

2 Ej. No. 5



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

## T E S I S

**INFLUENCIA DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO EN LA PRUEBA  
JOMINY**

**VICTOR JORGE CORTES SUAREZ**

**INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

**México, D. F.**

**1984**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## INDICE

<b>CAPITULO I:</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO II:</b>	<b>Generalidades Teóricas</b>	
	2.1 Templabilidad .....	2
	2.2 Factores que influyen en la templabilidad .....	2
	2.3 Métodos para determinar la templabilidad .....	6
	2.4 Prueba de templabilidad .....	9
	2.5 Importancia de la templabilidad ...	11
<b>CAPITULO III:</b>	<b>Modelo Matemático</b>	
	3.1 Análisis térmico del ensayo Jominy .....	16
	3.2 Introducción .....	16
	3.3 Nomenclatura .....	17
	3.4 Secuencia de cálculo .....	19
	3.5 Obtención de las ecuaciones de cálculo .....	20
	3.6 Cálculo de la temperatura en los puntos extremos .....	26
	3.7 Evaluación de los flujos axial y radial de energía térmica .....	33
	3.8 Programa Jominy .....	35
<b>CAPITULO IV:</b>	<b>Desarrollo Experimental</b>	
	4.1 Material experimental .....	44
	4.2 Diseño del dispositivo .....	46
	4.3 Procedimiento experimental .....	47
<b>CAPITULO V:</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>50</b>

**CAPITULO VI:      Discusión .....73**

**CAPITULO VII:    Conclusiones y**  
**Recomendaciones .....77**

**Bibliografía .....79**

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

**I N T R O D U C C I O N**

La templabilidad es una propiedad intrínseca particular de los aceros y es una herramienta útil para el Ingeniero - Metalúrgico dedicado a los Tratamientos Térmicos, porque ayuda a predecir las características mecánicas de piezas tratadas, a la selección de un acero, así como al diseño de equipo para sistemas de temple y revenido.

En el presente trabajo se desea conocer la influencia de la forma de enfriamiento sobre el perfil de dureza obtenido mediante el ensayo Jominy, procedimiento muy sencillo de realizar por la fácil preparación de la muestra, ejecución y sobre todo la información que proporcionan los resultados obtenidos.

El estudio está desarrollado en dos partes, las cuales comprenden: 1) Las generalidades teóricas, que incluyen los conceptos básicos sobre la templabilidad y además se propone un modelo matemático que analiza al ensayo Jominy como un fenómeno de Transferencia de Calor, esto como un punto de referencia para discutir resultados y 2) El desarrollo experimental del modelo, registrando curvas de enfriamiento de temperatura contra tiempo en diferentes puntos de la muestra.

**CAPITULO II**

**GENERALIDADES**

**TEORICAS**

## 2.1 TEMPLABILIDAD.

El término "templabilidad", hace algunos años era comúnmente utilizado, pero sin un significado muy definido; en general, su significado parecía incluir dos características distintas: (a) máxima dureza obtenida en el temple, y (b) profundidad de endurecimiento. La primera de ellas puede ser expresada simple y cuantitativamente por el valor de dureza de acuerdo con cualquier método de prueba reconocido. El factor de penetración era indicado por distintos métodos, los cuales no eran ampliamente utilizados por no estar normalizados, por lo que generalmente la medida de la penetración no era aceptada.

La templabilidad de un acero actualmente, puede ser definida como aquella propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza inducida por el temple.

También puede ser definida sobre las bases de la microestructura desarrollada por el temple, tal como la profundidad a la cual la austenita se transforma a 50% martensita más 50% de otros productos de transformación o al 90% de martensita. El criterio del 50% martensita es la más comúnmente utilizado porque es más fácil determinarla por metalografía y es el punto donde la dureza cambia más rápidamente. De acuerdo a la gráfica Jominy el valor de templabilidad está dado por el punto de inflexión de la curva, mostrado en la Fig. No. 2.1.

## 2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TEMPLABILIDAD.

La templabilidad es alterada por varios factores, tales como: con



tenido de carbono, elementos de aleación, tamaño de grano austenítico, inclusiones no-metálicas. Para este caso sólo se estudiará la influencia del contenido de carbono y el tamaño de grano austenítico.

Influencia del contenido de carbono.- Es el principal elemento -- que influye debido a que la dureza intrínseca del acero depende de la cantidad de martensita formada; y la dureza de la martensita está determinada -- por el contenido de carbono. En otras palabras, la dureza máxima alcanzada por el temple en el acero es función solamente de su contenido de carbono, y los otros elementos junto con el tamaño de grano austenítico, determinan la facilidad o la dificultad con la cual ésta máxima dureza potencial puede ser obtenida.

La templabilidad y la dureza aumentan con el incremento del contenido de carbono a un valor máximo, después del cual disminuye con el aumento de carbono. Esta disminución se debe al efecto de nucleación del exceso de carburos insolubles sobre la descomposición de la austenita durante el temple, estos dos comportamientos se ilustran en las Figs. Nos. 2.2 y 2.3.

Influencia de los elementos de aleación.- Los elementos disueltos en la austenita colaboran con la templabilidad, pero el grado de influencia es absolutamente diferente, pequeños porcentajes de algunos elementos afectan en igual forma que grandes porcentajes de otros. La homogeneidad de la austenita también ejerce una influencia sobre la templabilidad; cuando la austenita es rica en aleantes en algunas zonas más que en otras, la templabilidad disminuye porque las zonas pobres en aleantes se transforman a per-

lita fina a altas velocidades de temple y es difícil obtener -- una martensita pura. De otra manera, las regiones ricas en aleantes se transforman lentamente y originan la martensita a baja velocidad de temple. En general, podríamos decir que la adición de los elementos de aleación en el acero, favorecen el temple, ya sea aisladamente o en combinación, normalmente hace aumentar la templabilidad, es decir, ayuda a la susceptibilidad del acero para endurecerse a menores velocidades de enfriamiento. Los elementos que se segregan forman carburos, difundiendo lentamente y oponiéndose a la homogenización, actuando como centros de nucleación para la perlita e impiden el crecimiento del grano.

Influencia del tamaño de grano austenítico.- En un acero al carbono, la templabilidad es una función del tamaño de grano austenítico existente en el momento del temple. El tamaño de grano tiene tal efecto porque ejerce un control sobre la capacidad de nucleación de la perlita. La mayoría de núcleos para la transformación Ar (temperatura crítica de transformación durante el enfriamiento) la cual debe evitarse durante el endurecimiento, son formados en los límites de grano de la austenita, y los granos finos proporcionan una gran superficie de límite de grano, por lo que debe evitarse.

Al aumentar el tamaño de grano de la austenita, se muestra más lenta la transformación de austenita a perlita en el diagrama T.T.T.; en--

otras palabras, la penetración de temple debida al crecimiento de grano austenítico es originada por el desplazamiento "hacia la derecha" de la nariz de la curva del diagrama T.T.T., en la dirección de transformación más lenta. Esto se ve bien claro en la Fig. No. 2.4, la cual muestra, para un mismo acero, cómo es más lenta la transformación cuando el acero ha sufrido un crecimiento del grano por calentamiento a temperaturas mayores en la zona austenítica.

**Influencia de las inclusiones no-metálicas.**- También las partículas extrañas estimulan o sirven como centros de nucleación para la transformación perlítica. Por tanto, también las inclusiones restringen el crecimiento del tamaño de grano, tienen influencia directamente sobre la templabilidad.

En resumen, podríamos citar los factores que tienen una influencia fundamental sobre la templabilidad:

A) Disminuyen la templabilidad.- Factores que activan la nucleación:

- 1.- Grano fino de la austenita.
- 2.- Inclusiones insolubles.
  - a) Carburos o nitruros.
  - b) Inclusiones no-metálicas.
- 3.- Heterogeneidad de la austenita.

B) Incrementan la templabilidad.- Factores que retardan la nucleación o crecimiento de productos Ar de los núcleos:

- 1.- Elementos disueltos en la austenita.
- 2.- Grano grueso de la austenita.
- 3.- Homogeneidad de la austenita.

Uniendo estos dos párrafos sin respetar el grado de influencia,--  
tenemos 5 principales, pero interrelacionados factores:

- 1.- Composición promedio de la austenita.
- 2.- Homogeneidad de la austenita.
- 3.- Tamaño de grano de la austenita.
- 4.- Inclusiones no-metálicas en la austenita.
- 5.- Carburos insolubles y nitruros en la austenita.

#### 2.3 METODOS PARA DETERMINAR LA TEMPLABILIDAD.

Como el comportamiento de los aceros en el temple es de gran interés para decidir su utilización, se han desarrollado numerosos procedimientos para ponerlos de manifiesto.

Entre los más utilizados son:

- 1.- El examen de la fractura de barras templadas.
- 2.- El estudio de las curvas de dureza o de resistencia en el interior de barras templadas.
- 3.- Ataque químico de las secciones transversales templadas.
- 4.- La determinación de la zona 50% martensita.
- 5.- La prueba Jominy.
- 6.- Método de Grossman.

7.- Desarrollo de fórmulas utilizando el Método de Análisis de --  
Regresión Múltiple.

A continuación se describen brevemente.

1.- Exámen de la fractura de barras templadas. Es uno de los pro-  
cedimientos más antiguos. Consiste en preparar una serie de probetas cilín-  
dricas (19.05 mm de diámetro y 125 mm de largo), son templadas a temperatu-  
ras de 790, 815 y 850°C. Después se rompen por choque y se examinan las ---  
fracturas, por la diferencia entre el grano de fractura generalmente grueso  
en la zona central (sin templar), y fino en la periferia (templado), se co-  
noce fácilmente la profundidad del temple.

2.- Estudio de las curvas de dureza o de resistencia en el inte--  
rior de barras templadas. Este método consiste en determinar después del --  
temple la dureza en el interior de redondos de acero. Se preparan una serie  
de barras de 6 medidas escalonadas por forja o laminación, que posteriormen-  
te son templadas y a continuación se cortan las barras y se determinan las-  
durezas en la sección transversal, desde la periferia al centro dan los re-  
sultados obtenidos, se pueden obtener las curvas de dureza, comúnmente cono-  
cidas como "Curvas U". Con lo que respecta a la prueba de resistencia, se -  
obtienen de las barras redondas una serie de probetas para realizar el ensa-  
yo de tracción. Estas probetas se obtienen de las diferentes zonas de la ba-  
rra que ha sido templada previamente.

3.- Ataque químico de las secciones transversales templadas. Co--  
siste en observar las secciones transversales de redondos de aceros que han

sido templados y posteriormente fracturadas y atacadas con ácido. Los redondos una vez templados y preparados se atacan con  $\text{HNO}_3$  al 5% (Nital 5), observándose que la zona templada queda sin atacar y clara.

4.- Determinación de la zona 50% martensita. Existen cuatro métodos para el cálculo del 50% martensita.

a) El método de fractura y ataque químico con ácido, en aquellos aceros donde la transición de la zona dura a la blanda (50 a 55 HRC) es brusca. Aquí la zona 50% martensita se encuentra en el límite de separación del grano grueso que corresponde en las secciones atacadas al límite entre la zona blanca y la negra.

b) El método metalográfico, para determinar con precisión las zonas del 50% de martensita.

c) Otro método consiste en tomar la dureza en diversos puntos de la sección transversal de la barra templada y observando luego donde se obtiene una dureza determinada que corresponde al 50% martensita. Esta dureza se puede conocer con la ayuda de una gráfica en la que se dan las durezas que tienen los aceros al carbono cuando su estructura tiene un porcentaje determinado de martensita.

d) Otro procedimiento, consiste en encontrar el punto de inflexión de las curvas de dureza de las secciones transversales, que suele corresponder a la zona de 50% martensita con bastante aproximación.

5.- La prueba Jominy. Esta prueba se describe posteriormente, por ser tema de estudio.

6.- Método de Grossman. En esta técnica, se considera que un acero tiene una templabilidad base derivada del contenido de carbono y tamaño de grano austenítico. La templabilidad base es expresada como diámetro ---- ideal. Este diámetro ideal se multiplica por un factor de cada elemento a-- leante presente, este factor varía con la efectividad del elemento en incre<sup>u</sup>mento de la templabilidad y la concentración del elemento.

7.- Desarrollo de fórmulas utilizando el Método de Análisis de Re<sup>g</sup>resión Múltiple. Se desarrollaron estas fórmulas por correlación de la com<sup>o</sup>posición química promedio con la banda de dureza Jominy para una variedad - de aceros al carbono y aleados.

#### 2.4 PRUEBA DE TEMPLABILIDAD JOMINY.

Inicialmente las pruebas para la templabilidad involucraban el eg<sup>u</sup>stido de secciones transversales o la evaluación de durezas transversales - en secciones redondas, así como piezas de diversas configuraciones, común-- mente, estas aproximaciones son raras.

La técnica aceptada hoy día es el Método de Templabilidad del Ex<sup>o</sup>tremo Templado o Prueba Jominy; éste es muy superior a los demás métodos, - debido a que es un procedimiento muy sencillo para determinar la templabili<sup>l</sup>dad y los diámetros críticos real e ideal\*, a diferencia de los otros méto<sup>o</sup>dos los cuales requieren de ciertas muestras de diferente tamaño, además de que están restringidos en el tamaño de las mismas.

La Prueba Jominy es ampliamente utilizada para la determinación - de la templabilidad, por la sencillez de su ejecución, la fácil preparación

de la muestra y sobre todo la información que proporcionan los resultados obtenidos. El espécimen de prueba y el método se muestran en la Fig. No. -- 2.5. La prueba ha sido normalizada, ésta se encuentra en la D.G.N. con designación D.G.N.-320-1969. Al llevarse a cabo esta prueba, una muestra de 25.4 mm de diámetro y 102 mm de largo se calienta uniformemente a la temperatura adecuada de austenización, debidamente protegida contra la descarburización y oxidación. Después se saca del horno y se coloca en un dispositivo, donde un chorro de agua a 20-25 °C choca con la cara del extremo inferior de la muestra. Tanto el tamaño como la distancia del orificio al fondo de la muestra y la temperatura y circulación del agua están contemplados -- en la norma. Después de que la muestra ha estado en el dispositivo por lo menos 10 minutos, se quita de ahí y se maquinan dos superficies, paralelas longitudinalmente a una profundidad de 0.381 mm, tomándose las lecturas en la escala de dureza Rockwell C a intervalos de 1/16 de pulgada desde el extremo templado.

Los resultados se expresan como una curva de dureza contra distancia del extremo templado (Fig. No. 2.1).

Antes de realizar la prueba de dureza a la muestra, podemos examinar micrográficamente las variaciones de estructura que se obtienen sobre ella misma, cada punto de transición de una fase a otra corresponde a velocidades de enfriamiento que son altas en el extremo templado y disminuyen - al aumentar la distancia al extremo templado.



## 2.5 IMPORTANCIA DE LA TEMPLABILIDAD.

Es una de las herramientas más utilizadas por el Ingeniero Metalúrgico dedicado a los Tratamientos Térmicos de los aceros. Estas bandas -- ayudan a predecir la dureza y la resistencia de partes de aceros tratadas -- termicamente , a la selección de un acero común ó especial para el diseño -- de partes que requerirán tratamiento térmico, al diseño de equipo para sistema de temple y para el cálculo del diámetro crítico.

La información de las bandas de templabilidad junto con la del -- punto Ms (temperatura de inicio de transformación de austenita a martensita), diámetro crítico ideal y la dureza potencial, pueden resolver los siguientes problemas:

a) Condiciones de tratamiento de temple y revenido necesarios para lograr unas determinadas propiedades en el interior de la sección de un acero templado y revenido.

b) Selección de entre una serie de aceros, del óptimo para la fabricación de una determinada pieza.

c) Determinar equivalencias entre aceros de diferentes composiciones químicas.

d) Proyectar composiciones de acero para una aplicación determinada.

e) Tipificar (tipificación racional) aceros adecuados para satisfacer una gama determinada de necesidades en cuanto a valores de resistencia mecánica y de la templabilidad.

Debido a que el ensayo Jominy es actualmente el más utilizado universalmente, se exigen, hoy en día, aceros con bandas de templabilidad o con durezas Rockwell en puntos determinados de la curva Jominy.

\*Diámetro crítico real.- Es el diámetro de una barra redonda de acero que se transformaría a 50% martensita en el centro cuando es templada en un medio de severidad conocido.

\*Diámetro crítico real.- Es el diámetro de una barra redonda de acero que se transformaría a 50% martensita en el centro cuando es templada en un medio de severidad ideal.

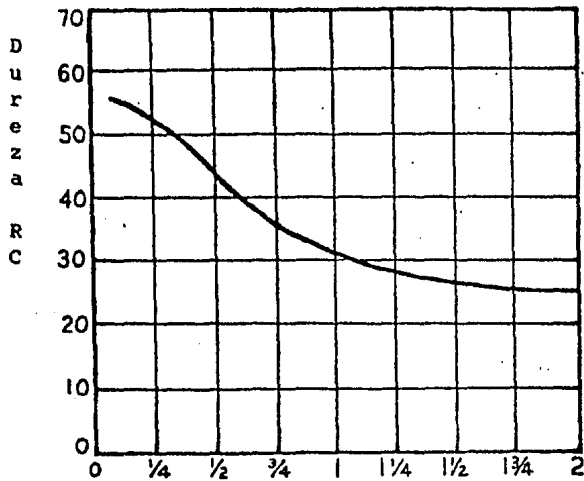
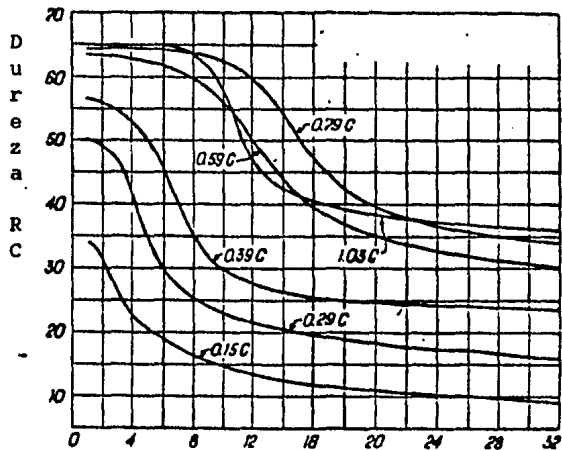


Fig. No. 2.1. Cálculo de la templabilidad a partir del punto de inflexión de la curva Jominy.

Distancia al extremo templado (pulg.)

Fig. No. 2.2. Influencia del contenido de carbono en la templabilidad.



