equipo para funcionamiento a 120 V, ya que el su ministro en la mayoría de las instalaciones es de este tipo.

Ya que los pirómetros son equipos delicados y de alto costo, no es conveniente conectar el circuito de la resistencia directamente con los re levadores de los pirómetros. Por lo que es conveniente incluir relevadores de protección.

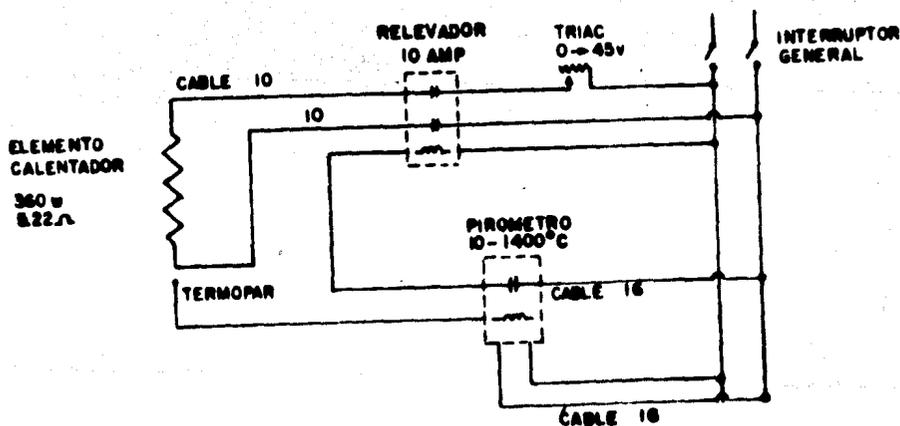


Figura 2-3 Circuito del horno eléctrico y control de temperatura.

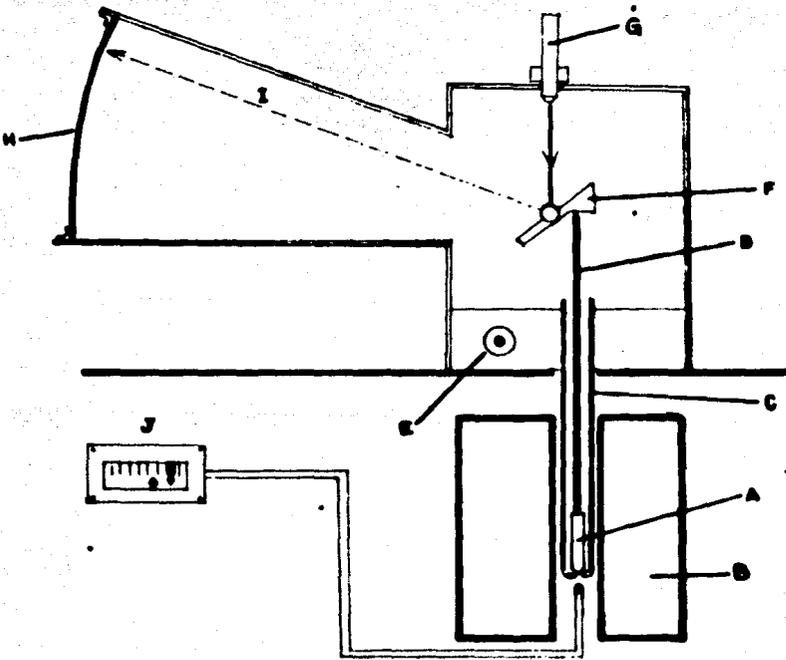


Figura 2-3 Croquis de funcionamiento y partes del dilatómetro.

2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICION

2.3.1 SISTEMA MECANICO

La probeta metálica, al ser calentada, sufre un aumento de su longitud. Esta deformación varía de acuerdo al coeficiente de dilatación de cada metal.

Existen dilatómetros con diferentes tipos de sistemas de medición y registro de las transformaciones que sufre un metal.

Generalmente se utilizan sistemas combinados, que amplifican la medida de la deformación, para que sea posible leerla a simple vista.

Una forma sencilla de obtener una amplificación considerable, es combinado un sistema mecánico de palanca y ajuste con un rayo luminoso, que al ser reflejada en un espejo y proyectado en una pantalla, amplifica la medición de las deformaciones en la probeta.

En la figura 2-4, se muestra el principio del funcionamiento del sistema de medición mecánico-óptico del dilatómetro.

La probeta de estudio (A), es colocada dentro de un tubo de cuarzo (C). Al calentar la probeta con el horno (B), la probeta sufre una deformación en su longitud, que es transmitida por la barra de cuarzo (D). La palanca (F), que en su superficie superior tiene un espejo, gira haciendo que el rayo luminoso (I), emitido por el proyector (G), se refleje en diferentes puntos de la pantalla graduada (H). La relación entre la distancia del punto de apoyo de la barra de cuarzo y la pantalla al eje de la palanca dan como resultado una amplificación de la deformación en la probeta de estudio. El pirómetro (J), registra la temperatura en la cámara del horno. La manivela de ajuste (E), posiciona el rayo luminoso en el cero de la escala al inicio de la prueba.

2.3.2 MECANISMO DE AJUSTE. TREN DE ENGRANES

Las dimensiones de las probetas metálicas son aproximadamente de 20 mm. de largo y 3 mm ϕ , pero como es difícil lograr que todas las probetas sean de la misma longitud, es necesario diseñar un sistema de ajuste que compense las diferencias dimensionales de las probetas de estudio.

Ya que los movimientos del mecanismo de ajuste son registrados en la pantalla y tienen por objeto proyectar el rayo luminoso a un determinado punto de la pantalla, es necesario que el ajuste sea lo suficientemente fino y preciso.

Este ajuste es posible lograrlo instalando un mecanismo similar al que se utiliza en los microscopios para afocar la imagen.

El tubo de cuarzo que contiene la probeta de estudio, se montará sobre una pieza (elevador) que tiene movimiento ascendente y descendente. Por medio de un tren de engranes.

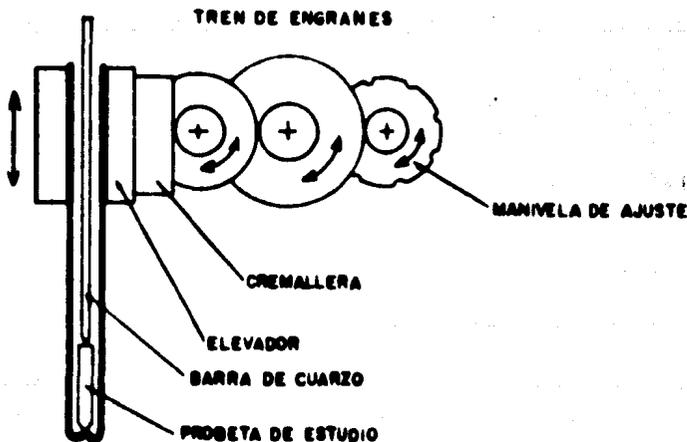


Figura 2-5 Croquis del funcionamiento del sistema de ajuste.

Se requiere que el elevador tenga un desplazamiento no mayor de 1 cm., esto es suficiente para compensar las diferencias de longitud en las probetas.

Se estima que el ajuste fino, debe ser como mínimo de una vuelta de la manivela de ajuste por 1 mm. de desplazamiento del elevador.

Para transmitir movimiento, se utilizan engranes de envolvente 20° y se recomienda que el número de dientes para cada engrane no sea menor de 12.

Número de dientes.

La relación del número de dientes del sistema para que dando una vuelta a la manivela, el elevador se desplace únicamente 1 mm. es de

$$x = \frac{\left[\frac{N_3}{N_4} \frac{N_1}{N_2} \right] V_1 N}{N_c} \quad 5$$

$$N_5 = N_3 = N_1 = 12 \text{ dientes}$$

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

$$V_2 = V_3$$

$$N_2 > N_4$$

$$N_3 V_3 = N_4 V_4$$

$$N_c = 6.889 \text{ dientes / cm.}$$

$$V_4 = V_5$$

$$V_5 N_5 = \delta N_c$$

Substituyendo

$$V_5 = \frac{N_5}{N_4} \frac{N_1}{N_2} V_1$$

$$V_5 = \frac{144}{N_4 N_2} \qquad V_5 = \frac{X N_c}{N_5} = \frac{0.1 (6.88)}{12}$$

$$N_4 N_2 = \frac{144}{V_5} = \frac{144}{0.0574} = 2513.08$$

Combinación de números enteros para engranes $N_4 N_2$

$$N_4 N_2 = 44 \times 57 = 2508$$

$$N_2 > N_4$$

$$N_2 = 57 \text{ dientes}$$

$$N_4 = 44 \text{ dientes}$$

Especificaciones para engranes de paso fino 20°

Addendum $\frac{1}{P}$

Claro $\frac{0.2}{P} \pm 0.002$

Dedendum $\frac{1.2}{P} \pm 0.002$

Diámetro Exterior $\phi = \frac{N + 2}{P}$

Diámetro de Paso $D = \frac{N}{P}$

Paso Diametral $P = \frac{N}{D}$

D = Diámetro de círculo de paso

Paso circular : $p = \frac{\pi D}{N}$

Piñón 5

Paso cremallera = 1.4513 , $N_5 = 12$

$$D_5 = \frac{N_5 p}{\pi} = \frac{12 \times 1.45}{\pi} = 5.54 \text{ cm}$$

$$P_5 = \frac{N_5}{D_5} = \frac{12}{5.54} = 2.16$$

$$\emptyset = \frac{N+2}{P} = \frac{12+2}{2.16} = 6.25$$

Engrane 4

$$D_4 < 23 \text{ cm} \quad N_4 = 44$$

$$p = \frac{\pi D_4}{N_4} = \frac{\pi \times 23}{44} = 1.64$$

$$P = \frac{N_4}{D_4} = \frac{44}{23} = 1.91$$

$$\emptyset \text{ ext} = \frac{N_4 + 2}{P} = \frac{44 + 2}{1.91} = 24.08 \text{ cm}$$

Piñón 3

$$p = 1.64 \quad N_3 = 12$$

$$D_3 = \frac{N_3 p}{\pi} = \frac{12 \times 1.64}{\pi} = 6.26 \text{ cm.}$$

$$P = \frac{N_3}{D_3} = \frac{12}{6.26} = 1.91$$

$$\emptyset \text{ ext} = \frac{12 + 2}{1.91} = 7.32 \text{ cm}$$

Engrane 2

$$D_2 = 25 \text{ cm} \quad N_2 = 57$$

$$p = \frac{\pi \times D}{N_2} = \frac{\pi \times 25}{57} = 1.37$$

$$P = \frac{N_2}{D_2} = \frac{57}{25} = 2.28$$

$$\emptyset \text{ ext} = \frac{N_2 + 2}{P} = \frac{57 + 2}{2.28} = 25.87 \text{ cm}$$

Piñón 1

$$p = 1.37 \quad N_1 = 12$$

$$D_1 = \frac{D_2 \times p}{\pi} = \frac{25 \times 1.37}{\pi} = 5.23 \text{ cm}$$

$$P = \frac{N_1}{D_1} = \frac{12}{5.23} = 2.29$$

$$\emptyset \text{ ext} = \frac{N_1 + 2}{P} = \frac{12 + 2}{2.29} = 6.11 \text{ cm}$$

Tabla 2-5

Datos para fabricación del tren de engranes

		ENGRANES Y PINONES				
		P ₁	E ₂	P ₃	E ₄	P ₅
Diametro de Paso	D	5.23	25	6.26	23	5.54
Diámetro Exterior	∅	6.11	25.87	7.32	24.98	6.25
Paso Circular		1.37	1.37	1.64	1.64	1.45
Número de Engranes	N	12	57	12	44	12
Paso Diametral	P	2.29	2.29	1.91	1.91	2.16

Con esta relación de engranes se obtiene la reducción de desplazamiento adecuada para ajuste fino. A una vuelta de la manivela, el elevador subirá o bajará 1 mm.

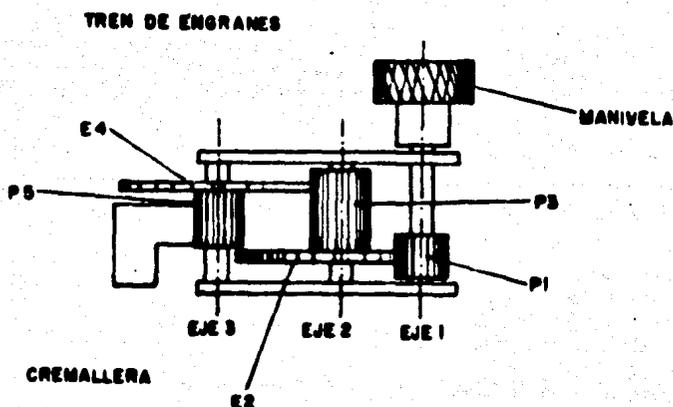


Figura 2-6 Montaje de tren de engranes y manivela

2.3.3 PALANCA DE ESPEJO

El rayo luminoso que es emitido por una lámpara proyector al reflejarse en el espejo, es proyectado sobre una pantalla de vidrio opaco, que está graduada de tal forma que pueda leerse directamente la deformación de la probeta de estudio.

Se estima, que obteniendo una amplificación de 100 aumentos se puede observar claramente la transformación de volumen que sufre el metal.

Para obtener una amplificación de 100 aumentos, se requiere que la relación entre la distancia del eje del espejo y el punto de apoyo de la barra de cuarzo y la distancia del eje a la pantalla sea igual a 100.

Para facilitar la construcción de la palanca-espejo, se ha seleccionado una distancia al apoyo de la barra de cuarzo de 6 mm., lo que hace que la distancia de la pantalla al eje sea de 600 mm.

De cualquier forma, el soporte de espejo y la palanca, se han diseñado para que se puedan obtener aumentos mayores, deslizando el soporte hacia la barra de cuarzo, reduciendo así la distancia del eje al punto de apoyo y aumentando la relación de amplificación, para los casos de estudio que requieran mayor exactitud.

La pieza en la que se montará el espejo, consta de un eje, el cual gira sobre la pieza de soporte. El punto de apoyo de la barra de cuarzo, está en el mismo plano que el eje. Formando un ángulo con este plano, está la superficie para el montaje del espejo. La superficie de reflexión debe estar también sobre el plano del eje. El maquinado y la colocación del espejo, deben ser efectuados con mucha precisión, ya que de eso depende en gran parte, la exactitud de las mediciones.

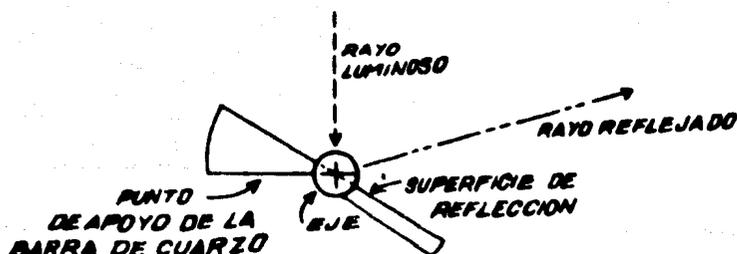


Figura 2-7 Palanca de Espejo.