D.E.T. (1/16")

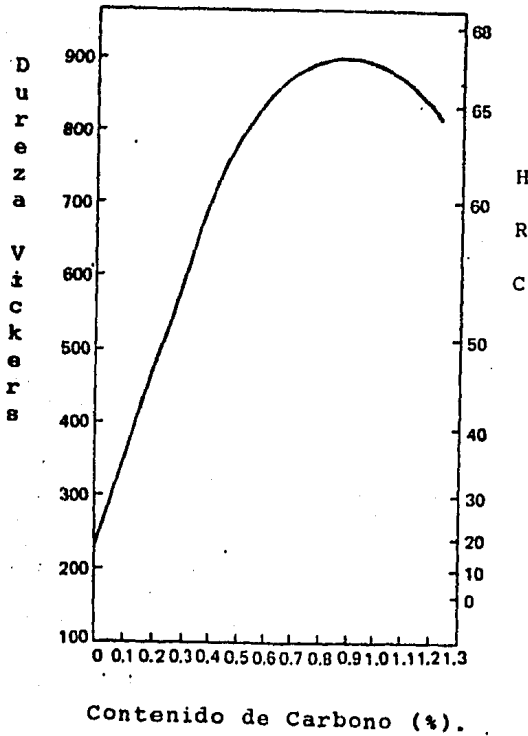
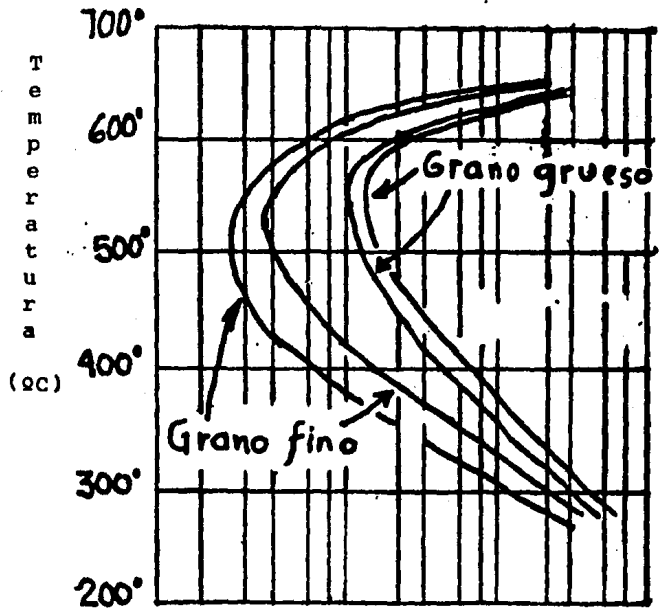


Fig. No. 2.3. Influencia del contenido de carbono en la propiedad de dureza.

Fig. No. 2.4. Influencia del tamaño de grano austenítico en el diagrama T.T.T.



Tiempo (segundos).

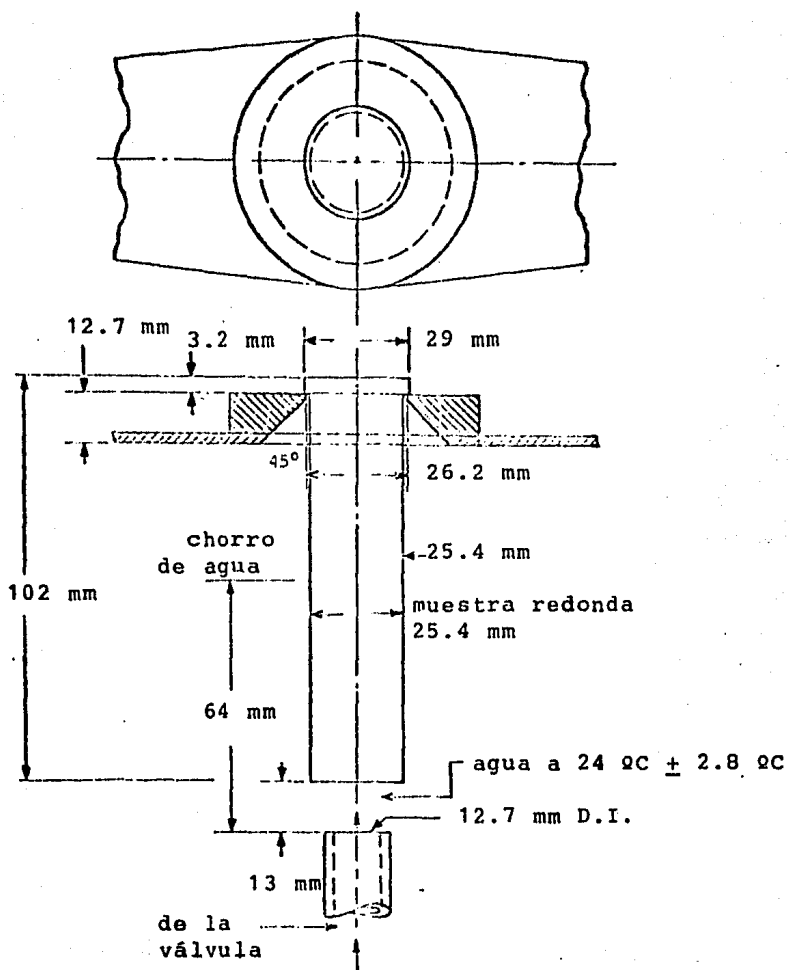


Fig. No. 2.5. Espécimen de prueba y norma para el ensayo Jominy.

CAPITULO III

MODELO

MATEMATICO

### 3.1 ANALISIS TERMICO DEL ENSAYO JOMINY.

### 3.2 INTRODUCCION.

El objetivo de este capítulo es el de proponer un modelo matemático que permita predecir los perfiles de temperatura en distintos puntos de la muestra Jominy, así como el flujo de energía en la misma.

Las consideraciones hechas para desarrollar dicho modelo son las siguientes:

a) Propiedades térmicas y físicas constantes (tanto de la muestra como del aire).

b) Transporte de energía por:

b.1 Conducción (en el interior de la muestra).

b.2 Convección:

b.2.1 Natural: Partes superior y lateral de la muestra.

b.2.2 Forzada: Parte inferior de la muestra.

b.3 Radiación: Partes superior, inferior y lateral de la muestra.

c) Por su naturaleza, se consideraron a los coeficientes de transferencia de calor por convección constantes.

d) El flujo por conducción se consideró:

d.1 Inestable.

d.2 Bidimensional: El flujo de calor es una función de las posiciones axial y radial.

e) No hay generación de energía térmica.

f) Por la naturaleza del problema (simetría axial), se resolvió -

la ecuación de conducción para la mitad de la muestra. La otra mitad es idéntica.

g) La resolución de la ecuación de conducción se realizó por una técnica numérica (Método de diferencias finitas, totalmente implícito).

### 3.3 NOMENCLATURA.

El sistema de coordenadas empleado es el cilindro. El sistema de referencia se ilustra en la Fig. No. 3.1.

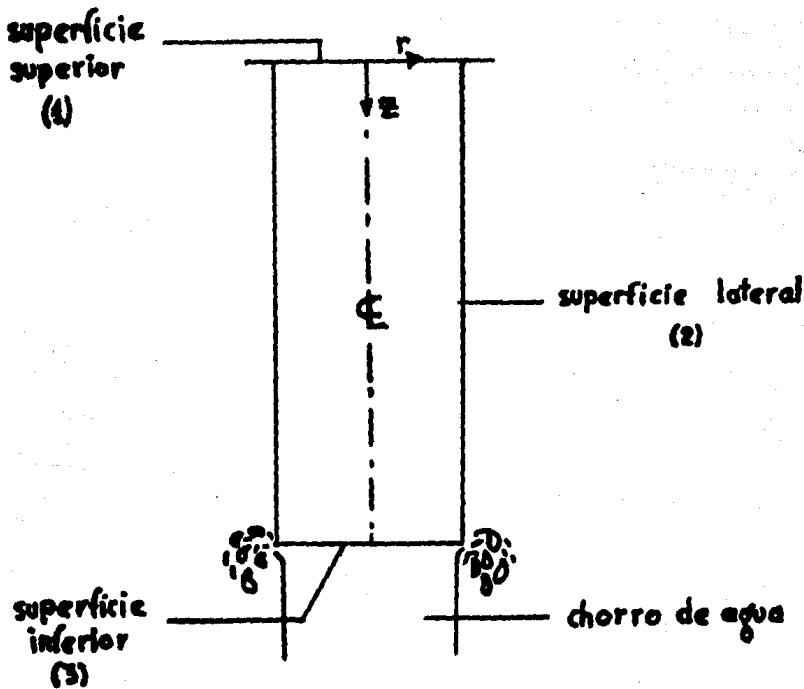


Fig. No. 3.1 Nomenclatura.



La notación para la temperatura en el interior de la muestra es:

$$T_{i,k}^j, \text{ donde:}$$

$j$  = Denota al nodo temporal.  $j = 0, \dots, 1$

$i$  = Denota al nodo axial.  $i = 0, \dots, n$

$k$  = Denota al nodo radial.  $k = 0, \dots, m$

La notación para la temperatura en el exterior de la muestra es:

$T_1$  = Temperatura del medio en la parte superior de la muestra.

$T_2$  = Temperatura del medio en la parte lateral de la muestra.

$T_3$  = Temperatura del medio en la parte inferior de la muestra.

Los correspondientes coeficientes de transferencia de calor por -  
convección, radiación y globales son:

$h_1, hr_1, hc_1$  = Convección, radiación y combinado o global. Parte superior.

$h_2, hr_2, hc_2$  = Convección, radiación y combinado o global. Parte lateral.

$h_3, hr_3, hc_3$  = Convección, radiación y combinado o global. Parte inferior.

Otras variables:

$t$  = Tiempo.

$\alpha$  = Difusividad térmica del acero.

$k_T$  = Conductividad térmica del acero.

$R$  = Radio de la muestra Jominy.

$Z$  = Longitud de la muestra Jominy.

$\Delta t$  = Incremento finito de tiempo.

$\Delta r$  = Incremento finito de posición radial.

$\Delta z$  = Incremento finito de posición axial.

$\Delta \theta$  = Incremento finito de posición angular.

$q_{0,k}^j$  = Flujo de calor por la superficie superior, en la superficie radial k-ésima y en el tiempo j.

$q_{i,m}^j$  = Flujo de calor por la superficie lateral, en la superficie axial i-ésima y en el tiempo j.

$q_{n,k}^j$  = Flujo de calor por la superficie inferior, en la superficie radial k-ésima y en el tiempo j.

#### 3.4 SECUENCIA DE CALCULO.

Como ya se mencionó, la ecuación de conducción se escribe en diferencias finitas. Se obtiene un sistema de ecuaciones para cada posición radial. En este sistema de ecuaciones existen términos "independientes" cuyos valores dependen de la temperatura en un nodo radial anterior y en uno posterior (en el tiempo siguiente). Como dichas temperaturas se desconocen hay que suponerlas (se suponen iguales a las del tiempo anterior) para completar el sistema de ecuaciones. Se resuelven así los sistemas de ecuaciones correspondientes a los nodos radiales 1 hasta el m-1. Como las temperaturas supuesta y calculada difieren, es necesario repetir el procedimiento hasta que la diferencia mínima sea aceptable (esto requiere de 30 a 50 iteraciones).

Una vez conocidas las nuevas temperaturas en el interior, se calculan las del centro y superficie lateral de la muestra (en forma no iterativa), a continuación las de las superficies superior e inferior (excepto centro y esquinas) y finalmente las de los centros superficiales y esquinas (superior e inferior). Lo anterior se esquematiza en la Fig. No. 3.2.

C

4	3	3	3	3	4
2	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	2
2	1	1	1	1	2
4	3	3	3	3	4

Fig. No. 3.2 Secuencia de Cálculo

3.5 OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES DE CÁLCULO.

A continuación se resume el procedimiento y se presentan las ecuaciones de cálculo.

La ecuación de conducción, en coordenadas cilíndricas y flujo bidimensional es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

Cada término, escrito en diferencias finitas es:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i+1,k}^{j+1} - 2T_{i,k}^{j+1} + T_{i-1,k}^{j+1}}{\Delta z^2} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i,k+1}^{j+1} - 2T_{i,k}^{j+1} + T_{i,k-1}^{j+1}}{\Delta r^2} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i,k+1}^{j+1} - T_{i,k}^{j+1}}{k \Delta r^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,k}^{j+1} - T_{i,k}^j}{\alpha \Delta t} \dots\dots\dots(2.4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2) en (1), y reorganizando se obtiene:

ne:

$$a_i T_{i,k}^{j+1} = b_i T_{i+1,k}^{j+1} + c_i T_{i-1,k}^{j+1} + d_i \dots\dots\dots(3)$$

donde:

$$a_i = \frac{2}{\Delta z^2} + \frac{2}{\Delta r^2} + \frac{1}{k \Delta r^2} + \frac{1}{\alpha \Delta t}$$

$$b_i = \frac{1}{\Delta z^2}$$

$$c_i = \frac{1}{\Delta z^2}$$

$$d_i = T_{i,k+1}^{j+1} \left[ \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{k\Delta r^2} \right] + T_{i,k-1}^{j+1} \left[ \frac{1}{\Delta r^2} \right] + T_{i,k}^j \left[ \frac{1}{\alpha \Delta t} \right]$$

La ecuación (3) es válida para:

$$k = 1, \dots, m-1$$

$$i = 1, \dots, n-1$$

Las temperaturas  $T_{0,k}^{j+1}$ ,  $T_{i,0}^{j+1}$ ,  $T_{i,m}^{j+1}$ ,  $T_{n,k}^{j+1}$ , se obtienen en función de las condiciones de frontera correspondientes.

CONDICION DE FRONTERA 1.

(Parte superior de la muestra, excepto extremos  $r=0$ ,  $r=R$ ).

$$k_T \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = -h_1 \left[ T_1 - T(r,0,t) \right] + hr_1 \left[ T(r,0,t) - T_1 \right] \dots (4)$$

donde:

$$k_T \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = k_T \left[ \frac{T_{1,k}^{j+1} - T_{0,k}^{j+1}}{\Delta Z} \right]$$

$$T(r,0,t) = T_{0,k}^{j+1}$$

Igualando y despejando a  $T_{0,k}^{j+1}$  :

$$T_{0,k}^{j+1} = \frac{T_1 (h_1 + hr_1) + \frac{k_T}{\Delta Z} T_{1,k}^{j+1}}{\frac{k_T}{\Delta Z} + h_1 + hr_1} \dots\dots\dots(5)$$

CONDICION DE FRONTERA 2.

(Parte lateral de la muestra; excepto extremos,  $Z=0, z=z$ ).

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = -h_2 [T_2 - T(R,Z,t)] + hr_2 [T(R,Z,t) - T_2] \dots\dots(6)$$

donde:

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = -k_T \left[ \frac{T_{i,m}^{j+1} - T_{i,m-1}^{j+1}}{\Delta r} \right]$$

$$T(r,z,t) = T_{i,m}^{j+1}$$

Igualando y despejando a  $T_{i,m}^{j+1}$  :

$$T_{i,m}^{j+1} = \frac{T_2 (h_2 + hr_2) + \frac{k_T}{\Delta r} T_{i,m-1}^{j+1}}{\frac{k_T}{\Delta r} + h_2 + hr_2} \dots\dots\dots(7)$$

CONDICION DE FRONTERA 3.

(Parte inferior de la muestra, excepto en los extremos  $r=0$ , ----

$r=R$ ).

$$-k_T \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{z=Z} = -h_3 [T_3 - T(r,Z,t)] + hr_3 [T(r,Z,t) - T_3] \dots\dots(8)$$

donde:

$$-k_T \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{z=Z} = k_T \left[ \frac{T_{n,k}^{j+1} - T_{n-1,k}^{j+1}}{\Delta Z} \right]$$

$$T(r,Z,t) = T_{n,k}^{j+1}$$

Igualando y despejando a  $T_{n,k}^{j+1}$  :

$$T_{n,k}^{j+1} = \frac{\frac{k_T}{\Delta Z} T_{n-1,k}^{j+1} + T_3 (h_3 + hr_3)}{\frac{k_T}{\Delta Z} + h_3 + hr_3} \dots\dots\dots(9)$$

CONDICION DE FRONTERA 4.

(Eje central de la muestra, excepto los extremos, Z=0, z=Z).

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (\text{regla de L'Hopital}) \dots\dots\dots(10)$$

Con el resultado anterior, la ecuación de conducción es ahora:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + 2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \dots\dots(11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.4) en (11) se obtiene:

$$\frac{T_{i+1,k}^{j+1} - 2 T_{i,k}^{j+1} + T_{i-1,k}^{j+1}}{\Delta Z^2} + 2 \left[ \frac{T_{i,k+1}^{j+1} - 2 T_{i,k}^{j+1} + T_{i,k-1}^{j+1}}{\Delta r^2} \right] =$$

$$\frac{1}{\alpha} \left[ \frac{T_{i,k}^{j+1} - T_{i,k}^j}{\Delta t} \right] \dots\dots\dots(12)$$



donde  $k = 0$  (nodos centrales).

Rearreglando la ecuación anterior:

$$a_c T_{i,0}^{j+1} = b_c T_{i+1,0}^{j+1} + c_c T_{i-1,0}^{j+1} + d_c \dots\dots\dots(13)$$

donde:

$$a_c = \frac{4}{\Delta r^2} + \frac{1}{\alpha \Delta t} + \frac{2}{\Delta z^2}$$

$$b_c = \frac{1}{\Delta z^2}$$

$$c_c = \frac{1}{\Delta z^2}$$

$$d_c = \frac{4}{\Delta r^2} T_{i,1}^{j+1} + \frac{1}{\alpha \Delta t} T_{i,0}^j$$

(Recuérdese que  $T_{i,1}^{j+1} = T_{i,-1}^{j+1}$  por simetría).

3.6 CALCULO DE LA TEMPERATURA EN LOS PUNTOS EXTREMOS.

1. Cálculo en los puntos ( $z=0, r=R$ ) y ( $z=Z, r=R$ ). Se establece un balance de calor sobre un elemento situado en la esquina de la muestra, ver Fig. No. 3.3.

El balance establece que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flujo energético por} \\ \text{conducción hacia el} \\ \text{borde.} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Flujo energético por} \\ \text{convección y radia--} \\ \text{ción desde el borde.} \end{array} \right\}$$

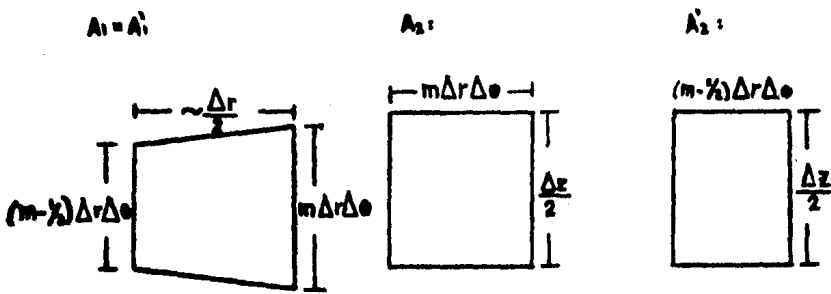
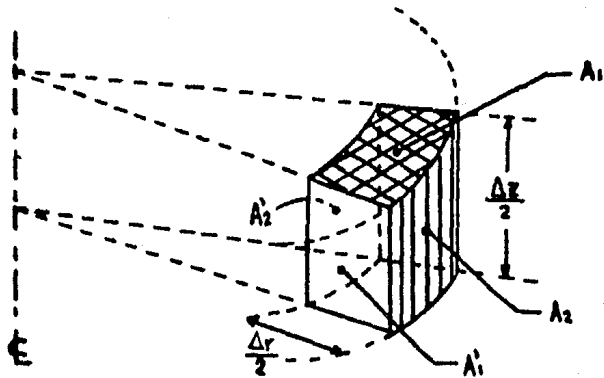


Fig. No. 3.3 Elemento de balance.

$$k_T \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} A'_2 - k_T \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} A_1 = -h_1 (T_{0,m}^{j+1} - T_1) A_1 + hr_1 (T_1 - T_{0,m}^{j+1}) A_1$$

$$-h_2 (T_{0,m}^{j+1} - T_2) A_2 + hr_2 (T_2 - T_{0,m}^{j+1}) A_2 \quad \dots (14)$$

Sustituyendo las derivadas por diferencias finitas y reorganizando:

$$k_T \left[ \frac{T_{0,m}^{j+1} - T_{0,m-1}^{j+1}}{r} \right] A'_2 - k_T \left[ \frac{T_{1,m}^{j+1} - T_{0,m}^{j+1}}{z} \right] A_1 =$$

$$-(h_1 + hr_1) (T_{0,m}^{j+1} - T_1) A_1$$

$$-(h_2 + hr_2) (T_{0,m}^{j+1} - T_2) A_2$$

Sustituyendo las áreas  $A_1, A_2, A'_2 \dots$

$$A_1 = \Delta \theta \Delta r^2 \frac{(4m-1)}{8}$$

$$A_2 = m \frac{\Delta r \Delta \theta \Delta z}{2}$$

$$A'_2 = \frac{(m-1)}{2} \frac{\Delta r \Delta \theta \Delta z}{2}$$

..... en la ecuación anterior se obtiene, después de despejar a  $T_{0,m}^{j+1}$  :

$$T_{0,m}^{j+1} = \frac{a_s T_{0,m-1}^{j+1} + b_s T_{1,m}^{j+1} + c_s T_1 + d_s T_2}{a_s + b_s + c_s + d_s} \quad \dots (15)$$

donde:

$$a_s = k_T \frac{(m-1/2) \Delta z}{2}$$

$$b_s = \frac{k_T}{\Delta z} \frac{\Delta r^2 (4m-1)}{8}$$

$$c_s = (h_1 + hr_1) \frac{\Delta r^2 (4m-1)}{8}$$

$$d_s = (h_2 + hr_2) \frac{m \Delta r \Delta z}{2}$$

Por analogía, la temperatura  $T_{n,m}^{j+1}$  se obtiene sustituyendo:

$$h_3 \longrightarrow h_1$$

$$hr_3 \longrightarrow hr_1$$

$$T_3 \longrightarrow T_1$$

$$T_{n,m}^{j+1} \longrightarrow T_{0,m}^{j+1}$$

$$T_{n,m-1}^{j+1} \longrightarrow T_{0,m-1}^{j+1}$$

$$T_{n-1,m}^{j+1} \longrightarrow T_{1,m}^{j+1}$$

resultando:

$$T_{n,m}^{j+1} = \frac{a_d T_{n,m-1}^{j+1} + b_d T_{n-1,m}^{j+1} + c_d T_3 + d_d T_2}{a_d + b_d + c_d + d_d} \dots\dots\dots(16)$$

donde:

$$a_d = k_T (m-1/2) \frac{\Delta z}{2}$$

$$b_d = \frac{k_T}{\lambda z} \Delta r^2 \frac{(4m-1)}{8}$$

$$c_d = (h_3 + hr_3) \Delta r^2 \frac{(4m-1)}{8}$$

$$d_d = (h_2 + hr_2) \frac{m \Delta r \Delta z}{2}$$

2. Cálculo de los puntos  $(z=0, r=0)$  y  $(z=Z, r=0)$ . Se establece un balance de calor sobre un elemento situado en la parte superior/inferior central de la muestra, ver Fig. No. 3.4.

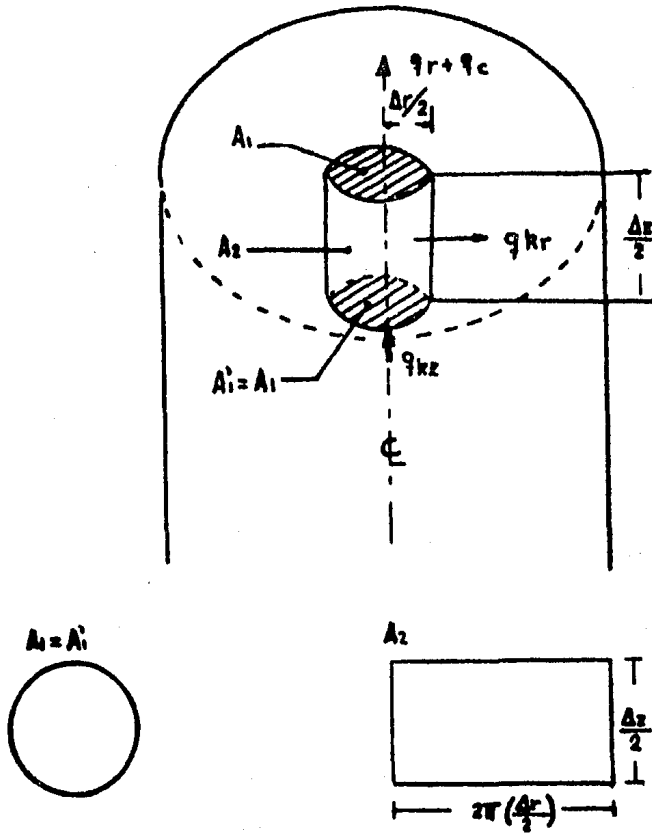


Fig. No. 3.4 Elemento de balance.

El balance establece que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flujo energético por} \\ \text{conducción hacia el} \\ \text{extremo.} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Flujo energético} \\ \text{por convección y} \\ \text{radiación desde} \\ \text{el extremo.} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Flujo energético} \\ \text{por conducción -} \\ \text{desde el extre-} \\ \text{mo.} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} -k_T \frac{\partial T}{\partial z} \\ \\ Z = \frac{\Delta z}{2} \end{array} \right| A_1 = -h_1 (T_{0,0}^{j+1} - T_1) A_1 + hr_1 (T_1 - T_{0,0}^{j+1}) A_1 +$$

$$\left. \begin{array}{l} k_T \frac{\partial T}{\partial r} \\ \\ r = \frac{\Delta r}{2} \end{array} \right| A_2 \dots \dots \dots (17)$$

Sustituyendo por diferencias finitas y reorganizando:

$$-k_T \left[ \frac{T_{0,1}^{j+1} - T_{0,0}^{j+1}}{\Delta r} \right] A_2 - k_T \left[ \frac{T_{1,0}^{j+1} - T_{0,0}^{j+1}}{\Delta z} \right] A_1 = -(h_1 + hr_1) A_1 * (T_{0,0}^{j+1} - T_1)$$

Sustituyendo las áreas  $A_1$  y  $A_2$  ...

$$A_1 = \pi \left( \frac{\Delta r}{2} \right)^2$$

$$A_2 = \pi \frac{\Delta r \Delta z}{2}$$

... en la ecuación anterior se obtiene, después de despejar a  $T_{0,0}^{j+1}$  :

$$T_{0,0}^{j+1} = \frac{a_p T_{0,1}^{j+1} + b_p T_{1,0}^{j+1} + c_p T_1}{a_p + b_p + c_p} \dots\dots\dots(18)$$

donde:

$$a_p = k_T \Delta Z$$

$$b_p = k_T \frac{\Delta r^2}{2 \Delta Z}$$

$$c_p = (h_1 + hr_1) \frac{\Delta r^2}{2}$$

Por analogía, la temperatura  $T_{n,0}^{j+1}$  se obtiene sustituyendo:

$$h_3 \longrightarrow h_1$$

$$hr_3 \longrightarrow hr_1$$

$$T_3 \longrightarrow T_1$$

$$T_{n,1}^{j+1} \longrightarrow T_{0,1}^{j+1}$$

$$T_{n-1,0}^{j+1} \longrightarrow T_{1,0}^{j+1}$$

resultando:

$$T_{n,0}^{j+1} = \frac{a_0 T_{n,1}^{j+1} + b_0 T_{n-1,0}^{j+1} + c_0 T_3}{a_0 + b_0 + c_0} \dots\dots\dots(19)$$

donde:

$$a_0 = k_T \Delta Z$$

$$b_0 = k_T \frac{\Delta r^2}{2 \Delta Z}$$

$$c_0 = (h_3 + hr_3) \frac{\Delta r^2}{2}$$

3.7 EVALUACION DE LOS FLUJOS AXIAL Y RADIAL DE ENERGIA TERMICA.

La muestra está dividida en rebanadas, tal como en la Fig. No. 3.5; si sumamos los flujos a través de cada elemento obtendremos el flujo total.

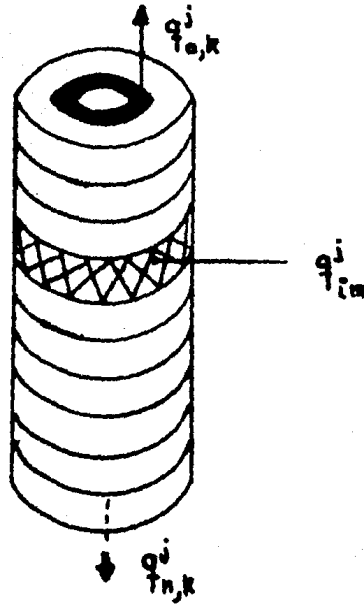


Fig. No. 3.5 Flujo de calor desde la muestra Jominy.

Flujo por la superficie superior  
durante el intervalo  $(j, j+1)$

$$= \sum_{k=0}^m q_{0,k}^j \dots\dots\dots (20)$$



donde:

$$q_{0,0}^j = \left[ \frac{\pi \Delta r^2}{4} \right] h_{c1}^i \left[ \frac{T_{0,0}^j + T_{0,0}^{j+1}}{2} - T_1 \right]$$

$$q_{0,k}^j = \left[ 2 \pi \Delta r^2 k \right] h_{c1}^j \left[ \frac{T_{0,k}^j + T_{0,k}^{j+1}}{2} - T_1 \right], \quad k=1, \dots, m-1$$

$$q_{0,m}^j = \left[ \frac{\pi \Delta r^2 (4m-1)}{4} \right] h_{c1}^j \left[ \frac{T_{0,m}^j + T_{0,m}^{j+1}}{2} - T_1 \right]$$

Flujo por la superficie lateral =  $\sum_{i=0}^m q_{i,m}^j$  .....(21)  
durante el intervalo de tiempo

(j, j+1)

donde:

$$q_{n,m}^j = \left[ \pi D \frac{\Delta z}{2} \right] h_{c2}^j \left[ \frac{T_{0,m}^j + T_{0,m}^{j+1}}{2} - T_2 \right]$$

$$q_{i,m}^j = \left[ \pi D \Delta z \right] h_{c2}^j \left[ \frac{T_{i,m}^j + T_{i,m}^{j+1}}{2} - T_2 \right], \quad i=1, \dots, n-1$$

$$q_{n,m}^j = \left[ \pi D \frac{\Delta z}{2} \right] h_{c2}^j \left[ \frac{T_{n,m}^j + T_{n,m}^{j+1}}{2} - T_2 \right]$$

Flujo por la superficie inferior =  $\sum_{k=0}^m q_{n,k}^j$  .....(22)  
durante el intervalo de tiempo

(j, j+1).

donde:

$$q_{n,0}^j = \left[ \frac{\pi \Delta r^2}{4} \right] h_{c3}^j \left[ \frac{T_{n,0}^j + T_{n,0}^{j+1}}{2} - T_3 \right]$$

$$q_{n,k}^j = \left[ 2 \pi k \Delta r^2 \right] h_{c3}^j \left[ \frac{T_{n,k}^j + T_{n,k}^{j+1}}{2} - T_3 \right], \quad k=1, \dots, m-1$$

$$q_{n,m}^j = \left[ \frac{\pi \Delta r^2 (4m-1)}{4} \right] h_{c3}^j \left[ \frac{T_{n,m}^j + T_{n,m}^{j+1}}{2} - T_3 \right]$$

Los flujos acumulados hasta el tiempo  $t(j \Delta t)$  son:

$$q \text{ (radial acumulado)} = \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{i=0}^n q_{i,m}^j \dots\dots\dots(23)$$

$$q \text{ (axial acumulado)} = \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{k=0}^m (q_{0,k}^j + q_{n,k}^j) \dots\dots\dots(24)$$

### 3.β PROGRAMA JOMINY.

El lenguaje de programación utilizado para desarrollar el análisis matemático fué el BASIC, por ser un lenguaje relativamente fácil y flexible. El programa se compone de una serie de subrutinas lo cual hace todavía más fácil la ejecución de los cálculos.

A grandes rasgos la secuencia del programa es el siguiente: primero se explican las consideraciones más importantes para la obtención del modelo, se suministran datos y dimensionan variables, se calculan los coeficientes de transferencia de calor por radiación, las temperaturas internas, de la superficie lateral, superficie superior e inferior y las extremas, se calculan los flujos axial y radial y por último se imprimen los resultados, los cuales son perfiles de temperatura a distintos tiempos.

En las hojas siguientes se muestran las variables utilizadas en el programa, así como un resumen de las funciones que realizan las subrutinas empleadas.

LISTA DE VARIABLES DEL PROGRAMA JOMINY.

NOTACION	SIGNIFICADO
<b>BASIC-B</b>	
A\$	Variable "SI/NO" para la explicación del programa,
A	Difusividad térmica del acero ( $8.15 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$ ).
A4	Coef. de la ec. (18). $a_p = k_T \cdot Z_2$
A6	Coef. de la ec. (16). $a_d = k_T (M-1/2) \Delta Z_1 / 2$
A5	Coef. de la ec. (15). $a_s = k_T (M-1/2) \Delta Z_2 / 2$
A0	Coef. de la ec. (19). $a_0 = k_T \Delta Z_1$
A1	$A1 = 1 / \Delta Z^2$
A2	$A2 = 1 / R^2$
A3	$A3 = 1 / (\text{ALFA} \cdot \text{DT})$
A7(N-1)	Vector de coeficientes TDMA.
B6	Coef. de la ec. (16). $b_d = k_T / \Delta Z_1 \cdot \text{DR}^2 (4M-1) / 8$
B4	Coef. de la ec. (18). $b_p = k_T / \Delta Z_2 \cdot \text{DR}^2 / 2$
B5	Coef. de la ec. (15). $b_s = k_T / \Delta Z_2 \cdot \text{DR}^2 (4M-1) / 8$
B0	Coef. de la ec. (19). $b_0 = k_T / \Delta Z_1 \cdot \text{DR}^2 / 2$
B7(N-1)	Vector de coeficientes TDMA.
C2	Coef. de la ec. (16). $c_d = (h_3 + hr_3) \Delta r^2 (4M-1) / 8$
C1	Coef. de la ec. (18). $c_p = (h_1 + hr_1) \Delta r^2 / 2$
C3	Coef. de la ec. (15). $c_s = (h_1 + hr_1) \Delta r^2 (4M-1) / 8$
C0	Coef. de la ec. (19). $c_0 = (h_3 + hr_3) \Delta r^2 / 2$
C1(M)	$C1(K) = H1 + R1(K)$ . Coef. de transf. global. Pte. -- sup.

**NOTACION**  
**BASIC-B**

**SIGNIFICADO**

NOTACION	SIGNIFICADO
C2(N)	C2 (I)=H2 +R2(I) Coef. de transf. global. Pte. - lateral.
C3(M)	C3(K) =H3+R3(K). Coef. de transf. global. Pte. - inferior.
C7(N-1)	Vector de coeficientes TDMA.
-	Variable falsa para introducir el programa por bloques temporales.
D	Diámetro de la muestra.
D1	Intervalo radial ( Δr).
D2	Intervalo temporal ( Δt).
D3	Intervalo axial ( ΔZ).
D4	Coef. de la ec. (16). $d_d = (h_2 + hr_2) M \Delta r \Delta Z_2 / 2$
D5	Coef. de la ec. (15). $d_s = (h_2 + hr_2) M \Delta r \Delta Z_1 / 2$
D7(N-1)	Vector de coeficientes TDMA.
E	Emisividad; E= 0.8, Cobre.
F	$FT = (T_{i,m}^j \wedge 4 - T_2 \wedge 4) / (T_{i,m}^j - T_2)$
H1	Coef. de transf. de calor por convección. Parte superior (1 j/m**2 qC s).
H2	Coef. de transf. de calor por convección. Parte lateral (80 j/m**2 qC s).
H3	Coef. de transf. de calor por convección. Parte inferior (15000 j/m**2 qC s).
I	Indice mudo, empleado para denotar posición ---- axial.
I7	Indice mudo, empleado en el TDMA.
J	Indice mudo, empleado para denotar posición temporal.

NOTACION	SIGNIFICADO
<b>BASIC-B</b>	
K	Indice mudo, empleado para denotar posición radial.
K1	$K1 = k_T / \Delta Z_1$
K2	$K2 = k_T / \Delta Z_2$
K3	$KR = k_T / \Delta r$
K9	Conductividad térmica (40 j/m**2 °C s).
K4	$KZ = k_T / \Delta Z$
L	Número de nodos temporales.
L1	Longitud de la muestr (0.1016 m).
M	Número de nodos axiales.
N	Número de nodos radiales.
N7	Número de ecs. simultáneas que maneja el TDMA.
N1	Variable muda. Circuito de iteraciones.
P7(N-1)	Vector de coeficientes TDMA
Q1	Flujo de calor por la superficie, ec. (20).
Q2	Flujo de calor por la sup. lateral, ec. (21).
Q3	Flujo de calor por la sup. inferior, ec. (22).
Q4	Calor axial acumulado hasta el tiempo j.
Q5	Calor radial acumulado hasta el tiempo j.
Q6	Cociente de calores Q4/Q5.
Q7	Calor desprendido en el intervalo de tiempo t; - axialmente.