La palanca, cuenta también con un tornillo de balance, el cual permite controlar el peso sobre la barra de cuarzo, para que permanezca siempre en contacto con ella.

2.3.4 SISTEMA OPTICO

El sistema óptico, consta de una lámpara proyector, espejo y pantalla, que estarán colocados como se muestran en la figura 2-8.

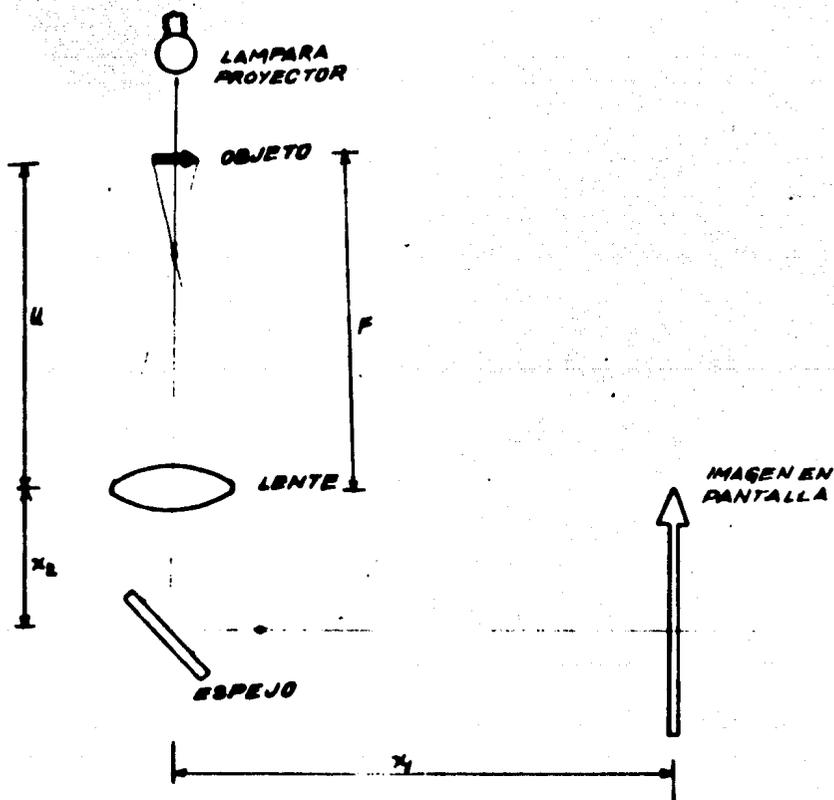


Figura 2-8 Sistema Optico

Cálculo del sistema óptico

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

u = distancia del objeto al lente

$$v = \frac{fu}{u-f} = mu = (m+1)f$$

f = distancia focal

$$u = \frac{fv}{v-f} = \frac{v}{m} = \left(\frac{1}{m} + 1\right)f$$

v = distancia del lente a la imagen

m = amplificación

$$u+v = \frac{(m+1)^2}{m} f$$

h' = tamaño de la imagen

$$m = \frac{h'}{h} = \frac{v}{u} = \frac{v-f}{f} = \frac{f}{u-f}$$

h = tamaño del objeto

$$f = \frac{v}{1 + \frac{h'}{h}} = \frac{v}{1+m}$$

Distancia del espejo a la pantalla $X_1 = 60$ cm

Distancia del espejo al lente X_2

Condiciones de diseño en cm.

Tamaño de la imagen $3 \leq h' \leq 4$

Distancia del lente a la imagen $60 \leq v \leq 70$

Distancia del objeto a la imagen $f < u \leq 10$

Tamaño del objeto $0.5 \leq h \leq 2$

Seleccionando diferentes valores y combinaciones de distancia y amplificación, se encontró que para valores de

$$v = 65 \text{ cm} \quad m = 8$$

$$f = \frac{v}{1+m} = \frac{65}{1+8} = \frac{65}{9} = 7.22 \text{ cm}$$

La distancia focal del lente es $f = 7.22$ cm y la distancia del objeto al lente es

$$u = \frac{f}{m} + f = \frac{7,22}{8} + 7,22 = 8,12 \text{ cm}$$

$$u = 8,12 \text{ satisface } f \leq u \leq 10 \text{ cm}$$

Los valores anteriores de V y m , satisfacen las condiciones de di seño y presentan características para una fácil construcción.

Distancia Objeto-lente

$$V = X_1 + X_2$$

$$X_2 = 65 - 60$$

$$X_1 = 5 \text{ cm}$$

Tamaño del objeto

$$h = 0,5$$

$$h' = 4$$

$$m = \frac{4}{0,5} = 8$$

El tamaño del objeto $h = 0,5 \text{ cm}$, y proyectará una imagen ocho ve ces mayor $h' = 4c$,

Lente

A partir de la distancia focal se puede adquirir un lente con ca racterísticas similares, o una combinación de lentes con la que se obtiene una imagen bastante clara.

Una forma de obtener aproximadamente las características dimensio nales del lente es:

$$\frac{1}{f} = (S-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Donde r_1 y r_2 , son los radios de curvatura del lente y S es el índice de refracción.

Para un lente convergente biconvexo de cristal corona con un índice de refracción $S = 1.52$ y distancia focal $f = 7.22$ cm

$$\frac{1}{7.22} = (1.52 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad r_2 \text{ cambia de signo por tratarse de la segunda superficie del lente biconvexo que cruza el rayo luminoso.}$$

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{0.1387}{0.52}$$

$$R = \frac{2}{0.266} = 7.51 \text{ cm}$$

$$r_1 = r_2 = R$$

El radio de curvatura es 7.52 cm.

2.3.5 PANTALLA

La medida de la transformación de la probeta de estudio, amplificada por los medios antes mencionados, podrá ser leída directamente de la pantalla graduada.

Esta pantalla, está montada a una distancia de 600 mm del punto de reflexión del rayo luminoso en el espejo.

La escala graduada en la pantalla, puede ser intercambiada de a cuerdo con la magnitud de amplificación con la que se esté trabajando. Está montada en un marco metálico, en el que se encuentra también una cubierta de acrílico transparente que protege y da la curvatura ($r = 600$ mm.) necesaria al papel traslúcido en el que está grabada la escala.

El marco metálico, debe tener libertad de movimiento para poder ajustar la pantalla a una posición de foco correcta o compensar cualquier variación en los cambios de escala.

2.3.6 ESPEJO

El espejo que refleja el rayo luminoso, cambiando su dirección de la lámpara proyector a la pantalla, debe ser de los llamados de primera reflexión. Ya que si se utiliza un espejo del tipo de vidrio, se tendría en la pantalla una doble imagen.

Existen en el mercado, varios tipos de espejos de primera reflexión, como el que se utiliza en las cámaras fotográficas y equipos con sistema "Reflex".

Otra forma de obtener una superficie adecuada para este propósito, es puliendo a espejo la superficie de una pieza metálica, para montarla después en la palanca.

El sistema óptico, debe estar dentro de una caja o cámara oscura cuya superficie interior esté acabada en negro mate, para evitar reflejos y que la flecha indicadora en la pantalla, sea lo más clara posible.

2.4 DISEÑO DE CONJUNTO

2.4.1 ESTRUCTURA

La estructura en donde será montado el sistema mecánico-óptico, de medición debe ser de construcción sólida. Esta estructura debe contar con el espacio necesario para alojar el horno de calentamiento y un horno auxiliar de baño de sales.

En la estructura deberá estar montado un tablero de control para colocar los instrumentos de medición de temperatura y los elementos del ciruito eléctrico.

2.4.2 TREN DE HORNOS

En algunas pruebas dilatómetricas, se requiere que la probeta de estudio, después de ser calentada, sea cambiada a un horno y otro dispositivo, en donde se efectúa un enfriamiento.

En este caso, la probeta al estar dentro del tubo de cuarzo, interconectada con el sistema de medición, hace que el movimiento de un horno a otro, sea muy complicado, ya que no es conveniente mover todo el sistema de medición, pues se tendría error en las lecturas. El sistema de medición debe permanecer fijo y libre de golpes o movimientos, que podrían causar desajustes. Por lo que, es necesario que los hornos efectúen los movimientos, para cambiar la probeta del horno calentador al horno de baño de sales.

Con objeto de que los hornos tengan este movimiento, deben estar montados sobre estructuras provistas de ruedas (carros de desplazamiento), que se desplazarán a lo largo de los rieles tubulares que están montados en la parte superior de la estructura.

2.4.3 CARRO DE DESPLAZAMIENTO

Esta estructura tiene por objeto, alojar a los hornos y permitir a éstos, un movimiento lateral, para que el orificio de la cámara de calentamiento, pueda ser colocada exactamente, debajo de la probeta de estudio. El carro de desplazamiento, cuenta también con correderas que permiten que el horno pueda tener un movimiento ascendente y descendente; con este movimiento, el horno sube y la probeta de estudio queda dentro de la cámara de calentamiento. Al bajar el horno y deslizar el carro a la izquierda la probeta queda libre para que pueda ser utilizado otro horno.

Esta estructura, permite también que el tubo de cuarzo en la zona de alojamiento de la probeta, quede libre para cambiar las probetas.

Para que el ascenso y descenso del horno resulte más cómodo, se colocarán contrapesos, con un mecanismo de poleas.

2.4.4 SISTEMAS AUXILIARES

Cubierta de Estructura

La estructura debe estar cubierta de tal forma, que los hornos y otros sistemas, queden protegidos, para esto, se colocarán cubiertas metálicas alrededor de la estructura, así como una puerta de acceso para cambio de probetas, movimiento de hornos y reparaciones. En el costado, donde estará la pantalla de lectura, se colocará el tablero de control.

Tubo y Barra de Cuarzo

El material que se ha elegido para el alojamiento de la probeta de estudio y para transmitir la deformación hasta el sistema de medición, es el "cuarzo"; ya que sus características físicas, especialmente su bajo coeficiente de dilatación lo hacen el material más adecuado para estos propósitos. El tubo de cuarzo debe cortarse de tal forma, que las probetas de estudio puedan ser introducidas en él y permanezcan perfectamente fijas durante las pruebas.

La barra de cuarzo, quedará introducida parcialmente en el tubo de cuarzo y apoyada firmemente en la probeta. El diámetro exterior de la barra, debe ser menor que el interior del tubo.

Sistema de refrigeración

La cámara del horno de calentamiento alcanzaba temperaturas entre los 800°C y 1000°C, por lo que los sistemas que se encuentran en contacto con el horno o cerca de él, se calentarán.

El sistema de medición es delicado, por lo que no es conveniente que esté en contacto con el horno, ya que la alta temperatura, podría ocasionar algún daño al equipo..

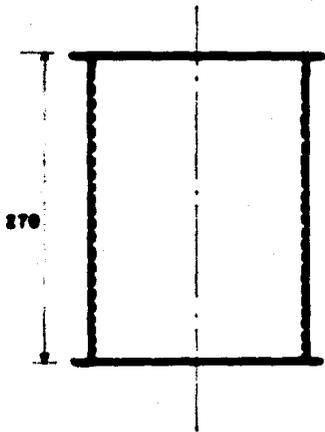
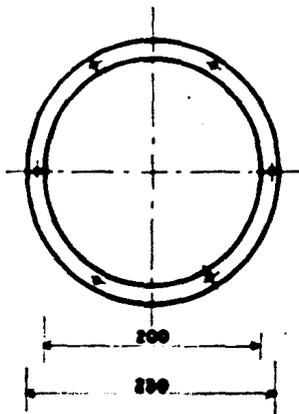
Para evitar que la temperatura del horno no afecte el sistema de medición o cause errores en las pruebas, es indispensable colocar entre la tapa superior del horno y el sistema de medición, un dispositivo refrigerante.

Este sistema de refrigeración, consta de una palanca metálica de disipación, en la que está integrado un serpentín de cobre, por el que circula el líquido refrigerante. (agua).

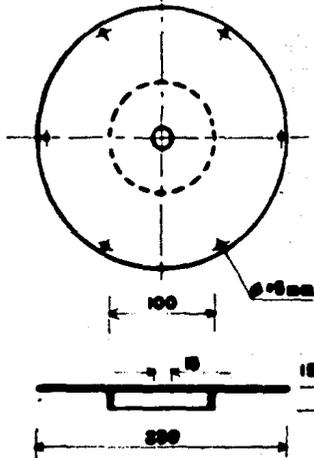
Con esto, la temperatura del horno, no afecta el sistema de medición.

2.4.5 PLANOS DE CONSTRUCCION

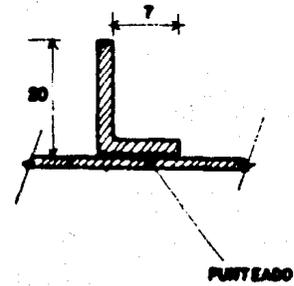
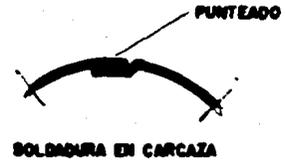
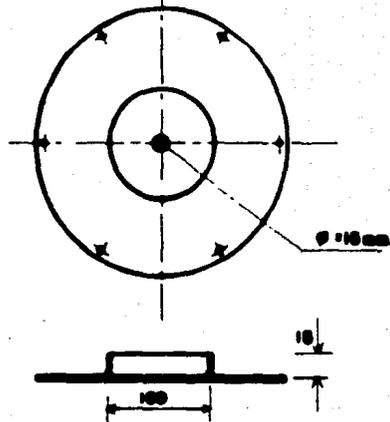
Plano	1	Horno Eléctrico	Carcaza y Tapas
	2	Sistema de Medición	Sujeción de Barra de Cuarzo
	3	" "	Elevador
	4	" "	Cola Milano
	5	" "	Empotramiento Cola Milano
	6	" "	Base
	7	" "	Soporte de Espejo
	8	" "	Palanca de Espejo
	9	" "	Engranés y Cremallera
	10	" "	Soporte de Engranés y manivela
	11	Sistema Optico	Proyector
	12	" "	Cámara Porta Proyector y Soporte
	13	" "	Cámara Oscura
	14	" "	Marco de Pantalla
	15	Estructura	Estructura
	16	" "	Carro de Desplazamiento
	17	" "	Ruedas y Eje
	18	" "	Tablero de Instrumentos
	19	Auxiliares	Tubo y Barra de Cuarzo
	20	" "	Diagrama del circuito eléctrico
	21	Diseño de Conjunto	



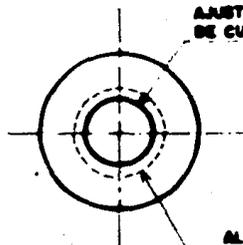
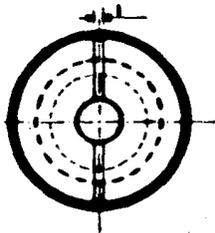
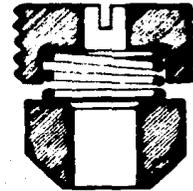
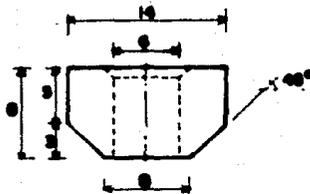
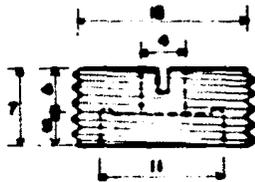
TAPA SUPERIOR



TAPA INFERIOR



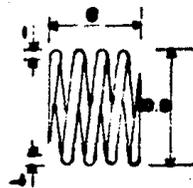
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
CARCAZA Y TAPAS	
ESCUELA N.º	J J A R
oct. 1911	



AJUSTE A BARRA
DE CUARZO

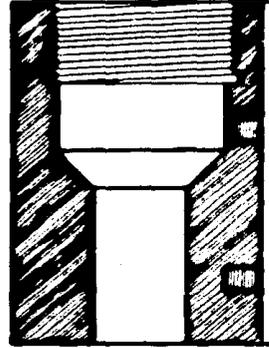
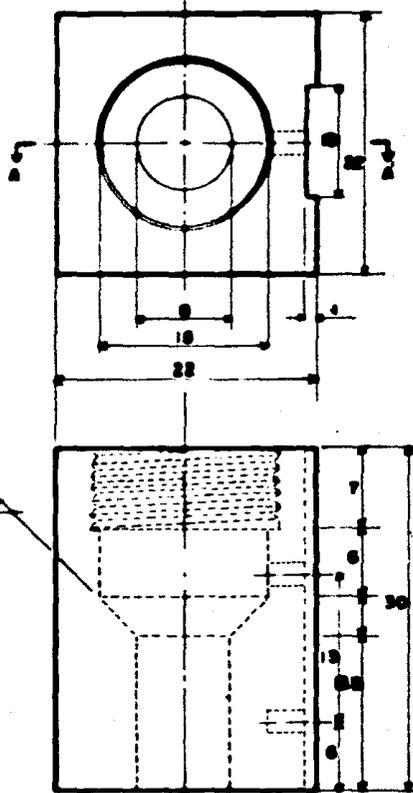
ALOJAMIENTO
PARA PEGAMENTO
1mm. 45°

BOBINE: ALAMBRE $\phi = 1\text{mm.}$ 4 COILS
PARA TRABAJO A COMPRESION SIN
FLEXION. L = 6mm.