NOTACION	SIGNIFICADO
<b>BASIC-B</b>	
Q8	Calor desprendido en el intervalo de tiempo $t$ ; - radialmente.
Q9	Cociente de calores QA/QR.
Q7(N-1)	Vector de TDMA.
R1(M)	Coef. de transf. de calor por radiación ( $hr_1$ ). - Parte superior.
R2(M)	Coef. de transf. de calor por radiación ( $hr_2$ ). - Parte lateral.
R3(M)	Coef. de transf. de calor por radiación ( $hr_3$ ). - Parte inferior.
R7(N-1)	Vector de resultados del TDMA.
S	Cte. Stefan=Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8}$ j/m**2 k**4).
T0	Temperatura inicial de la muestra.
T3	Temperatura del chorro de agua.
T2	Temperatura del medio (lateral a la muestra).
T1	Temperatura del medio (parte superior de la muestra).
T	Tiempo total de enfriamiento.
T3(I,K)	Temperatura supuesta y/o estimada $TS(i,j)$ para - el tiempo $j+1$ .
T1(I,K)	Temperatura en la muestra $T_{i,k}^j$ .
T2(I,K)	Temperatura en la muestra $T_{i,k}^{j+1}$ .
W8	Variable muda de la función de redondeo.
Z1	Espaciado axial de la parte inferior de la muestra ( $3.17 \cdot 10^{-3}$ m).
Z2	Espaciado axial de la parte superior de la muestra ( $6.35 \cdot 10^{-3}$ m).

## COMENTARIOS SOBRE EL DIAGRAMA DE BLOQUES.

### SUBROUTINA 2000

Se suministran los datos y se dimensionan las variables correspondientes. Debido a que la mitad inferior de la muestra es de mayor interés, se ha dividido en 16 nodos, mientras que la superior en 8.

### SUBROUTINA 3000

Se calculan los coeficientes de transferencia de calor por radiación y globales. Se supone que éstos son constantes en un intervalo de tiempo, por lo que es recomendable escoger intervalos cortos (10 a 50 segundos) para el programa.

### SUBROUTINA 4000

Se calculan las temperaturas internas por medio de las ecuaciones (3), (5), (7), (9), completando cada sistema de ecuaciones  $k$ , dado por (3), con la hipótesis de que la temperatura en los nodos radiales anterior y posterior (en un tiempo siguiente) es igual a la del tiempo anterior. Los sistemas de ecuaciones se resuelven por el método TDMA.

### SUBROUTINA 5000

Se calculan más temperaturas internas resolviendo el sistema de ecuaciones generado por la ecuación (13) y completado por las ecuaciones (18), (19), (5) y (9).



#### SUBROUTINA 5500

Se calculan las temperaturas de la superficie lateral, utilizando la ecuación (7).

#### SUBROUTINA 6000

Se calculan las temperaturas de las superficies superior e inferior de la muestra usando las ecuaciones (5) y (9), respectivamente.

#### SUBROUTINA 6500

Se calculan las temperaturas extremas usando las ecuaciones (15), (16), (18) y (19).

#### SUBROUTINA 7000

Es una subrutina donde se resuelven los sistemas de ecuaciones simultáneas.

#### SUBROUTINA 8000

Se calculan los flujos axial, radial (instantáneo --- ecs. (20) a (22), y acumulado ecs. (23) y (24)), así como los correspondientes cocientes entre dichos flujos térmicos.

#### SUBROUTINA 9000

Se imprimen los resultados, los cuales son perfiles de temperatura a distintos tiempos con sus correspondientes flujos axial y radial, en la superficie de la muestra.

Nota: Las subrutinas 2500 y 2700 están destinadas al-

cálculo de parámetros que dependen del espaciado axial,  $\Delta Z$ . Estas subrutinas se utilizan a su vez, en las subrutinas 4000, -- 5000, 5500 y 6500.

WOPKFILE: JOMINY (10/31/85)

3:24 PM NY

```
10 REM VERSION DEL 31-10-83
20 REM DEFINICION DE ARCHIVO DE IMPRESION (PJOM).
30 FILES PJOM
40 SCRATCH #1
50 REM ***** JOMINY *****
60
70 REM II METODO IMPLICITO II
80 REM LECTURA DE DATOS, ASIGNACION DE LTES. I DIMENS.
90 GOSUB 2000
100 FOR J = 0 TO L-1
110 REM ESTIMACION INICIAL DE TEMPS.
120 MAT T3 = T1
130 REM EVALUAC. DE LOS COEFS. DE RADIACION.
140 GOSUB 3000
150 FOR M = 1 TO 18
160 REM CALCULO DE LOS NODOS INTERNOS.
170 FOR K = 1 TO M-1
180 GOSUB 4000
190 NEXT K
200 REM CALCULO DE T2(I,0).
210 GOSUB 5000
220 REM CALCULO DE T2(I,M)
230 GOSUB 5500
240 REM NUEVA ESTIMAC. DE TEMPS.
250 FOR I = 1 TO M-1
260 FOR K = 1 TO M-1
270 T3(I,K) = 0.75*T2(I,K) + 0.25*T3(I,K)
280 NEXT K
290 T3(I,0) = 0.75*T2(I,0) + 0.25*T3(I,0)
300 T3(I,M) = 0.75*T2(I,M) + 0.25*T3(I,M)
```

```

310 NEXT I
320 NEXT M1
330 E9 = (T2(1,1)-I3(1,1))/(I2(1,1))
340 REM CALCULO DE TEMPS. SUPERF.
350 GOSUB 6000
360 REM CALCULO DE TEMPS. EXTREMOS.
370 GOSUB 6500
380 REM CALCULO DE CALORES AXIAL Y RADIAL.
390 GOSUB 8000
400 REM IMPRESION DE RESULTADOS.
410 GOSUB 9000
420 MAT T1 = T2
430 MAT T2 = ZER(N,M)
440 NEXT J
450 PRINT
460 PRINT #1, TAB(15); "LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR ";
470 PRINT #1, "SON : "
480 PRINT #1,
490 PRINT #1, "H1 = "H1,"H2 = "H2,"H3 = "H3 "(W/M**2/ C).";
500 PRINT TAB(25); "FIN DEL PROGRAMA"
510 REM FIN DEL PROGRAMA PRINCIPAL.
520 STOP
2000 REM SUBROUTINA DE LECTURA DE DATOS, ASIGNACION DE CTES. Y DIM.
2005 E = 0.8
2010 K9 = 40
2015 A = 8.15E-6
2020 H1 = 1
2025 H2 = 80
2030 H3 = 15000
2035 L1 = 0.1016
2040 D = 0.0254

```

```

2045      S = 5.67E-8
2050      T1 = 293
2055      T2 = T1
2060      T3 = T1
2065      PRINT "CUANTOS MODOS TEMPORALES?";
2070      INPUT L
2075      PRINT "CUANTOS MODOS RADIALES?";
2080      INPUT M
2085      NEM NUMERO DE MODOS AXIALES :
2090      N = 20
2095      PRINT "TIEMPO TOTAL DE ENFRIAM. (SEG)";
2100      INPUT T
2105      PRINT "TEMP. INICIAL (K)";
2110      INPUT T0
2115      PRINT "CUANTAS ITERACIONES DESEA?";
2120      INPUT IB
2125      Z1 = 3.175E-5
2130      Z2 = 2*Z1
2135      D1 = D/2/M
2140      U2 = T/L
2145      A2 = 1/D1**2
2150      A3 = 1/(A*D1)
2155      K1 = K9/Z1
2160      K2 = K9/Z2
2165      K3 = K9/D1
2170      MAT T1 = ZER(N,M)
2175      MAT T2 = ZER(N,M)
2180      MAT T3 = ZER(N,M)
2185      FOR I = 0 TO N
2190      FOR K = 0 TO M
2195      T1(I,K) = T0

```

```

2200 NEXT K
2205 NEXT I
2210 MAT R1 = ZER(N)
2215 MAT R2 = ZER(N)
2220 MAT R3 = ZER(N)
2225 MAT C1 = ZER(N)
2230 MAT C2 = ZER(N)
2235 MAT C3 = ZER(N)
2240 MAT A7 = ZER(N-1)
2245 MAT B7 = ZER(N-1)
2250 MAT C7 = ZER(N-1)
2255 MAT D7 = ZER(N-1)
2260 MAT P7 = ZER(N-1)
2265 MAT Q7 = ZER(N-1)
2270 MAT R7 = ZER(N-1)
2275 DEF FNR(D,WR) = (1/(WR*10**D*0.5))/10**D
2280 RETURN
2500 REM SUBROUTINA PARA DZ = 2/16 IN.
2505 K4 = K1
2510 A4 = K9*Z1
2515 B4 = K4/(2*A2)
2520 A0 = A4
2525 B0 = B4
2530 A5 = K9*(M-0.5)*41/2
2535 B5 = K4*(M-1)/(8*A2)
2540 A6 = A5
2545 B6 = B5
2550 RETURN
2750 REM SUBROUTINA PARA DZ = 1/4 IN.
2755 K4 = K2
2760 A4 = K9*Z2

```

```

2765   B4 = K4/(2*A2)
2770   A0 = A4
2775   B0 = B4
2780   A5 = K9*(M-0.5)*L2/2
2785   B5 = K4*(4*M-1)/(L8*A2)
2790   A6 = A5
2795   B6 = B5
2800   RETURN
3000   REM SUBROUTINA PARA EL CALC. DE COEFS. DE RAD. Y COMBINADOS.
3010   FOR I = 0 TO N
3020     F = (T1(I,M)**4-T2**4)/(T1(I,M)-T2)
3030     R2(I) = S*F
3040     C2(I) = R2(I) + H2
3050   NEXT I
3060   FOR K = 0 TO N
3070     F = (T1(0,K)**4-T1**4)/(T1(0,K)-T1)
3080     R1(K) = S*F
3090     C1(K) = R1(K) + H1
3100     F = (T1(N,K)**4-T3**4)/(T1(N,K)-T3)
3110     R3(K) = S*F
3120     C3(K) = R3(K) + H3
3130   NEXT K
3140   RETURN
4000   REM SUBROUTINA PARA EL CALCULO DE LOS NODOS INTERNOS.
4010   A1 = 1/Z2**2
4020   K4 = K2
4030   A7(1) = 2*(A1+A2)+A2/P+A3-A1*K4/(C1(K)+K4)
4040   B7(1) = A1
4050   C7(1) = 0
4060   D7(1) = A2*(1+1/K)+1/3*(1,K+1)+1/2*T3(1,K-1)+A2*11(1,K)
4070   D7(1) = D7(1)+A1*C1(K)*T1/(C1(K)+K4)

```

```

4080 FOR I = 2 TO N2
4090 IF I > 16 THEN 4120
4100 A1 = 1/Z2**2
4110 GOTO 4130
4120 A1 = 1/Z1**2
4130 A7(I) = 2*(A1+A2)+A2/K+A3
4140 B7(I) = A1
4150 C7(I) = A1
4160 D7(I) = A2*(1+1/A)*T3(I,K+1)+A2*T3(I,K-1)+A3*T1(I,K)
4170 NEXT I
4180 A1 = 1/Z1**2
4190 K4 = K9/Z1
4200 A7(N-1) = 2*(A1+A2)+A2/K+A3-A1*K4/(C3(K)+K4)
4210 B7(N-1) = 0
4220 C7(N-1) = A1
4230 D7(N-1) = A2*(1+1/A)*T3(N-1,K+1)+A2*T3(N-1,K-1)+A3*T1(N-1,K)
4240 D7(N-1) = D7(N-1) + A1*C3(K)*T3/(C3(K)+K4)
4250 N7 = N-1
4260 GOSUB 7000
4270 FOR I = 1 TO N2-1
4280 T2(I,K) = B7(I)
4290 NEXT I
4300 RETURN
5000 REM SUBROUTINA PARA EL CALC. DE T(I,0,J+1).
5005 C1 = C1(0)+1/(2*A2)
5010 C0 = C3(0)+1/(2*A2)
5015 K4 = K2
5020 T2(0,1) = (T1*C1(1)+K4*T2(1,1))/(K4 + C1(1))
5025 K4 = K1
5030 T2(N,1) = (T3*C3(1)+K4*T2(N-1,1))/(K4+C3(1))
5035 GOSUB 2750

```



```

5040      A1 = 1/Z2**2
5045      A7(I) = 4*A2*A3+2*A1-(A1*B4)/(A4+B4+C1)
5050      B7(I) = A1
5055      C7(I) = 0
5060      D7(I) = 4*A2*T2(I,1)+A3*I1(I,0)+(A1*(A4*I2(I,1)+C1*T1))/(A4+B
5065      FOR I = 2 TO N2
5070      IF I > 16 THEN STOP
5075      A1 = 1/Z2**2
5080      GOTO 5090
5085      A1 = 1/Z1**2
5090      A7(I) = 4*A2*A3+2*A1
5095      B7(I) = A1
5100      C7(I) = A1
5105      D7(I) = 4*A2 *T2(I,1)+A3*I1(I,0)
5110      NEXT I
5115      GOSUB 2500
5120      A1 = 1/Z1**2
5125      A7(N-1) = 4*A2+A3+2*A1-(A1*B0)/(A0+B0+C0)
5130      B7(N-1) = 0
5135      C7(N-1) = A1
5140      D7(N-1) = 4*A2*I2(N-1,1)+A3*T1(N-1,0)
5145      D7(N-1) = D7(N-1)+A1*(A0*I2(N-1,1)+C0*T1)/(A0+B0+C0)
5150      N7 = N-1
5155      GOSUB 7000
5160      FOR I = 1 TO N-1
5165      T2(I,0) = R7(I)
5170      NEXT I
5175      RETURN
5500      REM SUBROUTINA PARA CALC. T(I,N,J+1).
5505      FOR I = 1 TO N-1
5510      I2(I,N) = (T2*I2(I,N)+A3*I2(I,N-1))/(A3+C2(I))

```

```

5515 NEXT I
5520 RETURN
6000 REM SUBROUTINA PARA CALC. T(O,K,J+1) Y I(N,N,J+1).
6005 FOR K=1 TO M-1
6010 K4= K2
6015 T2(O,K)=(T1*C1(K)+K4*T2(1,K))/(K4+C1(K))
6020 K4= K1
6025 T2(N,K) = (T3*C3(K)+K4*T2(N-1,K))/(K4+C3(K))
6030 NEXT K
6035 RETURN
6500 REM SUBROUTINA PARA CALC. LOS NUDOS EXTREMOS.
6505 D3= Z2
6510 C3= C1(M)*(4*M-1)/(8*A2)
6515 D7= C2(O)*M*D1/D3/E
6520 C2= C3(M)*(4*M-1)/(8*A2)
6525 D3= Z1
6530 D4= C2(N)*M*D1*D3/E
6535 C1= C1(O)*1/(2*A2)
6540 C0= C3(O)*1/(2*A2)
6545 GOSUB 2750
6550 T2(O,M) = (A5*T2(O,M-1)+B5*T2(1,M)+C3*T1+D7*T2)
6555 T2(O,M) = T2(O,M)/(A5+B5+C3+D7)
6560 GOSUB 2500
6565 T2(N,M) = A6*(2*(N,M-1))+B6*T2(N-1,M)+C2*T3+D4*T2
6570 T2(N,M) = T2(N,M)/(A6+B6+D4)
6575 GOSUB 2750
6580 T2(O,O) = A0*(2*(O,1))+B0*T2(1,O)+C1*T1
6585 T2(O,O) = T2(O,O)/(A0+B0+C1)
6590 GOSUB 2500
6595 T2(N,O) = A0*(2*(N,1))+B0*T2(N-1,O)+C0*T3
6600 T2(N,O) = T2(N,O)/(A0+B0+C0)

```

```

6605     RETURN
7000     REM SUBROUTINA <C104A>.
7010     REM
7020     REM CALCULO DE P7(I7), Q7(I7).
7030     REM
7040     P7(1) = Q7(1)/A7(1)
7050     Q7(1) = D7(1)/A7(1)
7060     FOR I7 = 2 TO N7
7070     P7(I7) = R7(I7)/(A7(I7) - C7(I7)*P7(I7-1))
7080     Q7(I7) = (D7(I7) + C7(I7)*Q7(I7-1))/(A7(I7) - C7(I7)*P7(I7-1))
7090     NEXT I7
7100     R7(N7) = Q7(N7)
7110     FOR I7 = N7-1 TO 1 STEP -1
7120     R7(I7) = P7(I7)*C7(I7+1) + Q7(I7)
7130     NEXT I7
7140     RETURN
8000     REM SUBROUTINA PARA EL CALC. DE UR Y QA.
8010     Q1 = 0
8020     Q2 = 0
8030     Q3 = 0
8040     FOR K = 1 TO M-1
8050     Q1 = Q1 + 2*3.14159*U1**2*K*C1(K)*(T1(0,K)*0.5 + T2(0,K)*0.5 - T1)
8060     Q3 = Q3 + 2*3.14159*U1**2*K*C3(K)*(T1(N,K)*0.5 + T2(N,K)*0.5 - T3)
8070     NEXT K
8080     Q1 = Q1 + 3.14159*U1**2/4*C1(0)*(0.5*(T1(0,0) + T2(0,0)) - T1)
8090     Q1 = Q1 + 3.14159*U1**2/4*(4*M-1)*C1(M)*(0.5*(T1(0,M) + T2(0,M)) - T1)
8100     Q3 = Q3 + 3.14159*U1**2/4*C3(0)*(0.5*(T1(N,0) + T2(N,0)) - T3)
8110     Q3 = Q3 + 3.14159*U1**2/4*(4*M-1)*C3(M)*(0.5*(T1(N,M) + T2(N,M)) - T3)
8120     IF Z1 = Z2 THEN B200
8130     FOR I = 1 TO L1/Z2
8140     Q2 = Q2 + 3.14159*U2**2*Z2(I)*(0.5*(T1(I,M) + T2(I,M)) - T2)