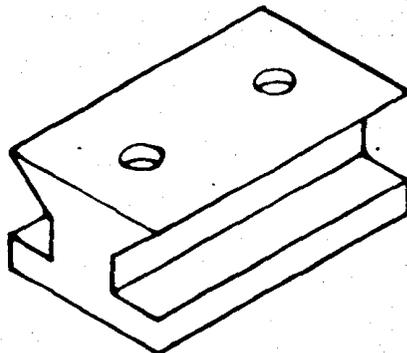
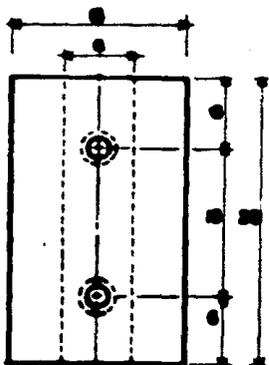
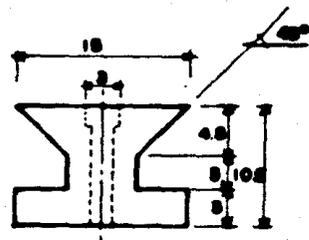
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
SUJETOR DE BARRA DE CUARZO.	
escala 2:1	J J A R
est. mm	

CORTE AA'



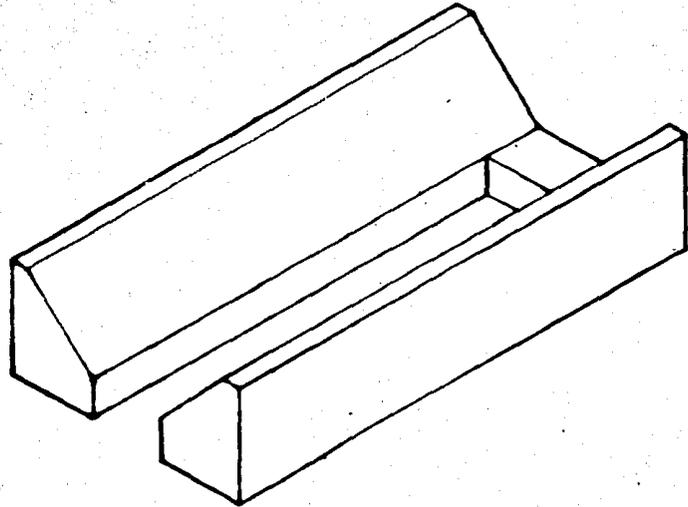
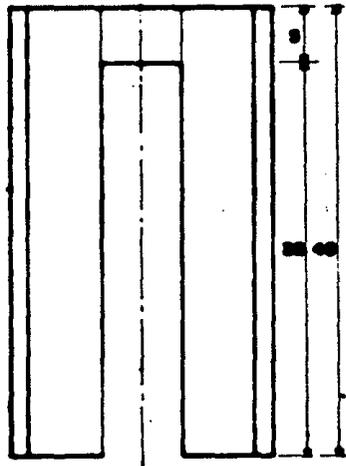
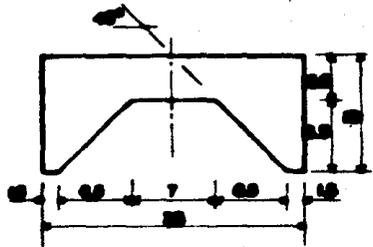
U	N	A	M
FACULTAD DE INGENIERIA			
ELEVADOR			
escala 2:1		J J A R	

oct. 1966

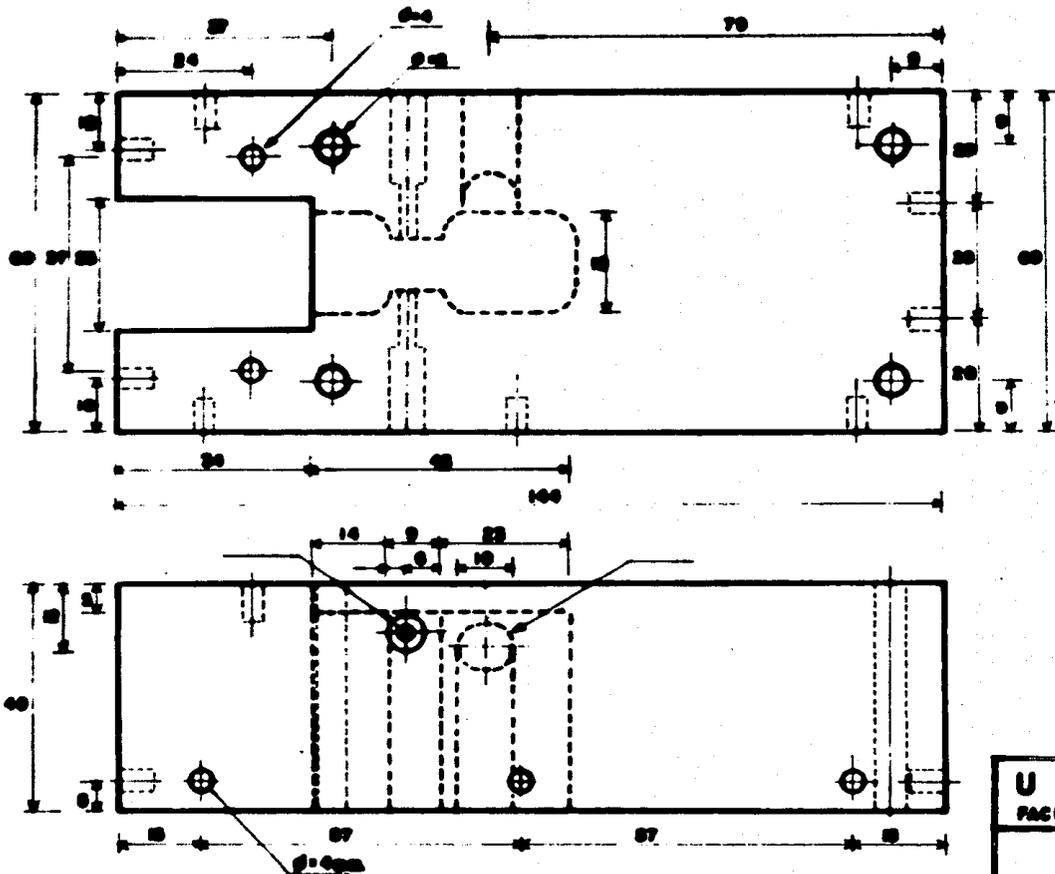


COLA DE MILANO

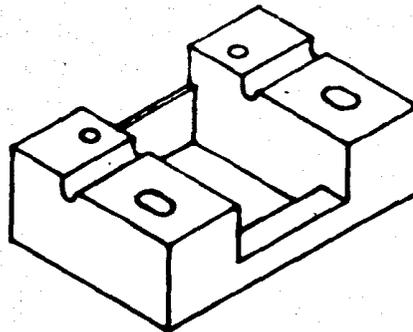
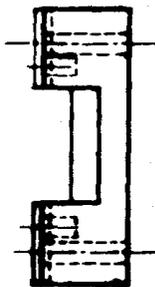
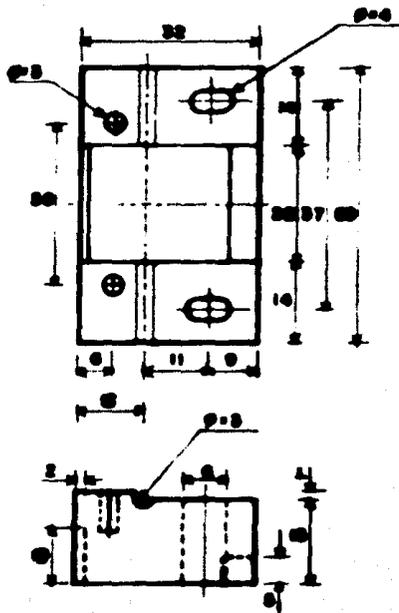
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
COLA DE MILANO	
escala 1:5	J J A R
col. mm	



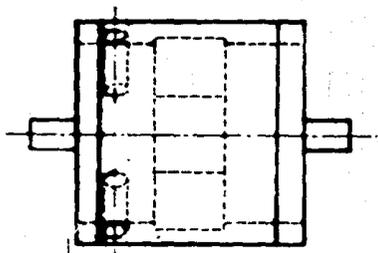
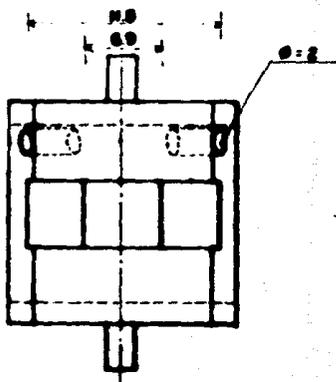
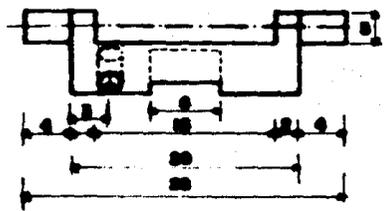
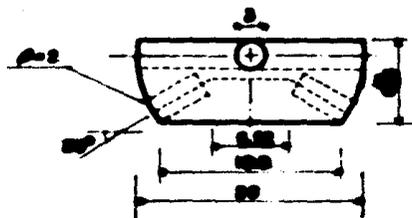
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
EMPOTRAMIENTO	
occl. 20	J J A R
ocl. 20	



U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
BASE	
escala 1:1	J J A R



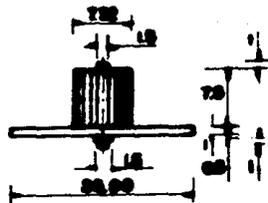
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
SOPORTE DE ESPEJO	
escala. 2:1	J J A R
ed. mm	



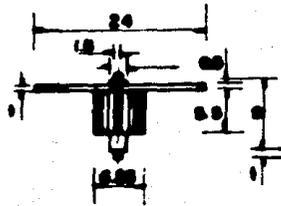
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
PALANCA DE ESPEJO	
escala 2:1	J J A R
oct. mm	



EJE 1



EJE 2

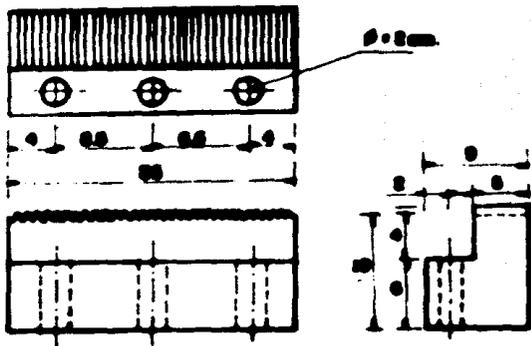


EJE 3



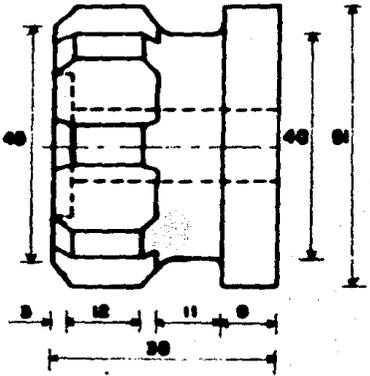
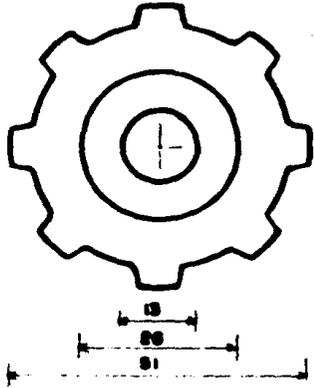
PEBILLA

CREMALLERA

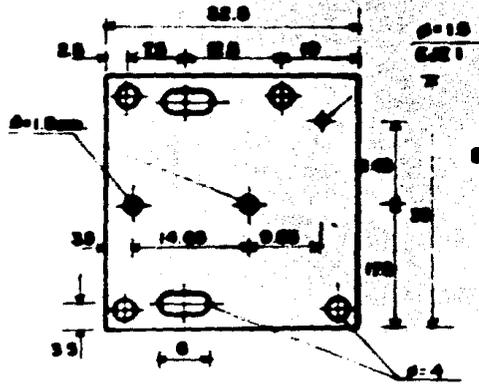
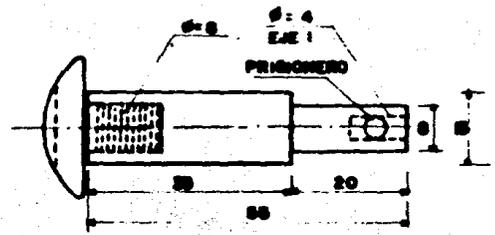


U N A M	
INGENIERO DE MECANICA	
ENGRANES Y CREMALLERA	
escala. mm	J J A R
oct. mm	