```

```

8150 NEXT I
8160 FOR I = L1/22+1 TO N-1
8170 Q2 = Q2+3.1416*U*41*C2(I)*(0.5*(T1(I,M)+T2(I,M))-T2)
8180 NEXT I
8190 GOTO 8230
8200 FOR I = 1 TO N-1
8210 Q2=Q2+3.1416*U*41*C2(I)*(0.5*(T1(I,M)+T2(I,M))-T2)
8220 NEXT I
8230 Q2 = Q2 + 3.1416*U*42/2*C2(0)*(0.5*(T1(0,M)+T2(0,M))-T2)
8240 Q2 = Q2+3.1416*U*41/2*C2(N)*(0.5*(T1(N,M)+T2(N,M))-T2)
8250 Q7 = Q2*(Q1+Q3)
8260 Q8 = Q2*Q2
8270 Q4= Q4 + Q7
8280 Q5= Q5 + Q8
8290 Q9 = Q7/Q8
8300 Q6= Q4/Q5
8310 RETURN
9000 REM SUBROUTINA DE IMPRESION.
9010 #6= (J+1)*D2
9020 IF #6/75 = INT(#6/75) <> 0 THEN 9580
9030 PRINT TAB(15);"PERFIL DE TEMPERATURAS DESPUES DE "FNR(0,#6)" S."
9040 PRINT
9050 PRINT #1,TAB(15);"PERFIL DE TEMPERATURAS DESPUES DE "FNR(0,#6)" S."
9060 PRINT #1,
9070 PRINT TAB(5);"K=0";TAB(35);"K=8"
9080 PRINT
9090 PRINT#1,TAB(5);"K=0";TAB(55);"K=8"
9100 PRINT #1,
9110 FOR I = 0 TO N
9120 #8= FNR(1,T2(I,8)-273)
9130 #7= FNR(1,T2(I,0)-273)

```

```

9140 PRINT TAB(6);"I="I;TAB(20)"T="W7"C";TAB(36);"I="I;TAB(50)"T="W8"C"
9150 PRINT #1,TAB(6);"I = "I;TAB(20)"T = "W7 " C-";TAB(55);"I = "I;
9160 PRINT #1,TAB(70)"T = "W8 " C-"
9170 NEXT I
9180 PRINT
9190 PRINT #1,
9200 PRINT
9210 PRINT #1,
9220 PRINT TAB(5);"Q7 = "Q7
9230 PRINT #1, TAB(5);"Q7 = "Q7
9240 PRINT
9250 PRINT #1,
9260 PRINT TAB(5);"Q8 = "Q8
9270 PRINT #1, TAB(5);"Q8 = "Q8
9280 PRINT
9290 PRINT #1,
9300 PRINT TAB(5);"Q AXIAL ACUM. = "Q4
9310 PRINT #1, TAB(5);"Q AXIAL ACUM. = "Q4
9320 PRINT
9330 PRINT #1,
9340 PRINT TAB(5);"Q RADIAL ACUM. = "Q5
9350 PRINT #1, TAB(5);"Q RADIAL ACUM. = "Q5
9360 PRINT
9370 PRINT #1,
9380 PRINT TAB(5);"CUCIENTE INSTANTANEO = "Q9
9390 PRINT #1, TAB(5);"CUCIENTE INSTANTANEO = "Q9
9400 PRINT
9410 PRINT #1,
9420 PRINT TAB(5);"CUCIENTE ACUMULADO = "Q6
9430 PRINT #1, TAB(5);"CUCIENTE ACUMULADO = "Q6
9440 PRINT

```

```
9450 PRINT #1,  
9460 PRINT  
9470 PRINT #1,  
9480 PRINT TAB(15);"DESPUES DE "18" ITERACIONES, EL % DE ERROR"  
9490 PRINT #1, TAB(15);"DESPUES DE "18" ITERACIONES, EL % DE ERROR"  
9500 PRINT TAB(15)"ENTRE LAS TEMPERATURAS SUPUESTA Y CALCULADA ES DE "  
9510 PRINT TAB(14) E9*100 " %."  
9520 PRINT #1, TAB(15) "ENTRE LAS TEMPERATURAS SUPUESTA Y CALCULADA ES"  
9530 PRINT #1, TAB(12);"DE " E9*100 " %."  
9540 PRINT  
9550 PRINT #1,  
9560 PRINT  
9570 PRINT #1,  
9580 RETURN  
9999 END
```

C A P I T U L O   I V

D E S A R R O L L O

E X P E R I M E N T A L

#### 4.1 MATERIAL EXPERIMENTAL.

EL material se seleccionó considerando la influencia que tiene el contenido de carbono en la dureza obtenida por temple y para ello se eligieron tres tipos de acero no-aleados representativos, con bajo, medio y alto contenido del mismo; los cuales fueron: 1018, 1045 y W2, cuyas características se muestran en las Tablas I y II.

TABLA I  
Composición Química\*

%	1018	1045	W2
C	0.19	0.52	0.86
Mn	0.82	0.97	0.16
Si	0.06	0.22	0.28
S	0.038	0.025	0.0074
P	0.023	0.027	0.03
V			0.20
Cr	0.09	0.23	
Ni	0.03	0.14	
Cu		0.03	
Al	0.007	0.035	

\*Análisis Químico realizado por método espectrométrico.

Los elementos: V, Cr, Ni, Cu, Al, Mo, son considerados residuales por encontrarse en trazas y su influencia sobre-



la templabilidad no es de tomarse en cuenta, a excepción del V en el acero W2, que sí influye en esta propiedad.

TABLA II

Material	Características Microestructurales**			
	%Ferrita <sup>(1)</sup>	%Perlita <sup>(1)</sup>	Otros <sup>(2)</sup>	TG ASTM*100 <sup>(3)</sup>
1018	75	24	1%	6-7 (85-15%)
1045	37	62	3%	6-7 (70-30%)
W2 <sup>***</sup>		95	5%	5-6 (40-60%)

\*\* Reactivo de ataque: Nital 3.

\*\*\* Este acero fué sometido a un tratamiento térmico de normalizado con el fin de obtener el tamaño de grano 6 ASTM \* 100, igual al de los otros dos aceros y de esta forma mantener constante esta variable.

(1) El método utilizado para cuantificar estas fases fué mediante un ocular graduado con cuadrante.

(2) Se refiere a las inclusiones presentes, las cuales no se determinaron porque no es objetivo del presente trabajo.

(3) El tamaño de grano fué medido con un ocular graduado para dicho propósito.

Las fases observadas en los aceros fueron granos equiaxiales de ferrita y perlita en el caso del 1018 y 1045, existiendo además en este último pequeñas zonas de segregación de carbono, mientras que en el W2, la perlita se encontró en for-

ma globular y muy fina y dispersa en una matriz ferrítica. Después del tratamiento térmico la estructura anterior se transformó a granos equiaxiales de perlita limitados por una red de cementita.

#### 4.2 DISEÑO DEL DISPOSITIVO.

El ensayo Jominy, brevemente, consiste en templear una muestra cilíndrica de dimensiones específicas previamente austenizada a la temperatura adecuada por el extremo inferior con un flujo de agua constante en un dispositivo, durante el temple, - la muestra se enfría desde el extremo inferior al superior. Bajo estas condiciones el flujo de calor es considerado unidireccional desde el seno del espécimen, extraído por medio del agua de enfriamiento; el otro extremo de la barra se enfría a una velocidad menor, al aire.

Con el fin de determinar como afecta el flujo de calor radial, se construyó un dispositivo tal que aisle el espécimen longitudinalmente y que permita realizar el ensayo sin dificultad. Este consistió de dos tubos concéntricos soldados en -- una placa base y todo este conjunto atornillado a una solera -- que servía de barra de sujeción y que puede montarse en el dispositivo Jominy, como se muestra en la Fig. No. 4.1.

Entre el espacio dejado por los tubos se coloca un -- material aislante, el cual impide el flujo de calor, para este-

caso se utilizaron dos: arena sílica y lana mineral. El material de que están hechos tanto los tubos como la placa base es de acero al medio carbono.

#### 4.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Una vez seleccionado y caracterizado el material, se procedió a maquinar las muestras en el torno partiendo de barras de acero de 31.75 mm (1 1/4") de diámetro hasta obtener las dimensiones especificadas por la norma. El dimensionamiento final fué con un maquinado suave para evitar que la muestra quedara excesivamente tensionada en la superficie.

El siguiente paso fué la realización de la prueba, ensayando varias muestras: en la forma estipulada por la norma y utilizando el dispositivo aislante. Las temperaturas de austenización utilizadas fueron:

para el acero 1018:	925 °C
para los aceros 1045 y W2:	850 °C

y que son el resultado de haber realizado pruebas previas para obtener la máxima dureza en el temple.

Durante los ensayos se registraron a cada 1/8" de la muestra, curvas de temperatura contra tiempo, con el fin de recopilar datos experimentales y compararlos con los valores obtenidos con el modelo. El procedimiento para registrar dichas curvas fué el de taladrar a distintas distancias del extremo templado de la muestra un orificio de 3.2 mm (1/8") de diámetro --

por 3.2 mm de profundidad por donde se podía colocar el termopar (Fig. No. 4.2) sin peligro de perder contacto con la muestra. No fué posible determinar las curvas de enfriamiento de la muestra cuando se encontraba aislada debido a la dificultad que se presentaba para colocar el termopar entre el dispositivo y la muestra.

El diámetro del orificio se hizo en base al diámetro del termopar para que así al introducirlo quedara fijo por presión, evitando así un contacto superficial ocasionando una fuente de error en las mediciones.

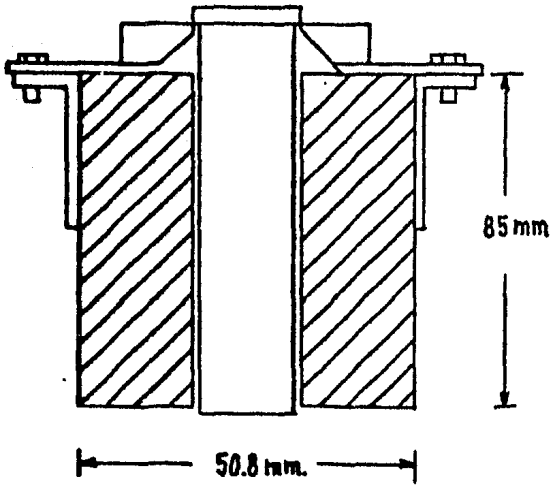
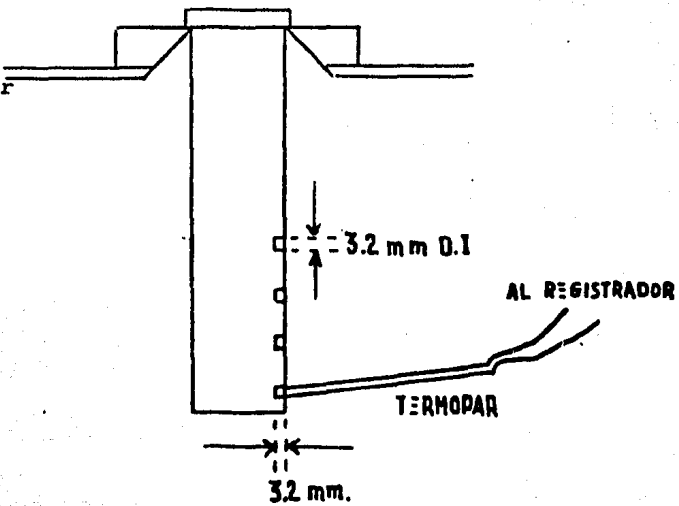


Fig. No. 4.1. Ensayo Jominy realizado con el dispositivo aislante.

Fig. No. 4.2. Método para registrar curvas de enfriamiento en diversos puntos de la muestra Jominy.



**C A P I T U L O V**

**R E S U L T A D O S**

Las pruebas realizadas se hicieron de acuerdo a la norma y con la modificación del dispositivo Jominy que aísla la muestra longitudinalmente, empleando como aislantes, primero la na mineral y por último arena.

Los resultados del ensayo normal se muestran en la Fig. No. 5.1, nótese que los 3 aceros presentan una disminución brusca en la propiedad de dureza en los primeros 4/16". Los valores máximos de la dureza son 40, 58 y 65 HRC (localizados a 1/16" del extremo templado) para los aceros 1018, 1045 y W2 respectivamente, mientras que los mínimos son 17 y 36 HRC a una distancia de 2" para el 1045 y W2, en ese orden. La propiedad de dureza en el acero 1018, en la escala Rockwell C no se puede medir en toda la muestra, por lo que se utilizó la escala Rockwell B, pero como entre estas escalas no existe una equivalencia comparativa no serán considerados, únicamente los primeros 4 puntos reportados.

Considerando otro punto de la muestra, por ejemplo 8/16" se puede ver que la dureza a esta distancia es de 29 y 41 HRC, para el 1045 y W2 respectivamente. Los valores de dureza máximos, anteriormente mencionados, comparados con los valores calculados por el método de Grossman<sup>(2)</sup>, cuyos valores respectivos son 43, 60 y 65 HRC y a la misma distancia (Tabla III), afirman lo contemplado en la teoría: a mayor contenido de carbono, mayor dureza.

TABLA III

VALORES DE DUREZA (ESCALA ROCKWELL C)

DISTANCIA JOMINY	METODO DE GROSSMAN			EXPERIMENTALES		
	1018	1045	W2	1018	1045	W2
1/16"	43	60	65	40	58	65
1/2"		34	42		29	41
2"		17	36		18	36



Para los ensayos realizados con el dispositivo y lana mineral, los resultados obtenidos se muestran en la Fig. No. -- 5.2; aquí los valores máximos en la dureza son 37, 55 y 65 HRC-- a 1/16" para los respectivos aceros 1018, 1045 y W2, los míni-- mos para el 1045 y W2 son 18 y 27 HRC, y las durezas a 8/16" -- son 27 y 41 HRC.

Estas curvas Jominy muestran una tendencia similar a-- las anteriores, aunque los valores en la dureza son menores.

En los ensayos donde se utilizó el dispositivo y are-- na, los valores máximos a 1/16" correspondientes a los aceros-- 1018, 1045 y W2 son 37, 56 y 66 HRC, mientras que los mínimos - son para éstos dos últimos 17 y 29 HRC respectivamente, como se puede ver en la Fig. No. 5.3, a 8/16" las durezas son 27 y 41 - HRC.

Haciendo una comparación para cada uno de los tipos - de acero, se ve que en el 1018 las curvas presentan la misma -- tendencia con la diferencia en los valores de la dureza obteni-- da. Para el 1045 la tendencia de las curvas es similar en los - 3 casos, no existe una considerable diferencia en la dureza.

En el acero W2 se muestra la siguiente caracterfisti-- ca: en los 3 casos no hay una gran diferencia ni en dureza y ni en forma hasta el punto localizado a 10/16" del extremo temple-- do; después de éste punto, la curva Jominy del ensayo normal se

aparta de las otras dos situándose por encima de ellas. Comparativamente, no hay diferencia entre las curvas obtenidas con el dispositivo, lana mineral y arena. Nótese el efecto del contenido de carbono en la dureza en las Figs. Nos. 5.1 a 5.3.

Debido a la forma que presenta cada una de las curvas Jominy, es difícil determinar la propiedad de templabilidad con gran aproximación, pero aparentemente esta propiedad no sufre variación alguna en los respectivos ensayos.

Con respecto a las curvas de enfriamiento, tanto las teóricas como las experimentales, muestran un aumento secuencial en sus pendientes conforme aumenta la distancia al extremo templado, esto es, que cada muestra se somete a una serie de ve locidades de enfriamiento, variando continuamente desde muy altas en el extremo templado hasta bajas, en el enfriado por aire.

La forma en que se efectúa el proceso de enfriamiento es por los mecanismos de radiación, conducción a través de la muestra y convección, el primero de ellos termina entre 550 - 500 °C, permaneciendo los dos últimos hasta el final de la prueba. Este proceso se efectúa en 3 etapas (aunque sólo el extremo inferior está en contacto con el agua, estas etapas son válidas porque describen la eliminación del calor de la muestra): Etapa A: estado de enfriamiento por medio de una capa de vapor, E-

tapa B: enfriamiento por transporte de vapor y Etapa C: enfriamiento por medio líquido; las dos primeras etapas van disminuyendo conforme se aleja del extremo templado, aumentando la tercera etapa.

En la Fig. No. 5.4 se muestra una curva de enfriamiento del acero 1045, registrada a una distancia de 1/8" del extremo templado, la etapa A no se alcanza a distinguir claramente, pero es de aproximadamente unos 8 segundos, la etapa B termina a los 300 segundos, siguiendo por último la etapa C. En las --- Figs Nos. 5.4A a 5.4H se presentan las restantes curvas de enfriamiento experimentales.

Las temperaturas superficiales calculadas por el modelo propuesto, se muestran en las Figs. Nos. 5.5 a 5.8, en donde sólo se presentan 4 puntos de la muestra (2, 6, 14 y 16 dieciséisavos de pulgada) para ejemplificar y comparar los resultados experimentales y los calculados por el modelo como curvas de enfriamiento, en éstas puede observarse que no existe una -- discrepancia considerable entre los valores de temperatura experimental y teóricos hasta el punto situado a 14/16" del extremo templado; a partir de una distancia de 1" se puede ver que -- comienza una notable diferencia entre las curvas teórica y experimental.

Otras características que se pueden notar, es que hay

un cruzamiento entre las curvas teórica y la experimental en -- los puntos situados a 2 y 6 dieciseisavos del extremo templado, aquí las etapas de enfriamiento A y B son iguales, mientras que la etapa C tiende a separarse. En las dos restantes, la curva -- teórica se sitúa por encima de la experimental, existiendo una -- separación entre las tres etapas de enfriamiento, mostrándose -- notoriamente en el punto situado a 1".

Por otra parte, comparando los valores de las tempera -- turas calculadas por el modelo para las regiones central (C) y -- superficial (S) de la muestra (Fig. No. 5.9), presentadas en -- las Tablas IV y IV-A, se observa que existe una diferencia de -- 10 °C en promedio en cada uno de los puntos considerados.