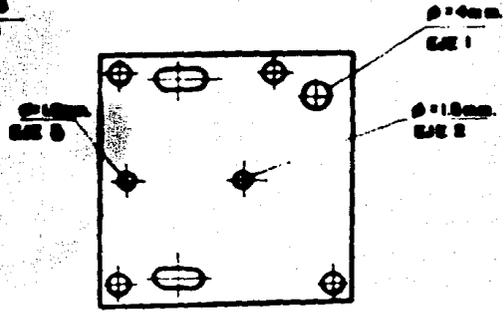
MANIVELA



EJE DE MANIVELA



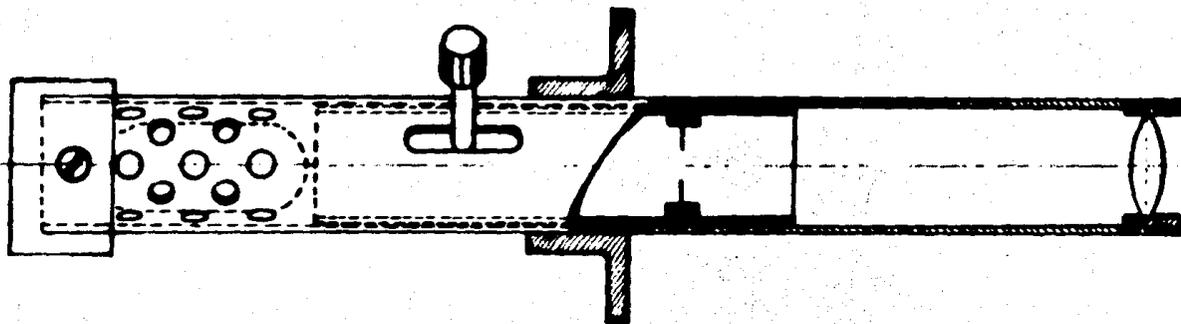
PLACA I



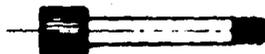
PLACA II

U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
SOPORTE DE ENGRANES Y	
MANIVELA	
escala 1:1	J J A R

cd. mm

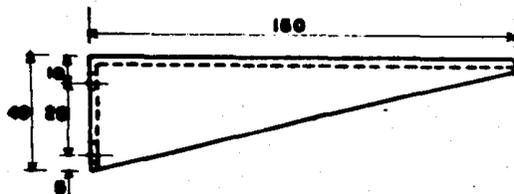
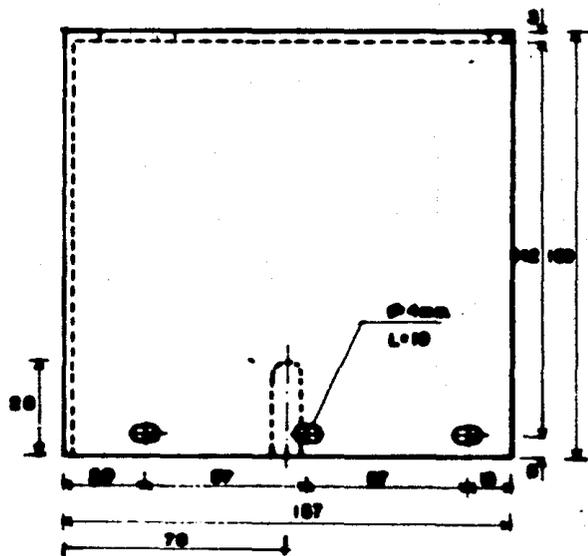
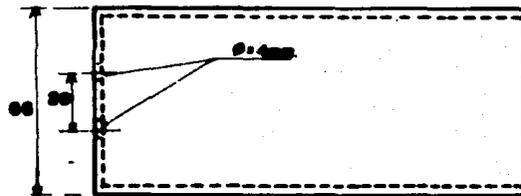
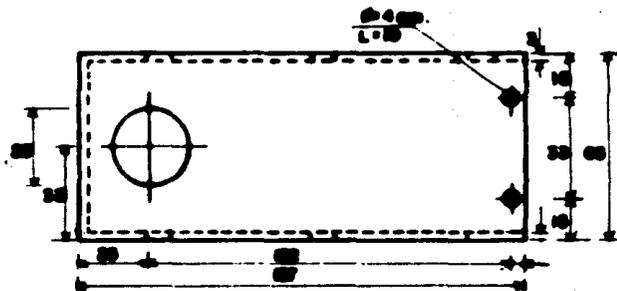


OBJETO 8mm

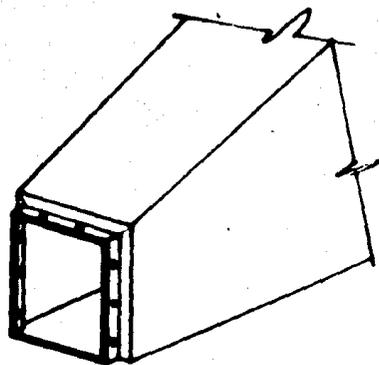
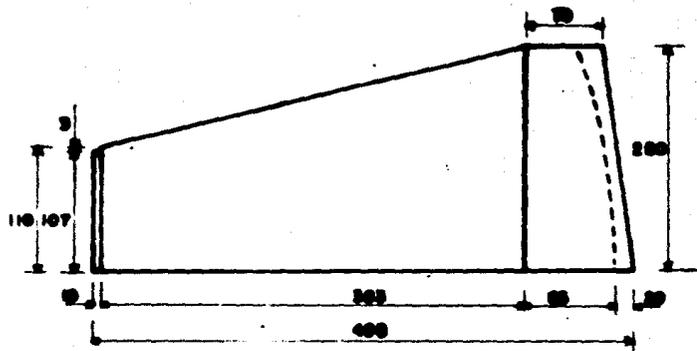
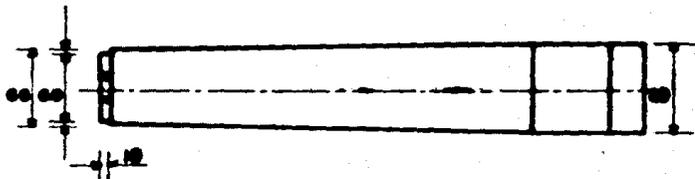


PALANCA DE ENFOQUE

U	N	A	M
FACULTAD DE INGENIERIA			
PROYECTOR			
escrito en		J J A R	

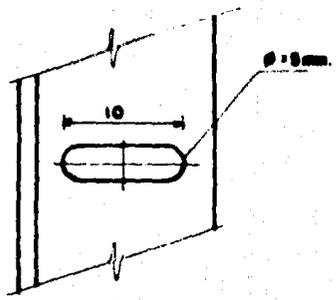
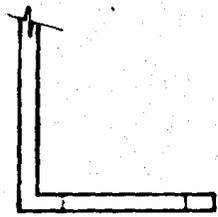
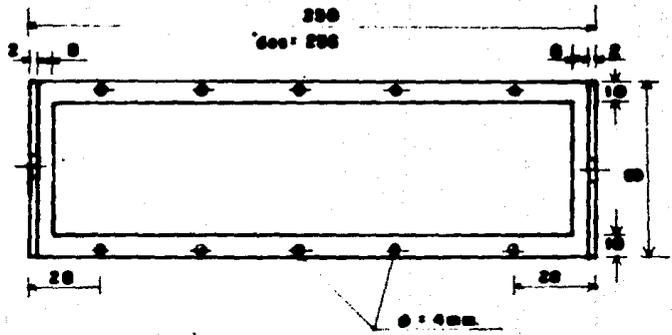
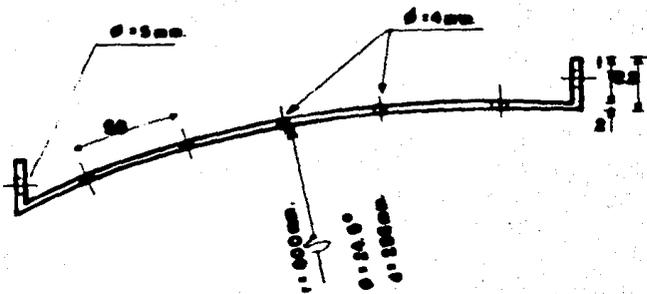


U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
CAMARA PORTAPROYECTOR Y SOPORTE.	
escala 1:2	J J A R
est. mm	

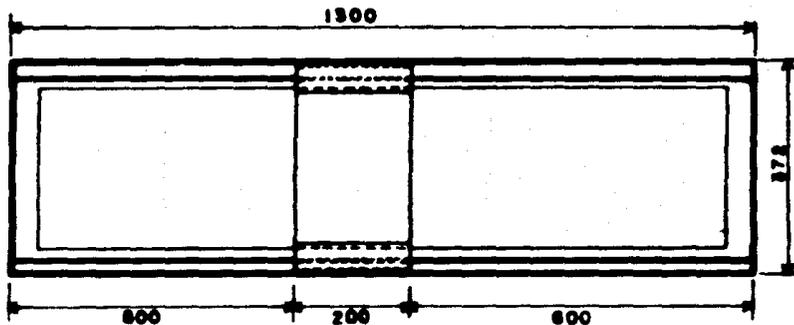


DETALLE PARA ENPLANE
CON PZA. PORTA PROYECTOR

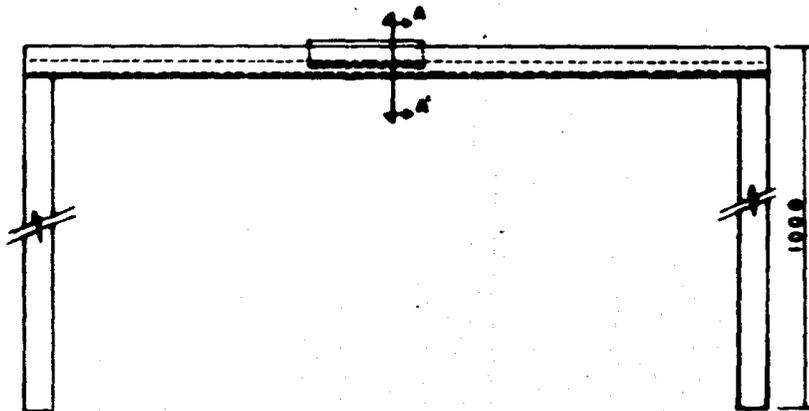
U		N		A		M	
FACULTAD				DE INGENIERIA			
CAMARA				OBSCURA			
escala 1:5		J		J		A R	
act. mm							



U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
MARCO DE PANTALLA	
escala 1:25	J J A R
cct. mm	

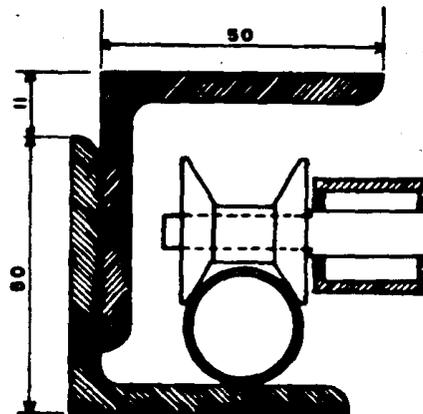


PLANTA

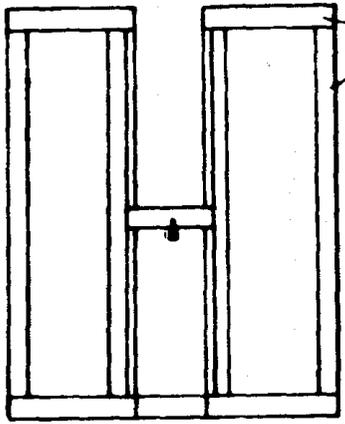
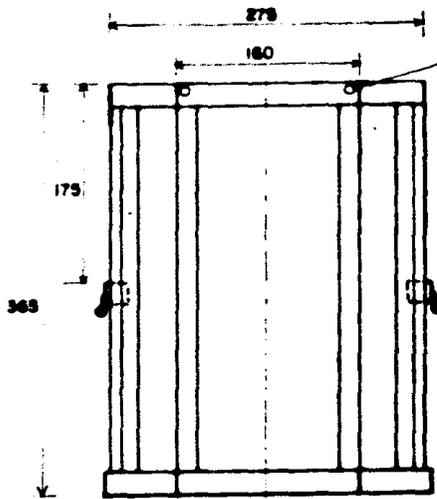
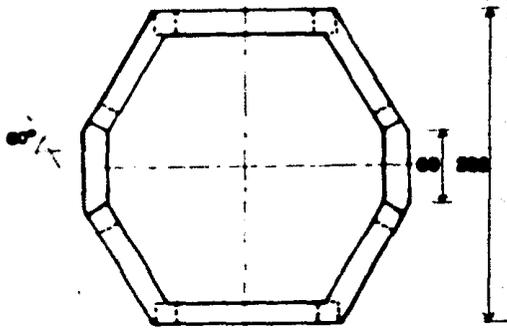


ELEVACION

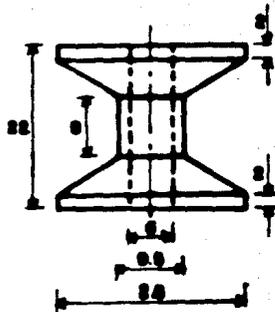
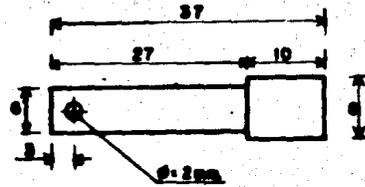
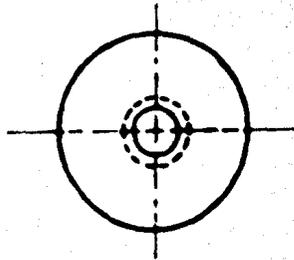
CORTE AA' Y CARRO DE DESPLAZAMIENTO ESC. 1:1



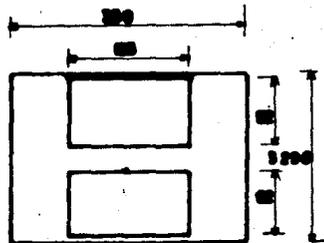
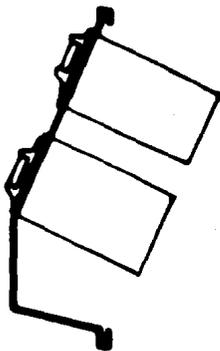
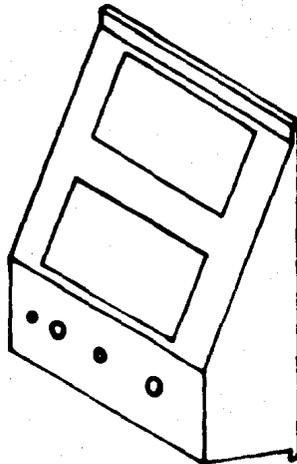
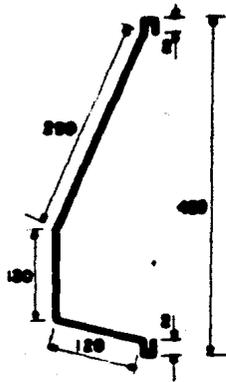
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
ESTRUCTURA	
escala 1:10	J J A R
oct. 1911	



U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
CARRO DE DESPLAZAMIENTO	
Escala 1:5	J J A R
Oct. mm	



U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
RUEDAS Y EJE	
escala 2:1	J J A R
est. mm	

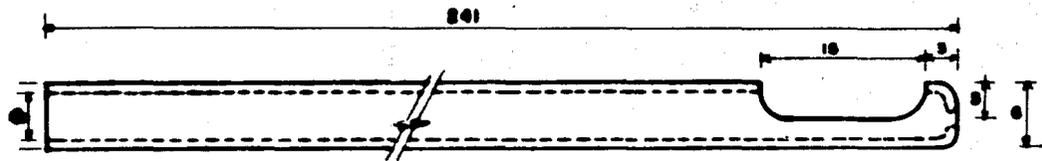


MONTAJE DE PROMETROS

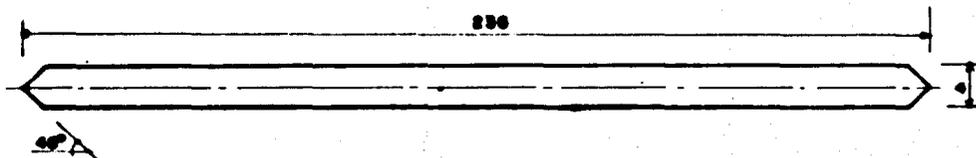
U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TABLERO DE INSTRUMENTOS	
DISEÑADO	J J A R

esc. mm

TUBO DE CUARZO



BARRA DE CUARZO

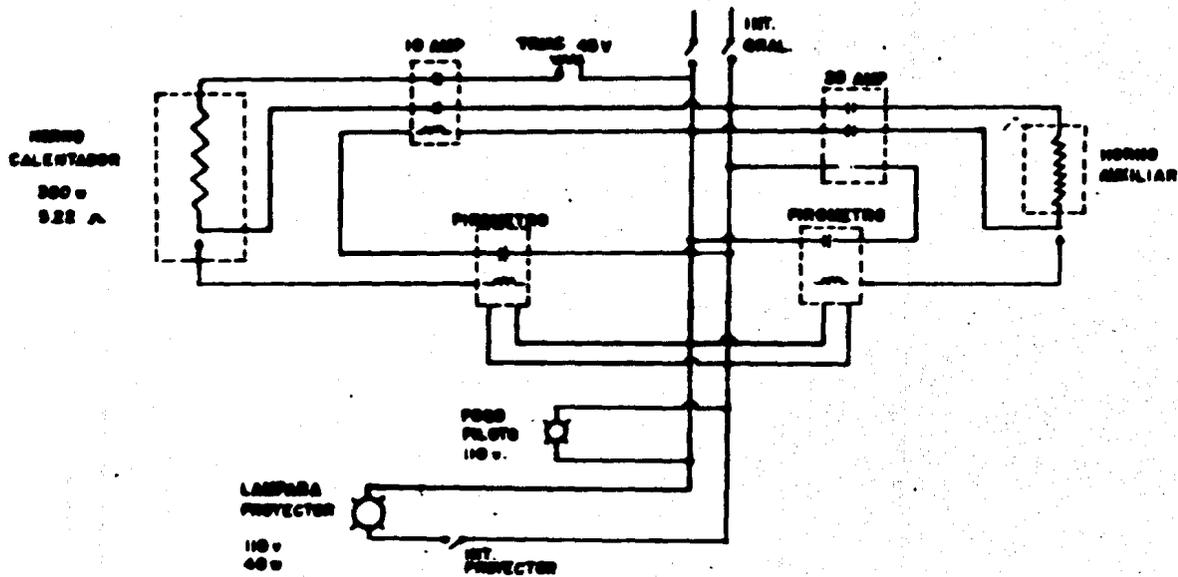


PROBETA DE ESTUDIO

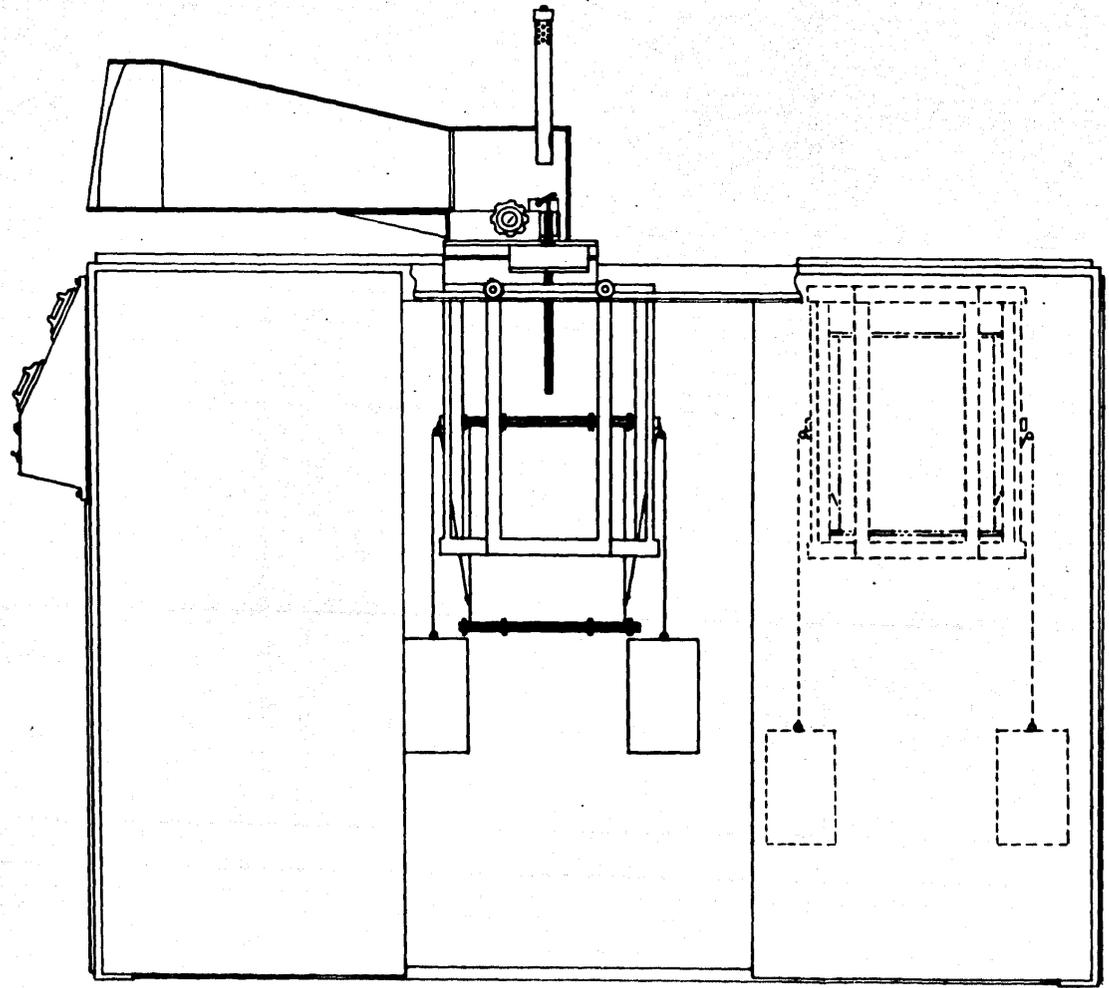


U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TUBO Y BARRA DE CUARZO	
escala: 3/4	J J A R

est. mm



U N A M	
FACULTAD DE INGENIERIA	
CIRCUITO ELECTRICO	
Sección	J J A R



C A P I T U L O I I I - C O N S T R U C C I O N D E L D I L A T O M E T R O

La construcción del dilatómetro se llevó a cabo en los talleres de procesos de manufactura de la Facultad de Ingeniería. Los materiales utilizados en este trabajo fueron proporcionados en su mayoría, por la U.N.A.M.

Algunas de las piezas y partes del equipo, fueron elaborados con el asesoramiento del personal de compañías especializadas y con ayuda del personal que trabaja en los talleres antes mencionados.

A continuación, se mencionan los aspectos más importantes del proceso de construcción del horno y la estructura del dilatómetro.

3.1 PROCESO DE CONSTRUCCION

3.1.1 HORNO ELECTRICO

Carcaza y Tapas

Para la fabricación de la carcaza, se utilizó lámina calibre 22, que fue cortada a la medida necesaria para después de ser rolada, obtener el cilindro base.

Una vez rolada se dobló la lámina, en un extremo para permitir un empalme con el otro extremo. Para cerrar el cilindro, se utilizó soldadura de punto a cada 10 mm.

La ceja para la sujeción de tapas, se logró con la ayuda de calentamiento de los extremos del cilindro.

Las tapas fueron cortadas de lámina #20, a estas tapas se le soldaron cejas de ajuste previamente roladas y dobladas. Se utilizó soldadura

de punto. El objeto de estas cejas de ajuste, es posicionar en el centro del horno, un cilindro metálico, que estará lleno de material refractario.

Una vez terminadas las tapas, se rayaron y se perforaron (como indica en el plano), con barrenos para tornillos y entrada a la cámara del horno. Los barrenos de las tapas, se usaron como guías para barrenar la ceja del cilindro.

Elemento de Calefacción

El alambre de Kanthal A-1 #15, se enrolló en una barra con diámetro $\phi=27$ mm., esto se logró, colocando la barra en un torno y haciéndola girar lentamente. Para evitar deslizamiento, se introduce un extremo de alambre en una perforación que atravieza la barra. En cada extremo de la resistencia, se dejaron libres 40 cm. de material para conexión.

Se terminó con el enrollamiento de la resistencia, se contaron las 70 espiras, se liberó la tensión en la resistencia, pudiendo extraer así la barra. Como las espiras se encontraban en contacto unas con otras, se procedió a estirar la resistencia, hasta obtener la separación deseada entre espiras.

El enrollamiento de una barra con diámetro menor al del tubo de cerámica, donde se montó la resistencia, es con el objeto de que ésta entre a presión y quede perfectamente fija en el tubo de cerámica, para evitar que algunas espiras se junten.

El montaje en el tubo de cerámica se efectuó, haciendo movimientos en un sentido y en otro para aflojar la resistencia; una vez que la resistencia quedó en la posición correcta y que ninguna de las espiras estaba en contacto con otra, se colocaron las abrazaderas en los extremos del tubo con esto quedó perfectamente fijo el alambre de calentamiento.

Colado de concreto aislante

El concreto aislante Plicast LWI-20, tiene un tipo de fraguado hidráulico; para cubrir el elemento de calefacción con el aislante, se procedió primero a cernir un poco del concreto para obtener un polvo fino; éste se mezcló con agua hasta producir una pasta lo suficientemente líquida para que al aplicarse entre las espiras, sobre el tubo de cerámica penetrará perfectamente. Esta pasta al secar, evita que las espiras tengan movimiento.

El siguiente paso, fue colocar el elemento de calefacción en un cilindro de lámina #18 con diámetro $\varnothing = 10$ cm, posicionándolo en el centro del cilindro, introduciendo 2 tubos de $\varnothing = 1.37$ cm., en el hueco de cerámica, estos tubos se cubrieron con una capa de grasa y tienen por objeto, evitar que durante el colado, el concreto penetre en la cámara de calentamiento.

Una vez, que el elemento de calefacción está en posición correcta, se prepara la mezcla de concreto aislante, añadiendo agua poco a poco, hasta obtener una pasta espesa. Esta pasta se vierte dentro del cilindro, cuidando que llene todos los espacios dentro del cilindro. Esto se logra introduciendo y moviendo la pasta con una barra de metal ($\varnothing = 1$ m., aproximadamente), para compactar el colado.

Este proceso se efectúa a intervalos de llenado de 4 a 5 cm. de altura, compactando cada capa y cuidando de que la mezcla no se seque antes de colarla en el cilindro. Si la pasta se vuelve demasiado espesa, será necesario agregar un poco de agua. Cuando el cilindro está completamente lleno, se golpean suavemente las paredes exteriores, para extraer cualquier burbuja de aire atrapada en el colado. Si se cuenta con un vibrador es conveniente colocar el cilindro durante unos minutos, cuidando que el elemento de calefacción no se mueva.

El colado fraguó en los extremos del tubo, en 8 horas. Sin embargo, se dejó secar durante 2 días más; quitando después los tapones de los

extremos y haciendo pasar corriente a la resistencia, para completar el se cado del concreto aislante.

En esta etapa, el horno está terminado para ensamble y montaje en el carro de desplazamiento.

La carcasa del horno, se monta sobre las correderas del carro de desplazamiento, para proceder después a colocar la tapa inferior, ensamblar el cilindro y llenar el espacio entre la carcasa y el cilindro con polvo de asbesto. Esta operación de llenado de asbesto es similar a la de colado de concreto, pues se requiere compactar el asbesto lo mejor posible.

Las terminales de la resistencia deben sacarse por los orificios correspondientes de la carcasa exterior, colocando también las abrazaderas y aislantes.

Cuando se ha terminado el llenado y compactado el asbesto en polvo se coloca la tapa superior y el cartón de asbesto, alineado el orificio de entrada a la cámara de calentamiento, apretando los tornillos de sujeción de ambas tapas. Es necesario que el aislante de cartón de asbesto, que ac túa también como empaque, selle perfectamente, para evitar que el polvo de asbesto salga de la carcasa.

3.1.2 ESTRUCTURA

El marco de la estructura fue constuido con ángulo de fierro de 2 X 2"; espesor 3/16". Primeramente, se cortaron tramos para después soldar el marco superior con soldadura eléctrica. Las patas y los refuerzos de ángulo de 1 X 1"; fueron soldados posteriormente.

Rieles para carro de desplazamiento.

Se cortaron 2 tramos de 1,25 mt. de largo, de tubo Conduit de pa red delgada $\phi = 3/4"$. Uno de ellos, se soldó al marco de la estructura y

el segundo, fue soldado a medida que se alineaba con la distancia entre ruedas del carro de desplazamiento.