TABLA IV

Temperaturas teóricas en las regiones central y superficial de -- la muestra Jominy.

t (seg)	2/16"		6/16"	
	C	S	C	S
75	204	196	382	370
150	152	144	283	272
225	128	120	236	226
300	113	105	205	195
375	101	94	182	172
450	93	85	164	154
525	86	78	150	140

600	81	73	138	129
675	76	68	128	119
750	72	64	120	111
825	69	61	113	104
900	66	58	107	98

TABLA IV-A

t (seg)	14/16"		16/16"	
	C	S	C	S
75	641	625	688	669
150	509	495	557	542
225	428	415	471	458
300	370	359	408	396
375	327	316	361	349
450	293	282	323	312
525	265	255	292	281
600	242 <sup>r</sup>	232	267	256
675	223	213	245	235
750	207	197	228	217
825	193	183	212	202
900	182	172	199	189

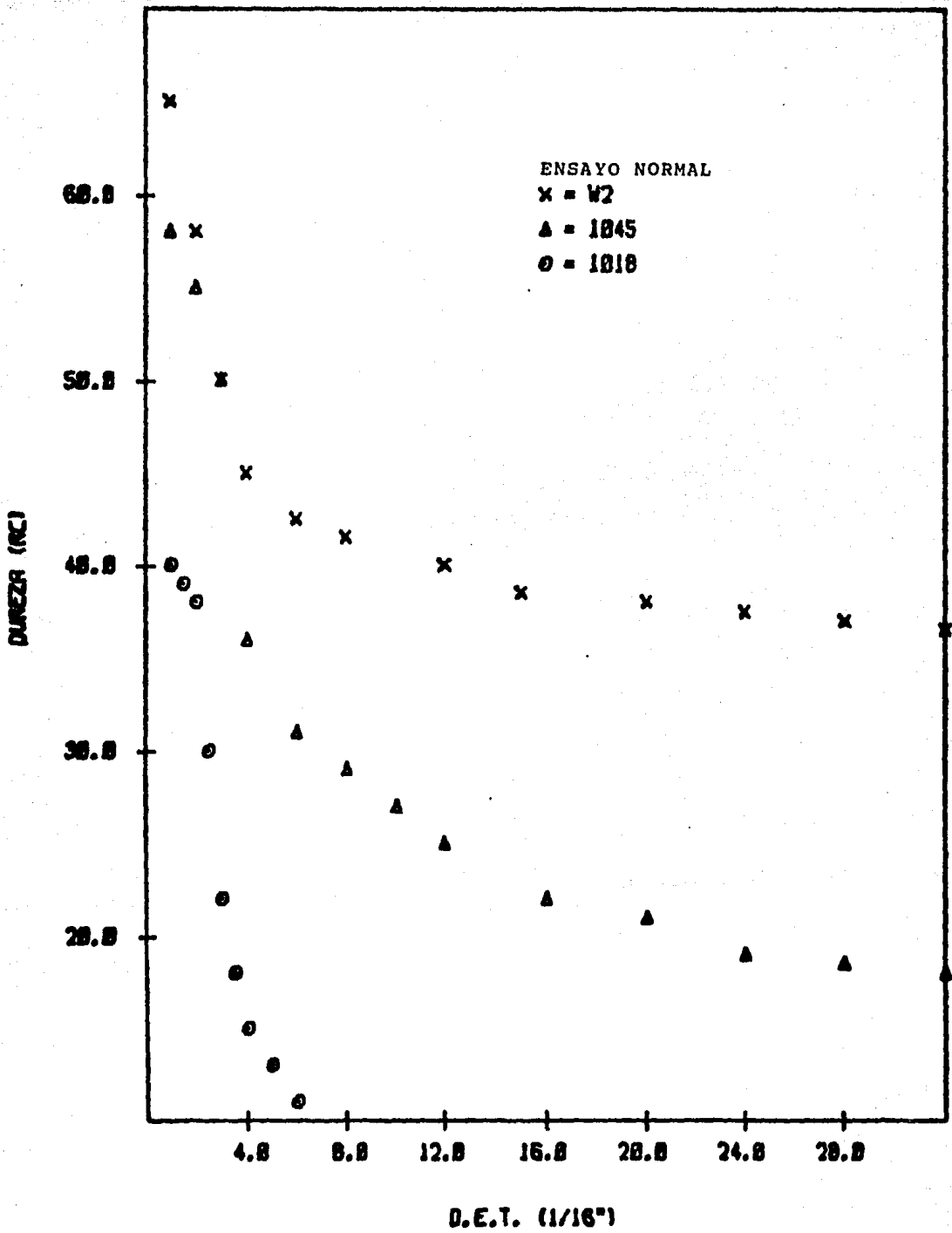


FIG. S.1

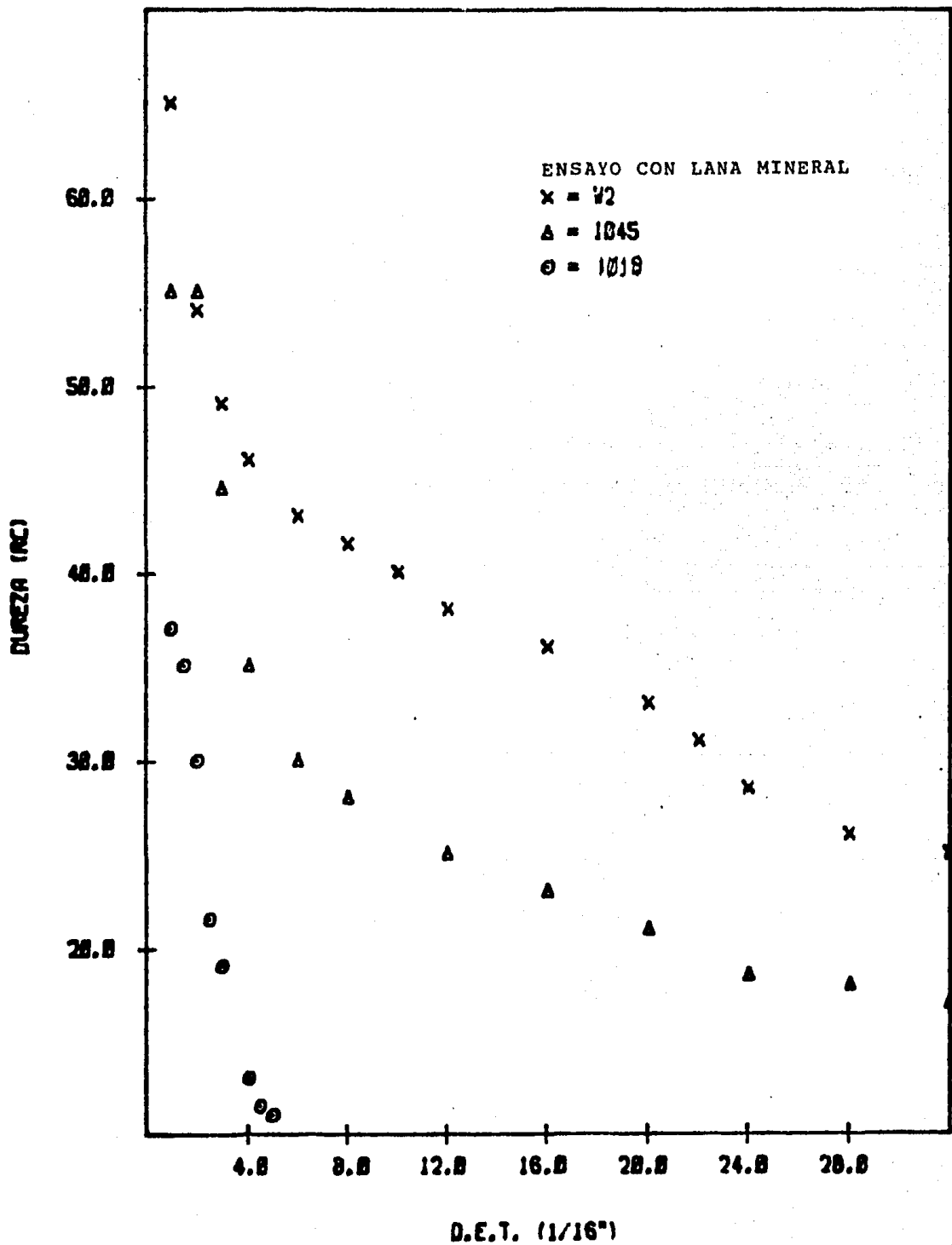


FIG. 5.2

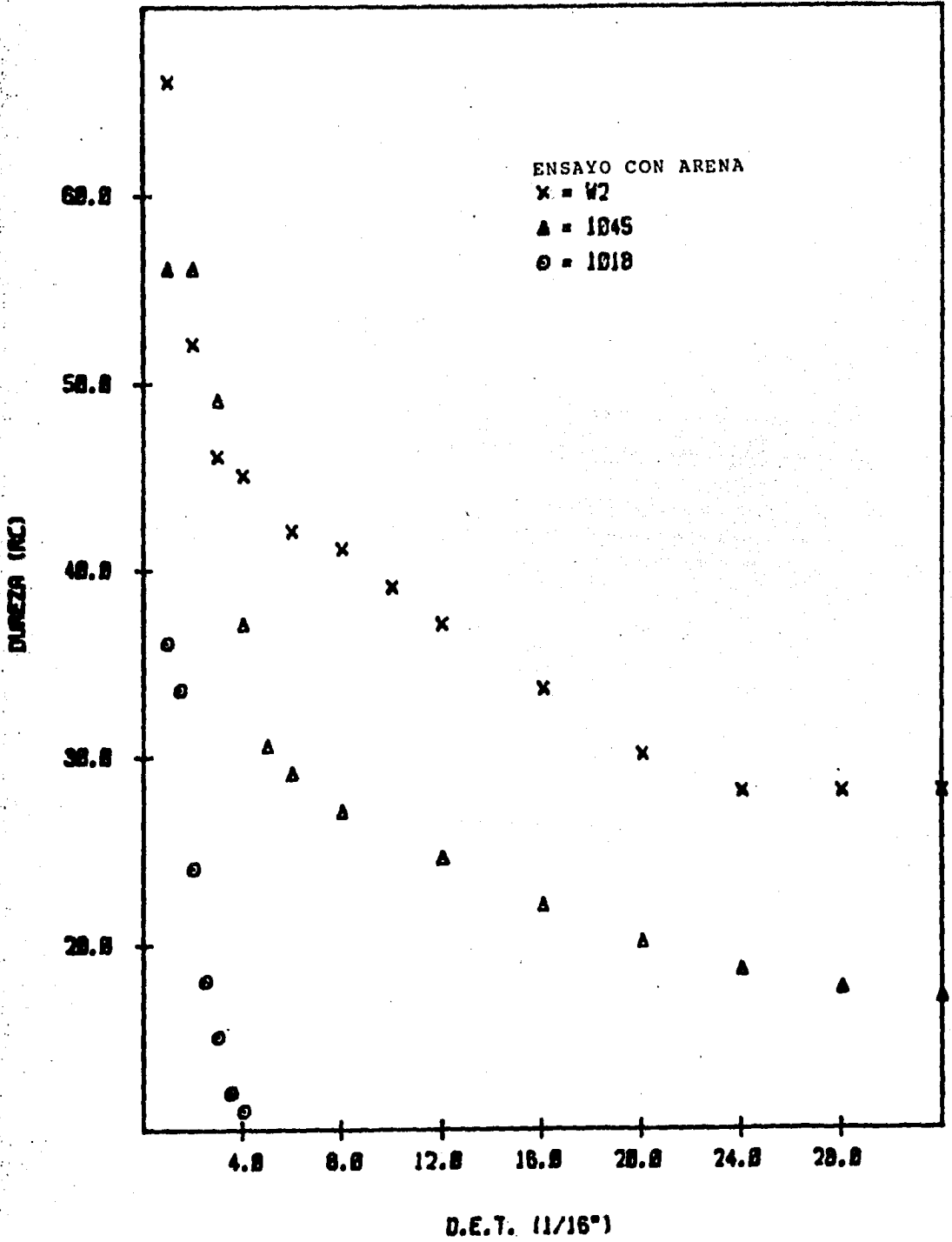


FIG. 5.3



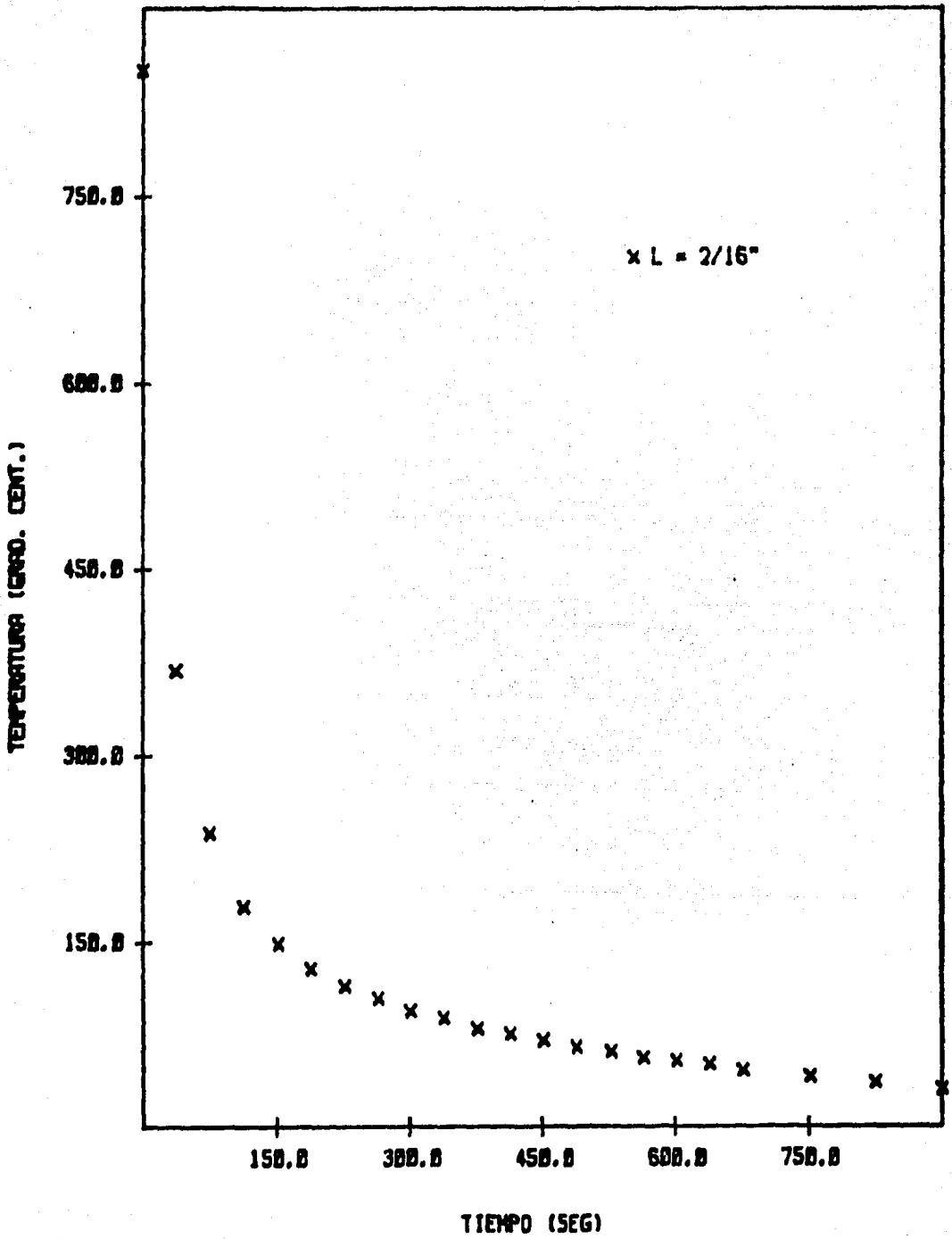


FIG. 5.4

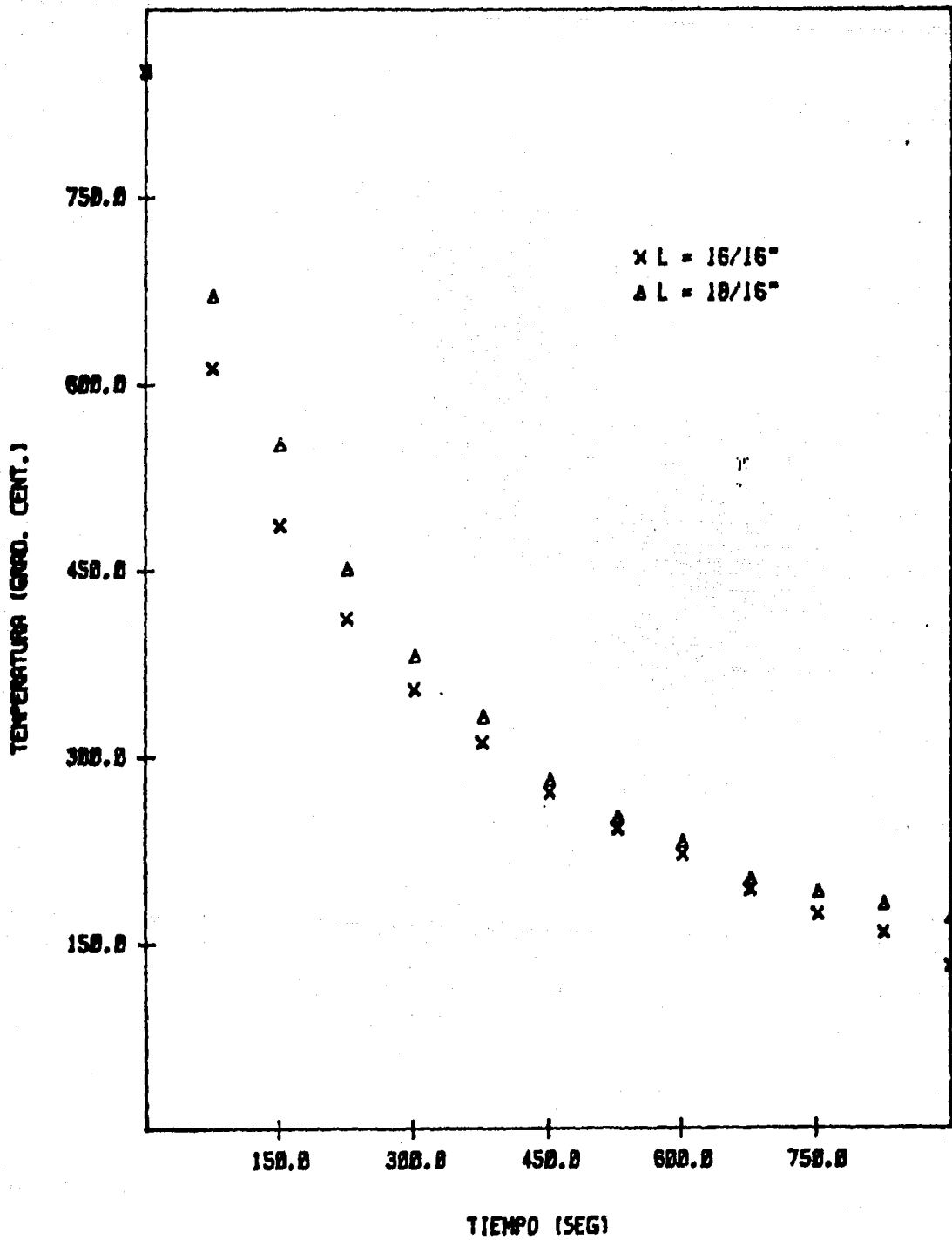
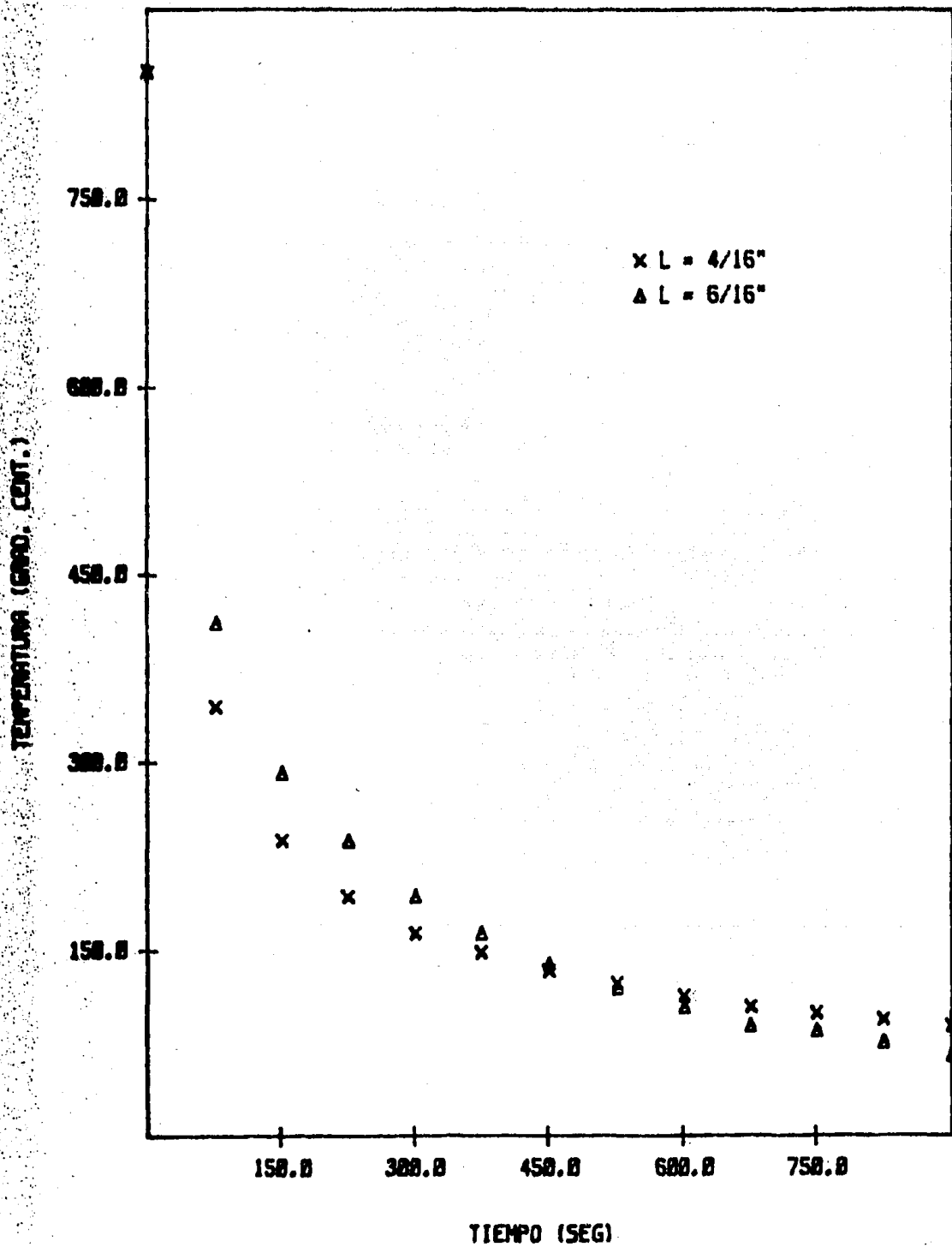