3.1.3 ALAMBRADO DE TABLERO DE CONTROL

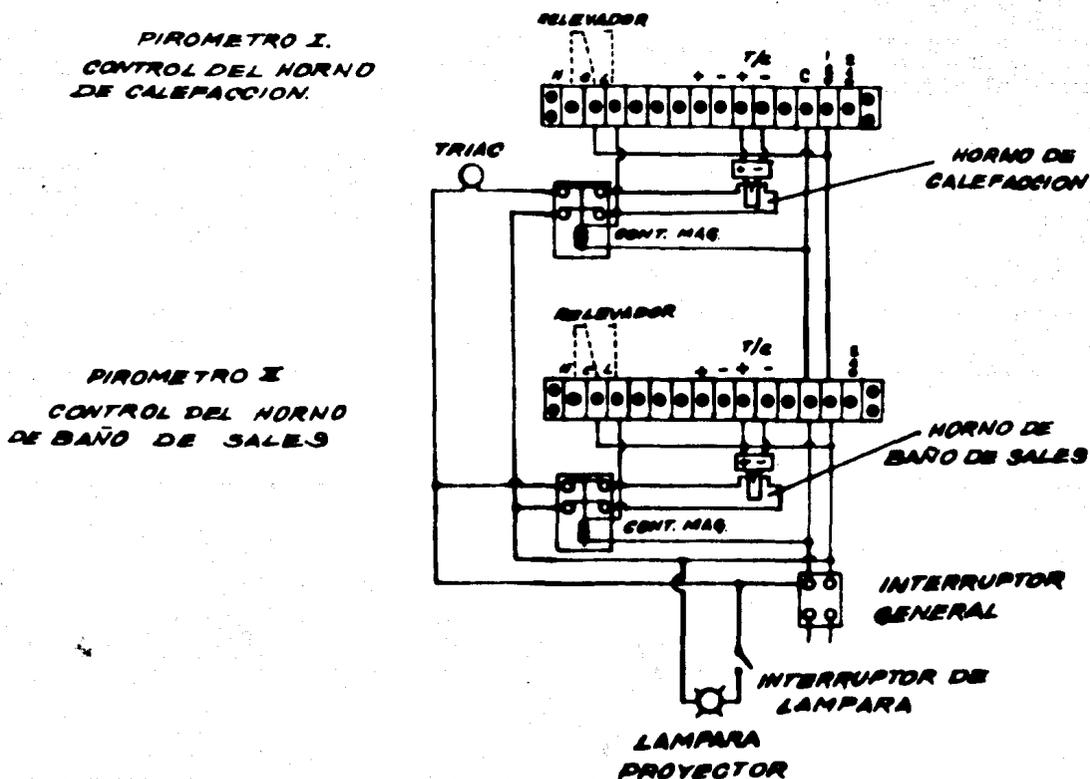


Figura 3-1 Alambrado de Tablero de Instrumentos en Tablero de Control.

3.1.4 SECUENCIA DE OPERACIONES SEGUIDA EN LA
CONSTRUCCION DEL
DILATOMETRO

ELEMENTO DE CALEFACCION	H O R N O	CARRO DE DESPLAZAMIENTO
1 Embobinado de resistencia	1 Roldado de carcazas	1 Cortado de tubo sección cuadrada
	2 Soldadura Punteada	2 Ensamble
	3 Doblado de cejas	3 Soldadura autógena
2 Montaje en tubo de cerámica	4 Cortado de Tapas Superior e Inferior	4 Perforación de barrenos para eje
	5 Soldadura de Cejas	5 Torneado de ruedas y eje
3 Ajuste y prueba	6 Perforación de Barrenos	6 Prueba de rueda en eje
	7 Rolado de cilindro de colado	
	8 Soldadura Punteada	
4 Preparación para Colado	9 Perforación de Barrenos	
	10 Pintura	
	11 Ensamble de ganchos para contrapesos, conexiones, abrazaderas de termoper en carcaza	7 Montaje de Ejes
5 Colado de concreto aislante		8 Soldadura de Ejes
		9 Montaje de ruedas
		10 Perforación de Barreno para correderas
6 Secado	12 Corte y preparación de cartón de asbesto	11 Perforación de Barreno para poleas
	13 Ensamble de tapa inferior en carcaza	12 Pintura
7 Prueba de calentamiento		

- 13 Montado de correderas
- 14 Alineación de correderas

**MONTAJE DE CARCAZA EN
CORREDERAS
ALINEACION
PRUEBA DE ASCENSO
Y DESCENSO**

ENSAMBLE DEL HORNO

- 1 Montaje de cilindro de colado en carcaza
- 2 Alineación
- 3 Ajuste de pirómetro y conexiones eléctricas
- 4 Llenado de asbesto en polvo entre carcaza y cilindro de colado
- 5 Prueba de ascenso y descenso

ESTRUCTURA

- 1 Cortado de ángulo
 - 2 Ensamble del marco superior
 - 3 Soldadura eléctrica
 - 4 Soldadura de patas y tensores
 - 5 Alineación de rieles
 - 6 Prueba de alineación con el carro de desplazamiento
 - 7 Soldaduras de rieles
- CUBIERTAS DE TABLEROS DE CONTROL**
- 8 Corte y doblés de charolas y puerta
 - 9 Corte y doblés de tablero de control
 - 10 Soldadura de tapas laterales en tablero
 - 11 Perforación para montaje de pirómetros

- | | | | |
|---|---|----|--|
| 6 | Ensamble de tapa superior y cartón de asbesto | 12 | Barrenos en tapas y |
| 7 | Montaje de carro y horno en estructura | 13 | Barrenos en estructura |
| 8 | Armado de sistema de contrapeso | 14 | Pintura de tapas, <u>table</u> ro y estructura |
| | | 15 | Ensamble de tapas y tablero de control |
| | | 16 | Montaje de bisagras y puerta de acceso |
-

CIRCUITO ELECTRICO

- 1 Montaje de equipo de control
 - 2 Alambrado de equipo y horno eléctrico, instalación del termopar
 - 3 Prueba de circuito
 - 4 Prueba de registro de temperatura y relevador de pirómetro
 - 5 Prueba de relevadores, interruptores y focos piloto
-

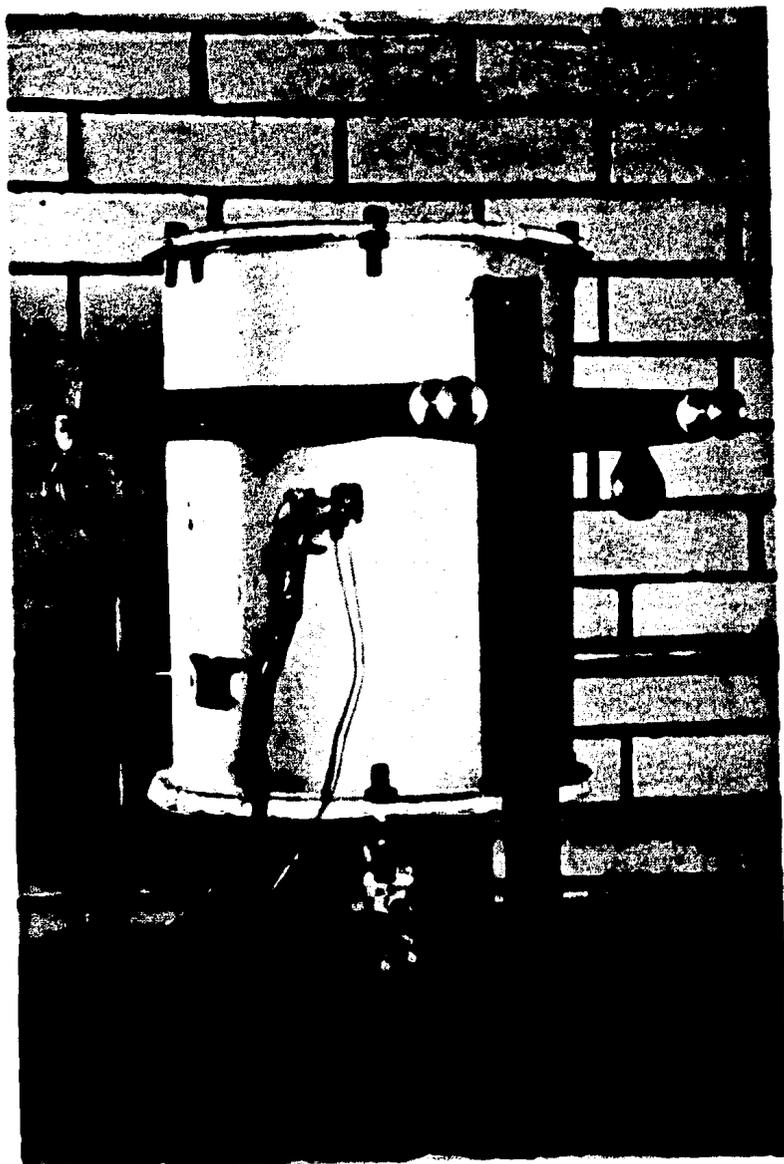


Figura 5-2. Carro de desplazamiento con poleas y ruedas. En la parte superior se puede aproximar la corredera para que el horno suba y baje.

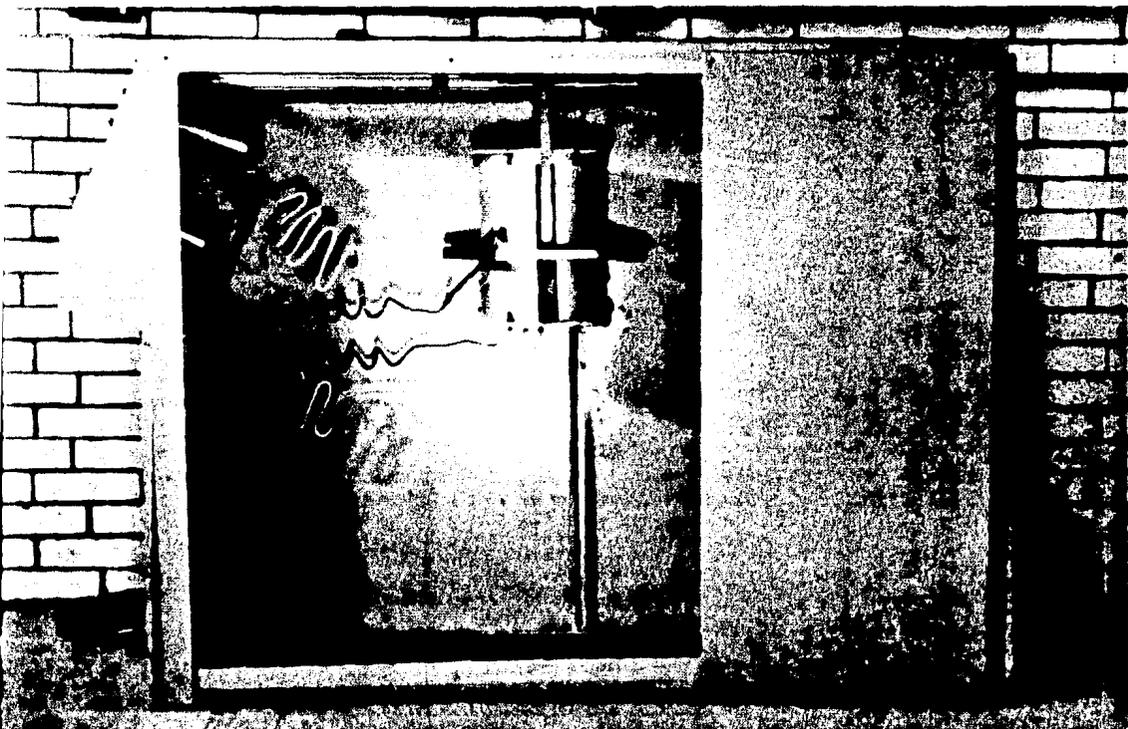


Figura 3-3 Vista lateral del dilatómetro, mostrando el horno en posición baja. A la izquierda se encuentran los pirómetros.



Figura 3-1 Estructura y rieles para movimientos de bormes.



Figura 3-5 Estructura, Horno y Tablero de control, mostrando los 2 pirómetros, para medición y control de temperatura.

3.2 COSTO Y MATERIALES

Existen varias compañías extranjeras que fabrican equipos de dilatometría o que cuentan con dispositivos muy sofisticados.

Ya que todos estos equipos son de importación, su costo en el mercado nacional es elevado y varía de acuerdo a las combinaciones y dispositivos con que está construido. El costo de un dilatómetro, es alrededor de \$200,000.00 PESOS M.N.

Ya que el diseño y construcción del equipo de dilatometría, que me fue asignado como tema de tesis, lo realicé en los talleres de procesos de manufactura de la Facultad de Ingeniería, no se ha tomado en cuenta, en este trabajo, el costo de diseño, mano de obra, tiempo de máquinas, gastos fijos, etc.

A continuación, se detallan los materiales empleados en la construcción y su costo correspondiente. Se indican también los materiales proporcionados por la U.N.A.M.

M A T E R I A L E S U T I L I Z A D O S

Cant.	Descripción	Precio Unitario	Total
1	Carcaza exterior horno. Lámina # 20	\$ 200.00	\$ 200.00
1	Carcaza interior horno. Lámina # 22	20.00	20.00
2	Tapas de horno. Lámina # 20	40.00	80.00
6 mts.	*Resistencia Kanthal A-1 # 15	50.00	300.00
4 pza.	Abrazaderas para Cable 5 mm.	6.25	25.00
16 pza.	Tornillos Allen 6 X 25	4.60	73.60
3 kg.	Concreto aislante Plicast LW1-20 Plíbrico	6.35	19.05
8 kg.	*Asbesto en polvo	7.00	56.00
1 mt.2	Cartón de asbesto de 5 mm.	400.00	400.00
10 kg.	Plomo para contrapeso	15.00	150.00
1 mts.	*Termopar Cromel-Alumel tipo K	100.00	100.00
4 mts.	Cable acerado Ø = 3 mm.	5.60	22.40
3 mts.	Cable uso rudo	10.00	30.00
1 pza.	Mordaza para cable uso rudo	3.00	3.00
16 kg.	Charolas Lámina #22 para cubierta	12.80	204.80
1.5 lts.	Pintura laca azul	83.30	125.00
1 lts.	Preimer Base	27.00	27.00
1/4 lts.	Sellador	45.00	11.25
1	Tablero de instrumentos. Lámina # 18	70.00	70.00
3	Bisagras de 1"	3.00	9.00
1 pza.	Barra de aluminio Ø = 1" Aleación 6099-T6	40.00	40.00
4 pza.	Ejes de Barra C.R. Ø = 6 mm.	18.00	72.00
6 pza.	Tornillos Allen 6 X 25	4.60	27.60
22 pza.	Tuercas para tornillo Allen 6 X 25	0.40	8.80
3 mts.	Tubo Conduit 3/4" Pared Delgada	10.00	30.00
7 mts.	*Angulo de 2 X 2" fierro	30.66	214.66
4 mts.	*Angulo de 1 X 1" fierro	12.70	50.80
4 mts.	*Cuadrado de 1 X 1"	16.90	67.60
4 pza.	Poleas	8.00	32.00
4 pza.	Correderas de cajón con balines	30.00	120.00

Sub - Total

- - - - - \$ 2,589.56

Cant.	Descripción	Precio Unitario	Total
- - -	- - - - -	- - - -	\$ 2,589.56
2 mts.	Cable # 10	\$ 5.50	\$ 11.00
5 mts.	Cable # 16	1.80	9.00
20 pza.	Anillos Terminal ent 34160	2.39	47.84
1 pza.	Piloto Rafi. Ent. 160502.10413	40.56	40.56
1 pza.	Foco Neón NE-10 110V.	37.44	37.44
1.5 mts.	Alambre de extensión tipo K cromel-alumel calibre 14 con forro asbesto marca EIM	58.00	87.00
1	Triac 0 a 45 V.	425.00	425.00
2	*Pirómetros West Tipo J de 20 a 1400°C	4,000.00	8,000.00
20	Terminales de Presión	1.50	30.00
1 pza.	Clavija Monofásica Industrial	14.00	14.00
2 pza.	Contactador Magnético de 10 amp.	360.00	720.00
2 pza.	Interruptores 110V.	70.00	140.00
4 pza.	Tornillos 5 X 25 c/tuerca	-	-
4 pza.	Tornillos 4 X 38 c/tuerca	-	-
3 pza.	Tornillos 5 X 38 c/tuerca	-	5.80
22 pza.	Tornillos de 5 X 25 c/tuerca y rondanas	-	9.40
Herramientas y varios			
3	Brocas 9/37" y 2 Brocas 1/4" Thiner, Lijas, etc.	118.00	118.00
		-	94.00
T O T A L		- - - - -	<u>\$12,378.60</u>

* Material proporcionado por la Facultad de Ingeniería

3.3 PRUEBAS DE HORNO DE CALENTAMIENTO

Una vez que el circuito eléctrico y el sistema de control se instalaron, se llevaron a cabo pruebas de calentamiento y enfriamiento del horno. Estas pruebas tienen por objeto, conocer las características reales de operación de conjunto del horno de calentamiento, controles de temperatura y circuito eléctrico.