FIG. 5.4D



TIEMPO (SEG)

FIG. 5.4A

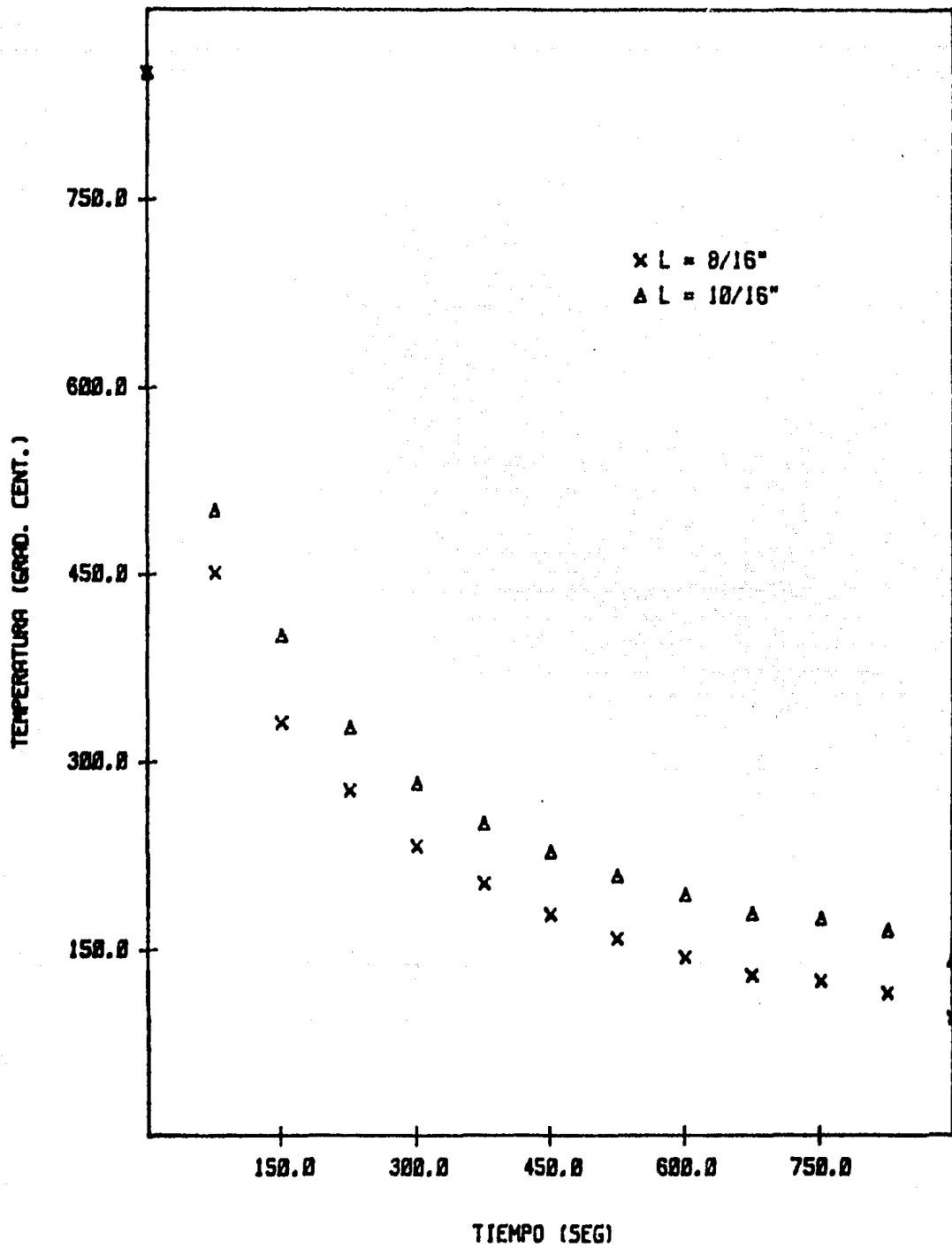


FIG. 5. 4B

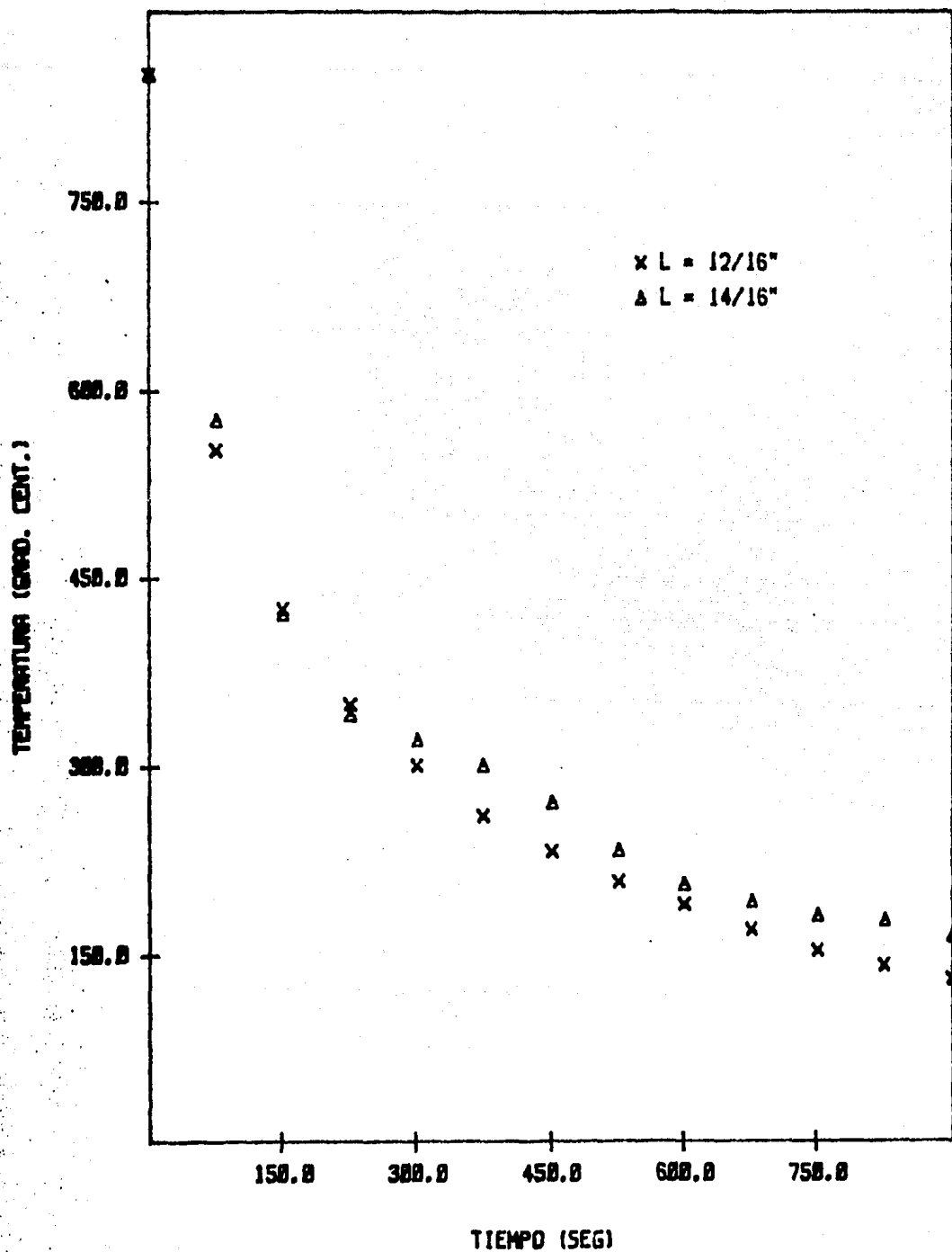


FIG. 5.4C

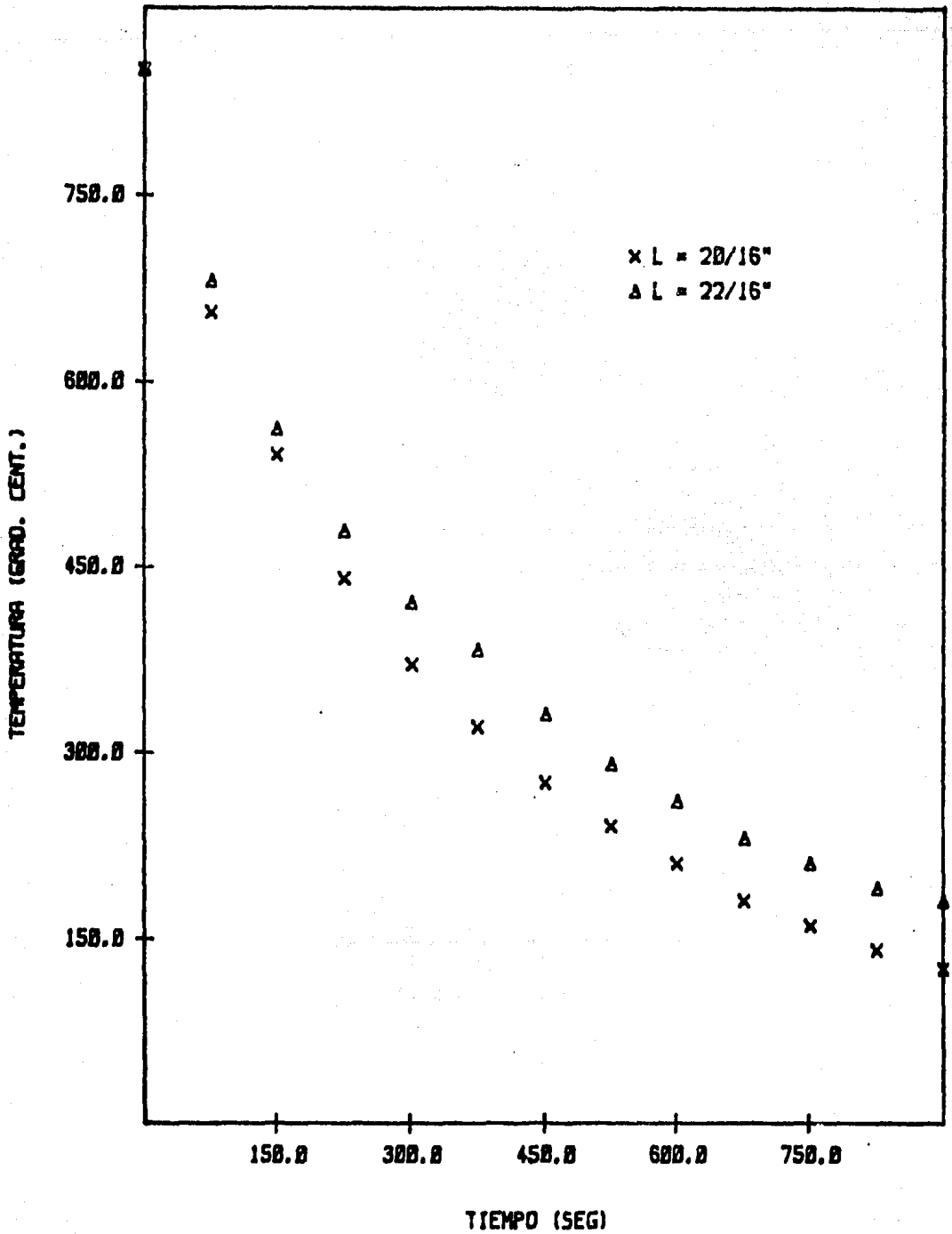


FIG. 5.4E

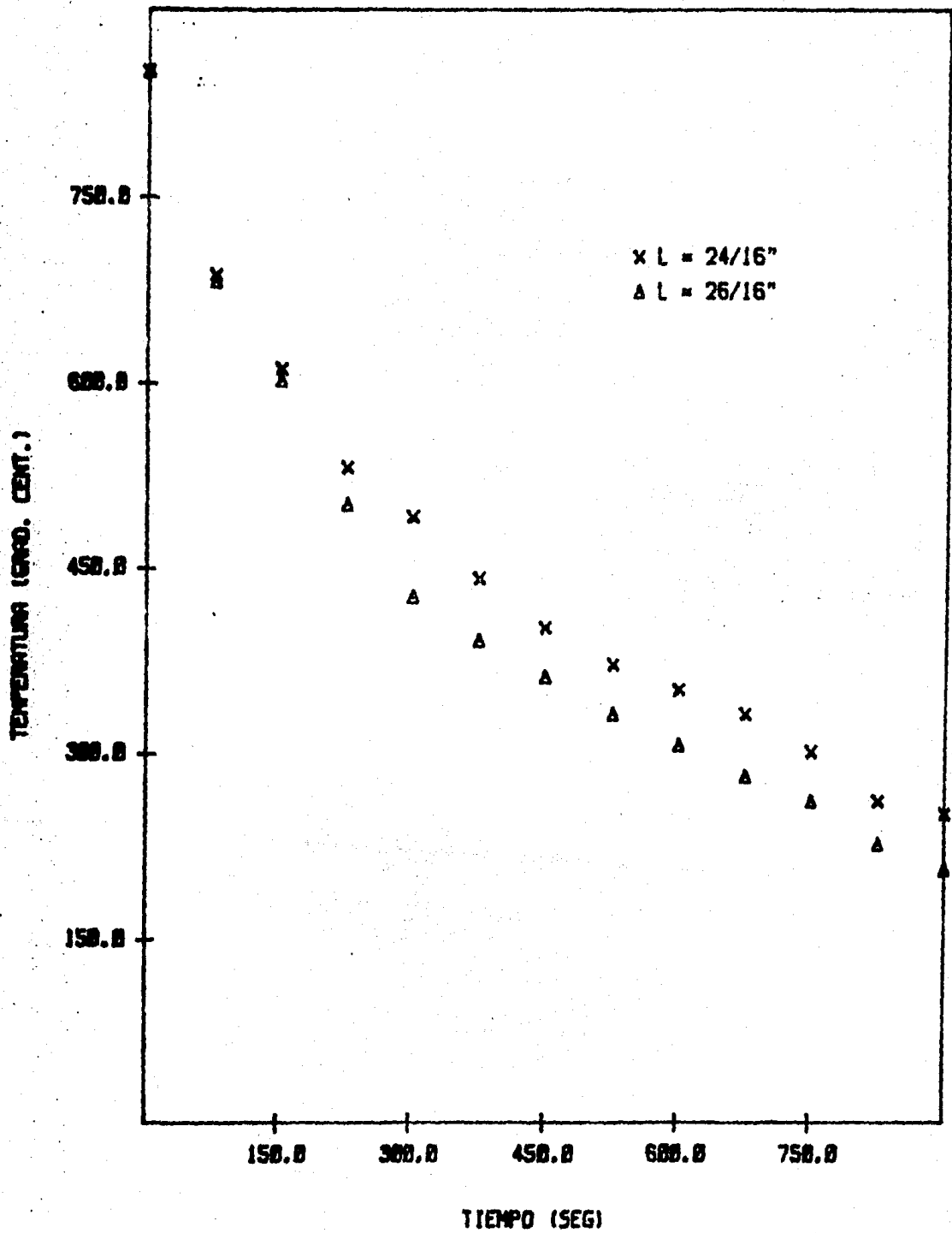
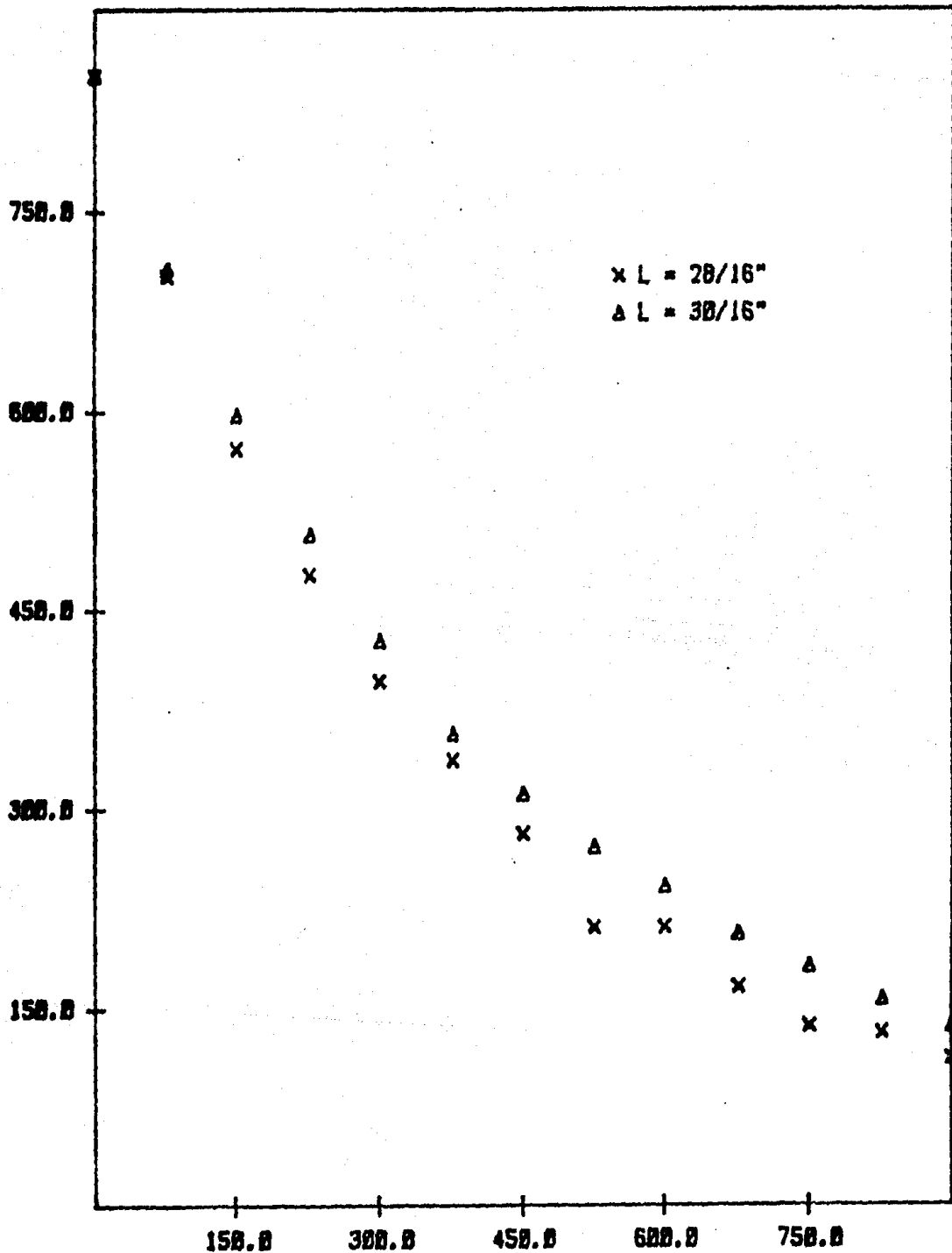