Es importante observar también, los efectos de temperatura que se producen en la superficie del horno.

3.3.1 LEVANTAMIENTO DE TEMPERATURA

En la carcasa exterior, se encuentra un orificio, por el cual, se puede introducir un termopar, cuya punta llega a estar muy cerca de las espiras de la resistencia. Esto es, con el objeto de medir simultáneamente la temperatura del elemento de calefacción y el de la cámara de calentamiento.

Al realizar la prueba de levantamiento de temperatura en la cámara y en la resistencia, se encontró que ésta última, permanece por debajo de la temperatura de la cámara. Esto se debe a que en la cámara existe mayor concentración de calor.

En la figura 3-6, se muestra la gráfica de incremento de temperatura, en la cámara de calentamiento y en la resistencia.

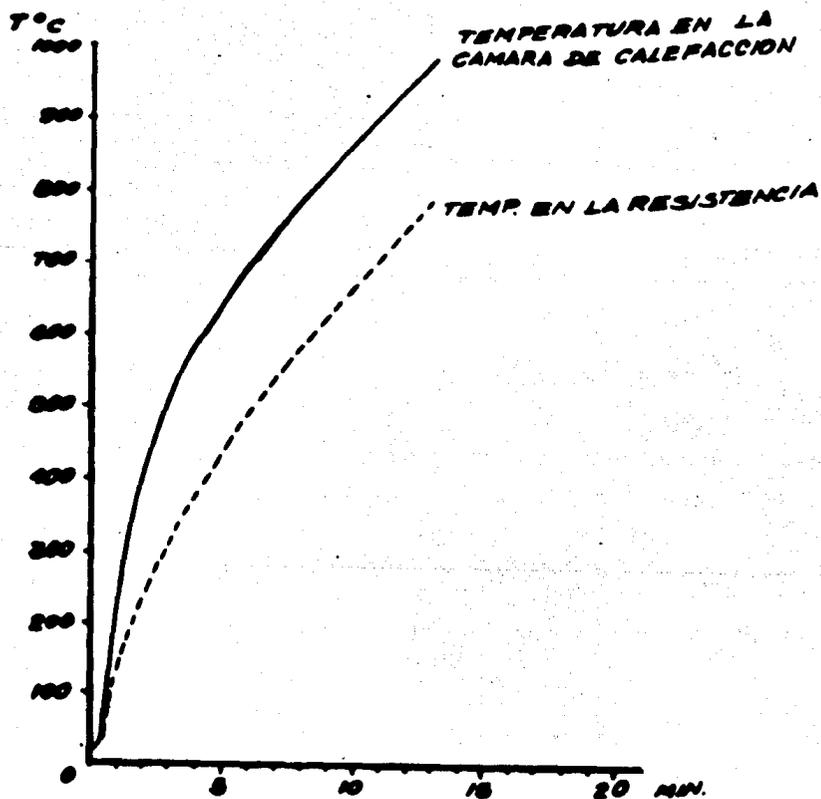


Figura 3-6 Curvas de incremento de temperatura en la cámara de calentamiento y en la resistencia del horno eléctrico, utilizando un voltaje de 120V.

Estas curvas indican que la resistencia trabajará a una temperatura por debajo de la temperatura máxima de operación del alambre Kanthal A-1 #15.

3.3.2 VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO EN EL HORNO

En las figuras 3-7 y 3-8, se ilustran los datos obtenidos al efectuar las pruebas de calentamiento y enfriamiento en la cámara del horno. En la primera gráfica, se pueden observar las diferentes velocidades para el voltaje regulable en el triac del círculo.

En la prueba del pirómetro, se pudo observar que la temperatura de la cámara de calentamiento, cuando se desea mantenerlo a 1000°C, el indicador de temperatura, oscila entre 985°C y 1019°C. Con la señal de temperatura del pirómetro, el relevador magnético del circuito de la resistencia deja pasar corriente durante 40 segundos, tiempo en el que la cámara alcanza los 1019°C, después se interrumpe el paso de corriente, durante aproximadamente 25 segundos, que es el tiempo en que la temperatura desciende hasta 985°C.

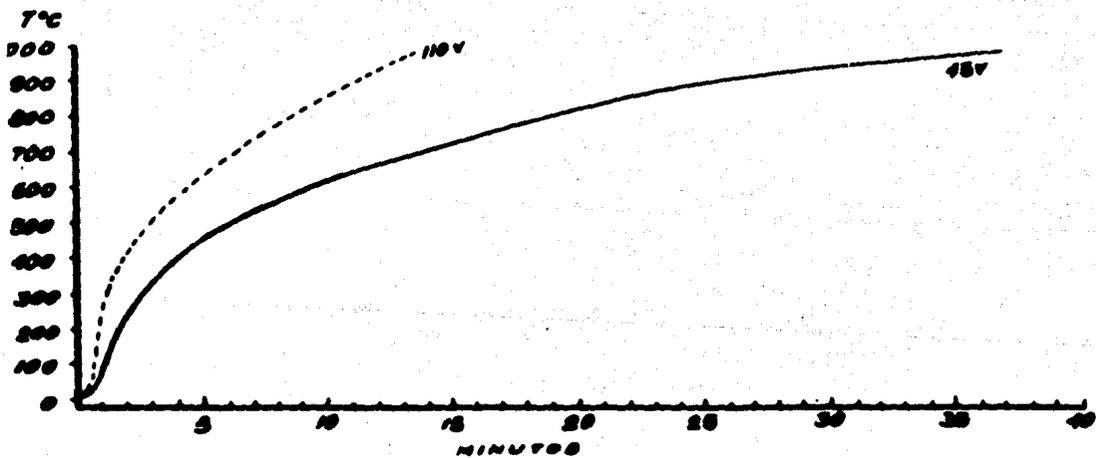


Figura 3-7 Curva de Incremento de temperatura en la cámara de ca lefacción, con diferentes voltajes.

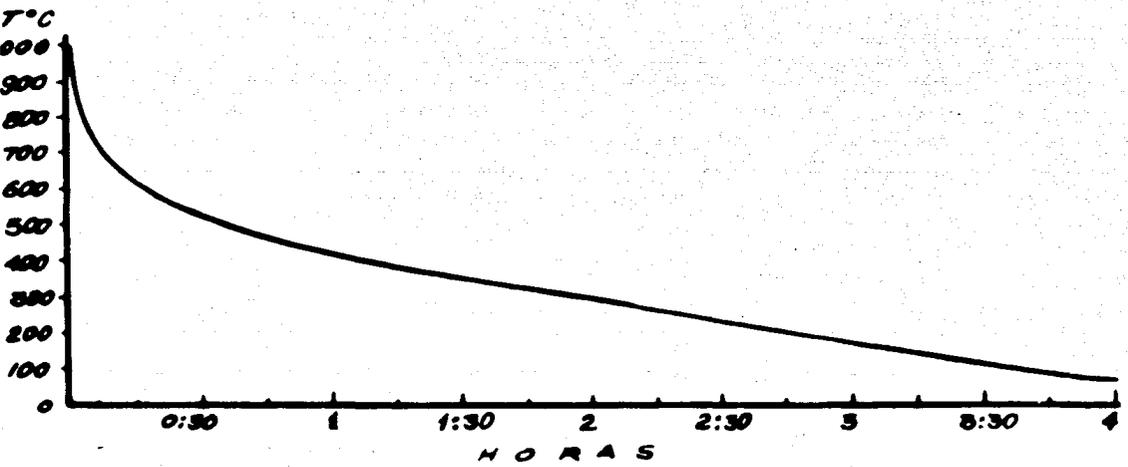


Figura 3-8 Curva de enfriamiento libre en el interior de la cámara de calentamiento del horno eléctrico

C A P I T U L O I V - INSTRUCTIVO DE MANEJO DEL DI
LATOMETRO

4.1 INSTALACION

El dilatómetro se instalará en un lugar todo lo exento de vibraciones, que pueda mantenerse. Durante los trabajos dilatométricos, es recomendable que la temperatura sea uniforme de $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, a fin de poder controlar el punto luminoso en la pantalla del dilatómetro.

El equipo se conectará a la red de energía eléctrica con tensión de 120 V.

El sistema de refrigeración requiere de una tubería de agua y el correspondiente desagüe.

4.2 MANEJO Y AJUSTE DEL DILATOMETRO

4.2.1 TABLERO DE INSTRUMENTOS

El dilatómetro cuenta con 2 pirómetros que registran las temperaturas del horno de calentamiento y el horno auxiliar. Una pantalla con escala graduada para medir dilatación.

El foco piloto rojo, indica cuando está encendido, que hay corriente en el circuito. El equipo queda apagado mediante el interruptor general. El segundo interruptor de izquierda a derecha energiza la lámpara del proyector.

En el extremo superior izquierdo de los pirómetros, se encuentran los pilotos que indican si hay corriente en el horno (verde) o si el horno está apagado (rojo). La aguja roja del relevador del pirómetro que tiene

por objeto detener el ascenso de temperatura en el horno, puede ajustarse mediante el botón de selección de temperatura. La aguja verde indica la temperatura en la cámara de calefacción del horno.

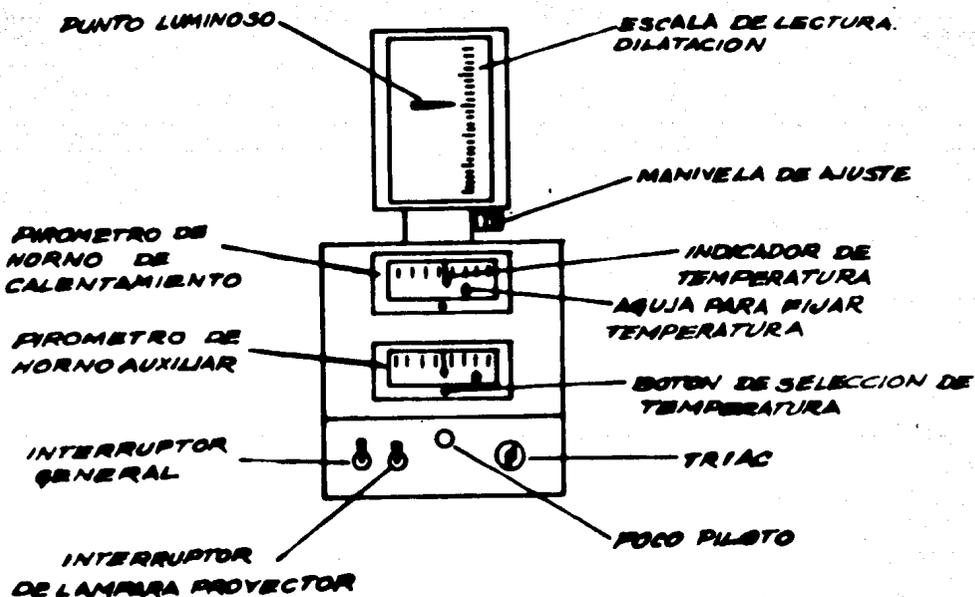


Figura 4-1 Disposición de instrumentos en el tablero de control y pantalla.

4.2.2 MONTAJE DE PROBETA DE ESTUDIO

Los hornos deben moverse para permitir el acceso al alojamiento de la muestra en el tubo de cuarzo. Moviendo lentamente la barra de cuarzo hacia arriba, queda espacio para colocar la probeta en el tubo, cuidando que el extremo con la punta, quede hacia abajo y que la punta inferior de la barra de cuarzo ajuste en el orificio superior de la probeta.

4.2.3 LAMPARA PROYECTOR Y PUNTO LUMINOSO

El foco del proyector se enciende en el tablero de instrumentos, en caso de que el punto luminoso no aparezca en la pantalla, se debe girar la manivela en la dirección de descenso, hasta que el punto aparezca en la pantalla. El enfoque del punto luminoso, se logra por medio de la palanca de foco, colocada en el cilindro del proyector.

4.2.4 CALIBRADO DE LAS DILATACIONES EN LA PANTALLA

Una vez que la probeta de estudio ha sido colocada en el alojamiento del tubo de cuarzo y que la barra está en contacto con ella, se enciende el proyector y se afoca el punto luminoso; posteriormente, se hace girar la manivela de ajuste que se encuentra en el costado derecho, hasta que el punto luminoso coincide con el cero de la escala.

4.2.5 SELECCION DE AMPLIFICACION

La palanca de espejo cuenta con dos marcas en la superficie de apoyo de la barra de cuarzo, una de ellas a 6 cm. del eje de la palanca y la otra a 3 cm., de la posición de contacto de la barra de cuarzo, en estas posiciones dará una amplificación de 100:1 y 200:1, respectivamente.

Para cambiar la amplificación, es necesario aflojar los tornillos del soporte de espejo y deslizar el soporte para colocarlo en la marca de amplificación deseada.

La escala para amplificación de 1:100, está marcada con divisiones de 1 mm. que representan una deformación de 0.01 mm. en la longitud de la probeta.

4.3 OBTENCION DE CURVAS

Utilizando el horno de calentamiento se inicia la prueba anotando los valores marcados por el punto luminoso en la escala de dilatación y las diferentes temperaturas marcadas por la aguja roja en el pirómetro del horno

Con ayuda de un cronómetro se puede anotar el tiempo para las diferentes temperaturas y transformaciones.

El enfriamiento se realiza ya sea, en la cámara del horno de calentamiento o con la ayuda del horno auxiliar.

Para elegir el procedimiento de registro de temperatura, habrá de tomarse en cuenta los siguientes puntos de vista.

Los procesos (exotérmicos o endotérmicos), tales como transformaciones reticulares y otras variaciones de fase, implican una medición de temperatura en la propia muestra, mediante un termopar. Este se sujeta a la muestra con un punto de soldadura, o de no ser así, se pondrá todo lo más posible en contacto con la muestra de estudio.

El gradiente de temperatura tiempo, influye decisivamente en la clase de registro de temperatura, en algunos casos, la diferencia entre la temperatura de la muestra y el recinto del horno, se pondrá tanto más claramente de manifiesto, cuanto más de prisa se caliente o se enfríe el horno.

Antes de registrar la curva en el dilatómetro, es aconsejable anotar las condiciones en que se realizará el ensayo, tales como:

Clase del metal objeto de ensayo
Longitud de las varillas de muestra
El aumento utilizado
La duración de la prueba
La velocidad de caldeo o enfriamiento
El tipo de enfriamiento (agua, aceite, aire, etc.)

4.3.1 OBTENCION DEL DIAGRAMA T-T-T O CURVA "S"

El diagrama T-T-T, consiste en graficar en un papel con escala logarítmica, los datos obtenidos del dilatómetro al someter la probeta de estudio a un enfriamiento.

En la figura 4-2 y 4-3, se muestra la gráfica deformación-temperatura de una probeta que es calentada hasta una temperatura de 850°C y después enfriada con diferentes medios de enfriamiento.

Para obtener el diagrama T-T-T, una vez calentada la probeta, ésta es introducida en un medio a temperatura constante, observando en la pantalla la variación en longitud y el tiempo a que se presenta discontinuidad de la curva dilatométrica.

Estas variaciones indican el principio y el final de la transformación de austenita en la probeta de estudio. La figura 4-4, muestra el diagrama T-T-T, donde se indican los puntos de inicio y final de la transformación de una probeta introducida en un medio a 600°C. Para obtener los otros puntos de la curva es necesario efectuar enfriamientos a otras temperaturas.

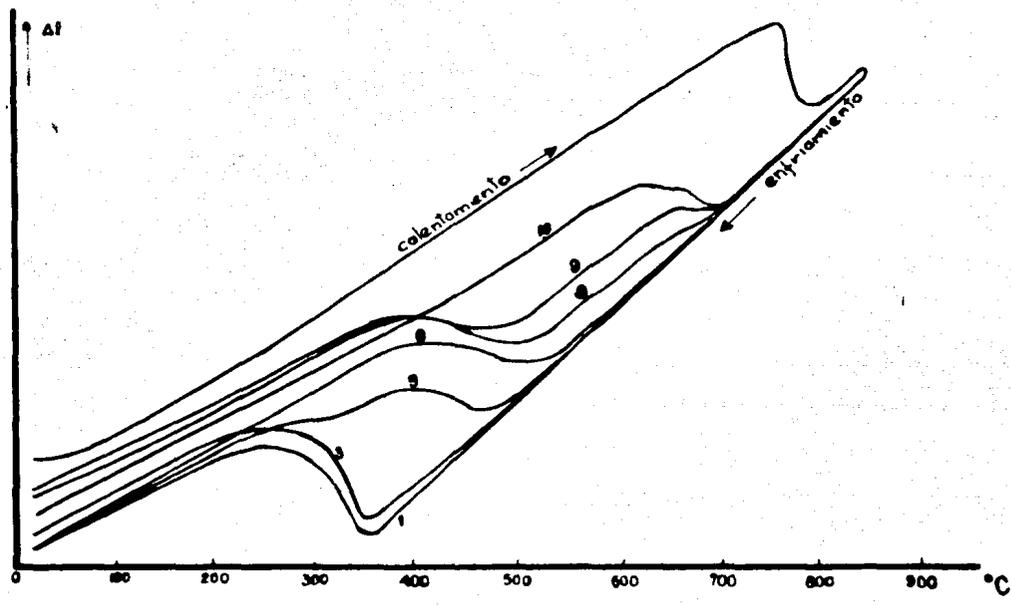


Figura 4-2

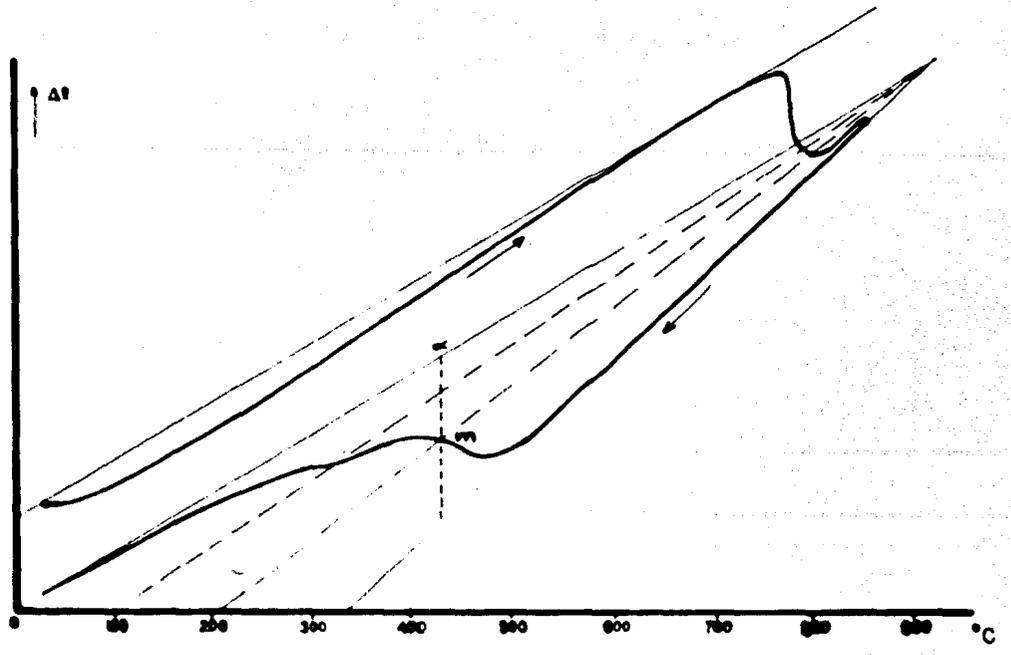


Figura 4-3

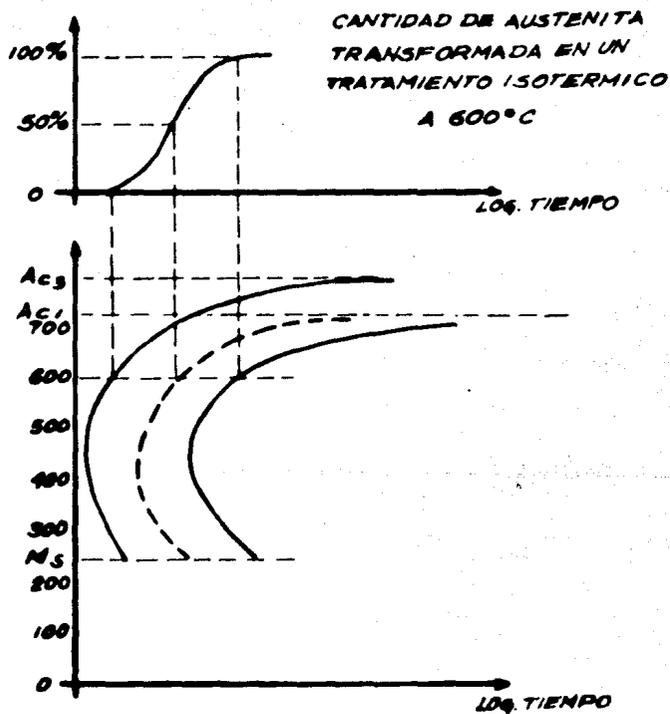


Figura 4-4

4.3.2 OBTENCION DEL DIAGRAMA T-C-R

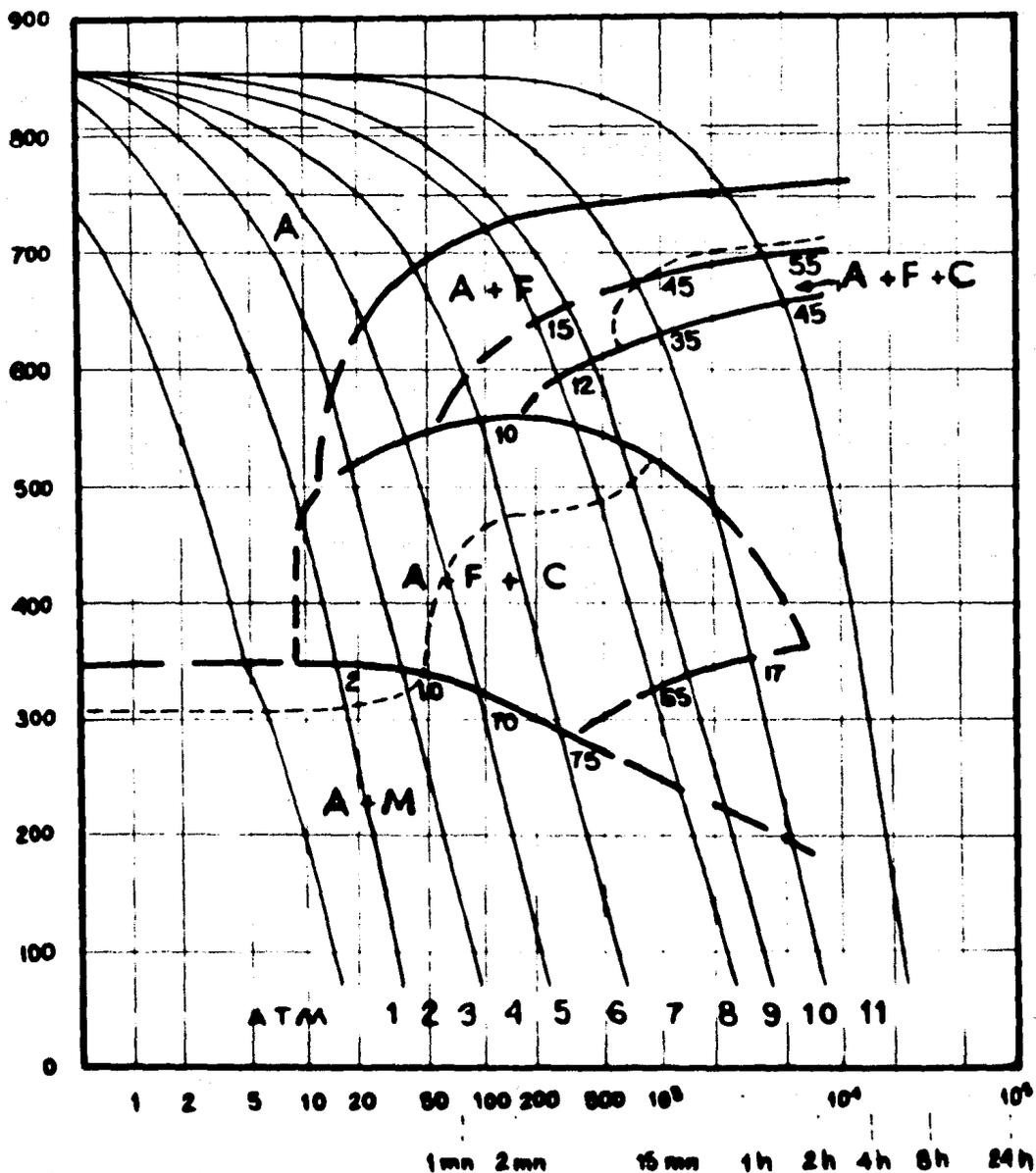
Se conocen como curvas T-C-R o C-C-T (Continuous Cooling Transformation), a las curvas obtenidas al someter la probeta de estudio a un enfriamiento en diferentes medios. La figura 4-2, muestra las diferencias de transformación de una probeta de acero para diferentes medios. La figura 4-5 muestra las curvas de enfriamiento, utilizando para el tiempo, una escala logarítmica. En la figura 4-3, se puede observar la variación de longitud de una probeta enfriada en aire libre desde una temperatura de 850°C. Al llegar a 540°C, la curva dilatométrica tiene una variación, lo que indica que en este punto se inicia la transformación. El punto (m), representa el 50% de la transformación.

Estos datos se grafican en la figura 4-5, obteniéndose así los puntos de transformación para el enfriamiento continuo en aire libre. En la misma forma, se grafican los puntos para enfriamiento en agua, aceite, etc., obteniéndose así los puntos de las curvas que forman el diagrama T-C-R.

Para realizar el estudio y obtención del diagrama T-C-R, es recomendable que un termopar esté colocado lo más cerca posible de la posible probeta, o si es necesario, soldado a ésta para que en el momento de enfriar la probeta, la lectura de temperatura en el pirómetro sea lo más real posible.

Es conveniente hacer un pequeño barrenado en la probeta para introducir la punta del termopar (a presión), para que éste permanezca fijo a la probeta en el momento de subir y bajar el horno de calentamiento.

- | | | |
|----------------|--------------|-------------------------|
| 1 Agua | 5 Aire libre | 9 Horno abierto+Aislan |
| 2 Aceite | 6 Aislante 2 | te 2 |
| 3 Aire soplado | 7 Aislante 3 | 10 Horno Medio Abierto |
| 4 Aire soplado | 8 Aislante 5 | 11 Horno cerrado+Aislan |
| | | te 5 |



C A P I T U L O V - CONCLUSIONES

Considerando que los fenómenos dilatométricos son de gran utilidad para el estudio de los materiales metálicos, resulta interesante que los alumnos de la Facultad de Ingeniería complementen la parte teórica de sus estudios con trabajos de laboratorio, efectuando prácticas y pruebas de dilatometría, ya que de esta forma se ilustra claramente la aplicación de las curvas de transformación y el concepto y procesos de templado del acero que viene a ser uno de los metales con mayor aplicación en la ingeniería.

Los trabajos de construcción del dilatómetro, realizados en el laboratorio de procesos de manufactura de la Facultad de Ingeniería, indican que es posible efectuar, en estas instalaciones la construcción de cierto tipo de equipos de laboratorio, si no en su totalidad, sí en gran parte. Estos equipos serían de gran utilidad para el trabajo de profesores y estudiantes

Se puede afirmar, que es conveniente investigar cuales son los equipos y aparatos que requiere la Universidad y estudiar la posibilidad de diseñar y construir algunos de estos equipos, tomando en cuenta que el costo de los mismos, sería bajo, en comparación con los precios de mercado de equipos similares. El diseño de los sistemas y dispositivos de los equipos construidos en la U.N.A.M., quizá no resultaría tan complejo y sofisticado, como los adquiridos de importación o con marcas mundialmente conocidas; pero si cumplirían con los fines didácticos, para los que fueron diseñados.

El dilatómetro servirá como punto de partida, para el diseño de sistemas y dispositivos con los que se pueda obtener información más clara y precisa de los fenómenos dilatométricos. Algunos de los sistemas pueden ser los graficadores de temperatura y dilatación, contador y graficador de tiempo.

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

LAWRENCE H VAN VLACK

MATERIALES PARA LA INGENIERIA
1973 - EDITORIAL CONTINENTAL
MEXICO

ROBERT E. REED-HILL

PRINCIPIOS DE METALURGIA FISICA
1976 - EDITORIAL CONTINENTAL
MEXICO

GEORGE L KEHL

"THE PRINCIPLES OF METALLOGRAPHIC
LABORATORY PRACTICE"
1949 - MACGRAW HILL BOOK COMPANY INC.

LUCCHESI DOMENICO

METALO TECNICA
1973 - EDITORIAL LABOR

MYRON L BEGEMAN

PROCESOS DE FABRICACION

B. H. AMSTEAD

1973 - EDITORIAL CONTINENTAL
MEXICO

KODAK MEXICANA

KODAK REFERENCE HANDBOOK
1970

H. E. WHITE

FISICA MODERNA UNIVERSITARIA
1965 - UTHEA
ESPAÑA