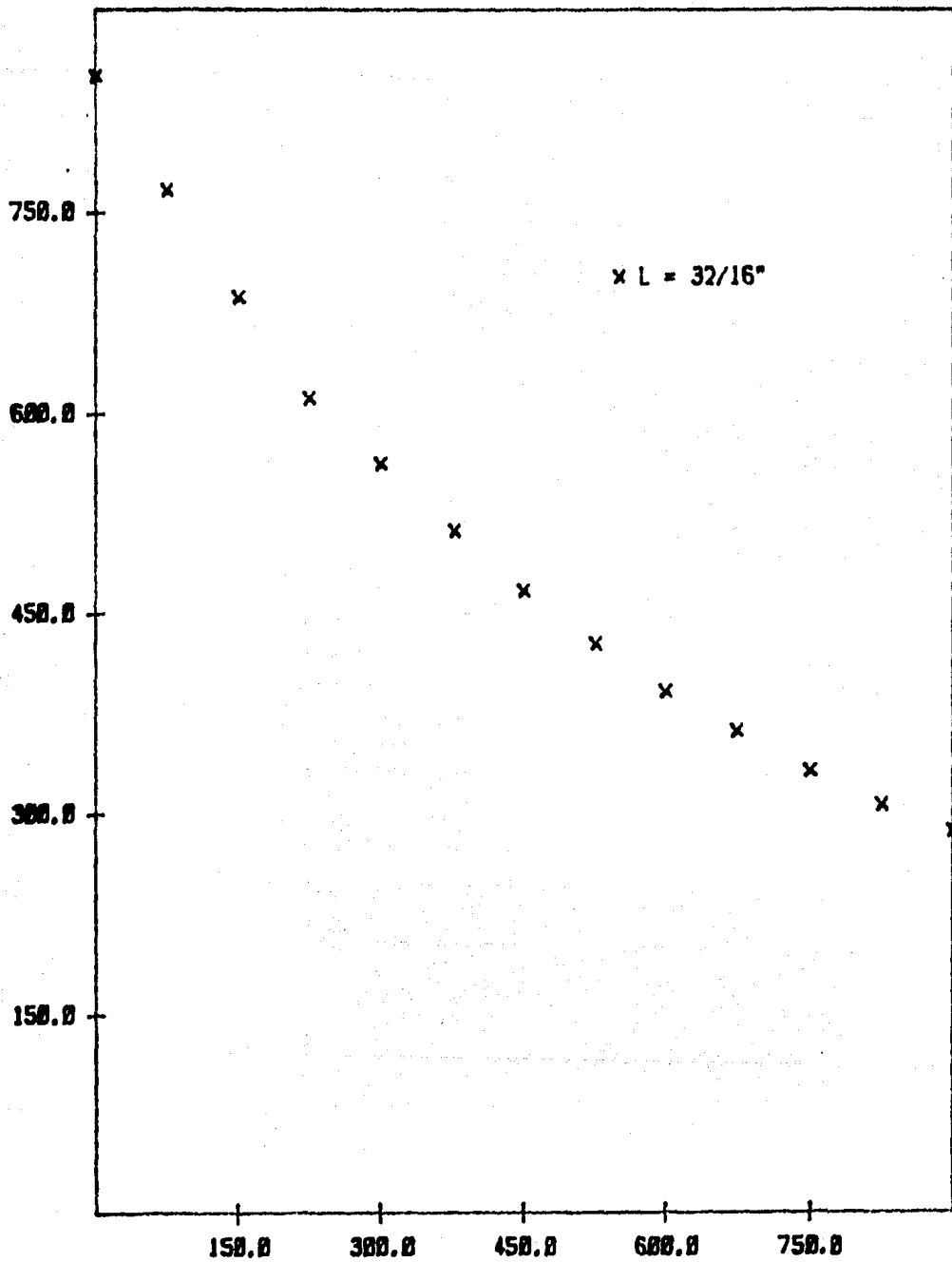
FIG. 5.4F



TIEMPO (SEG)

FIG. 5.4G





TIEMPO (SEG)

FIG. 5.4H

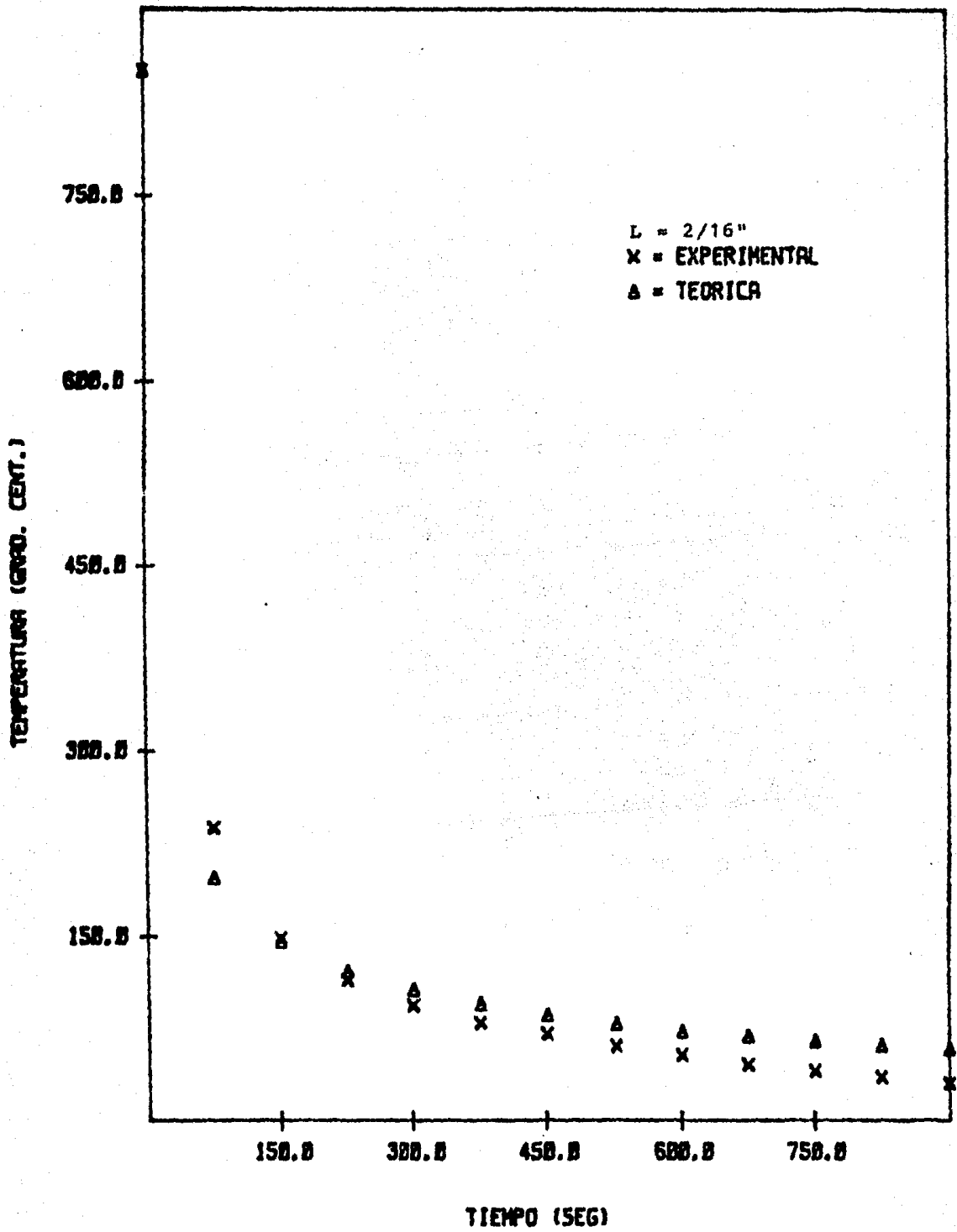


FIG. 5.5

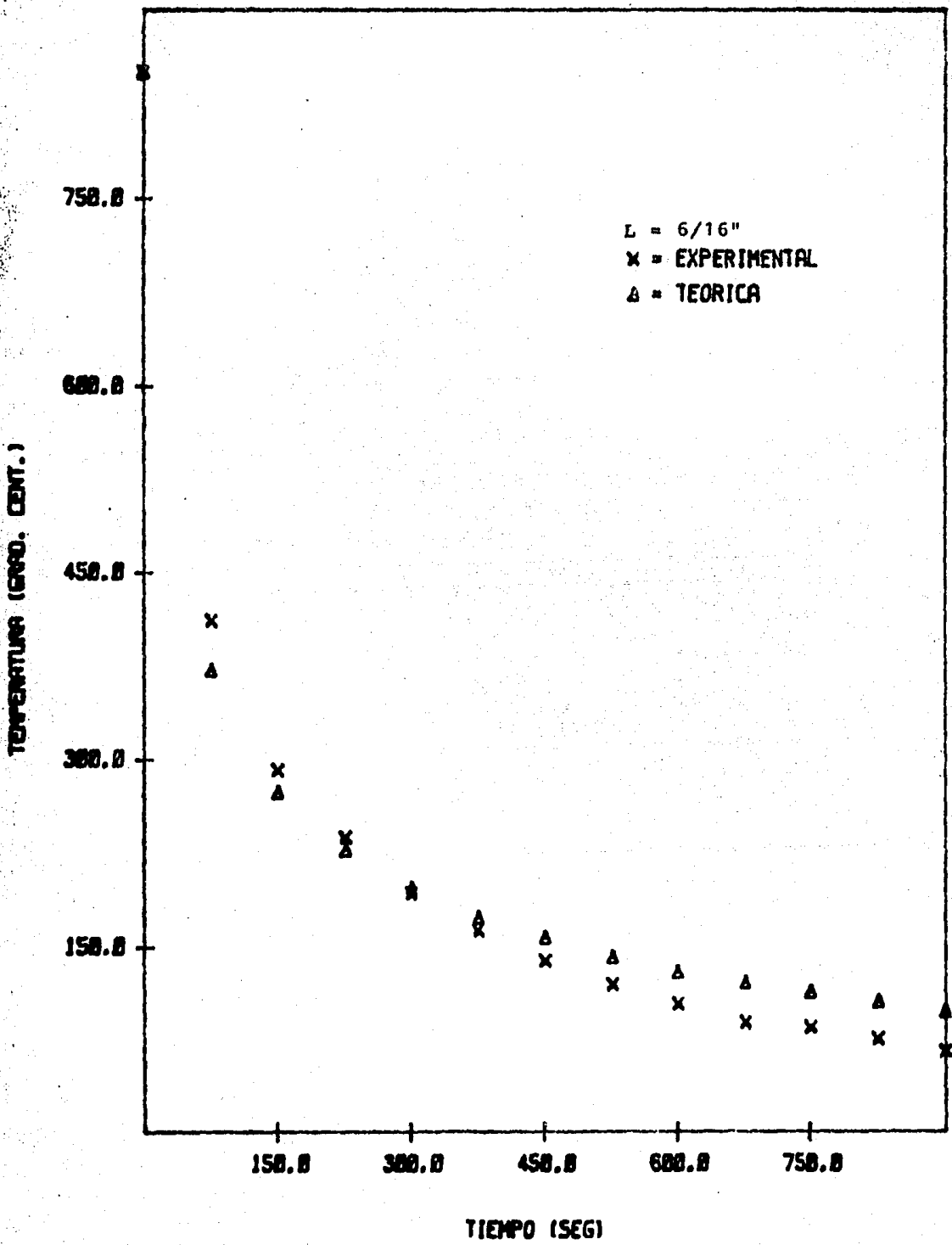


FIG. 5.6

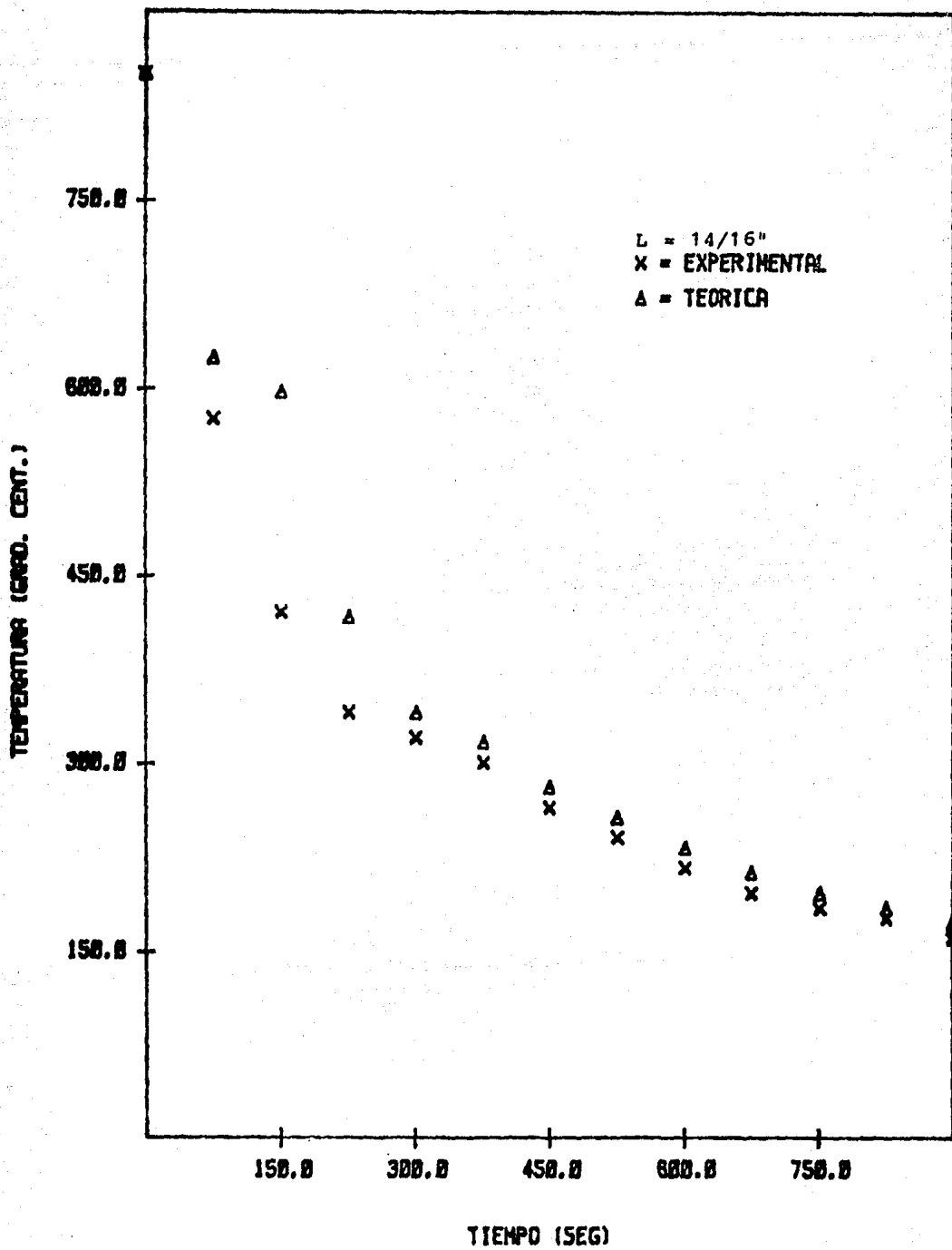


FIG. 5.7

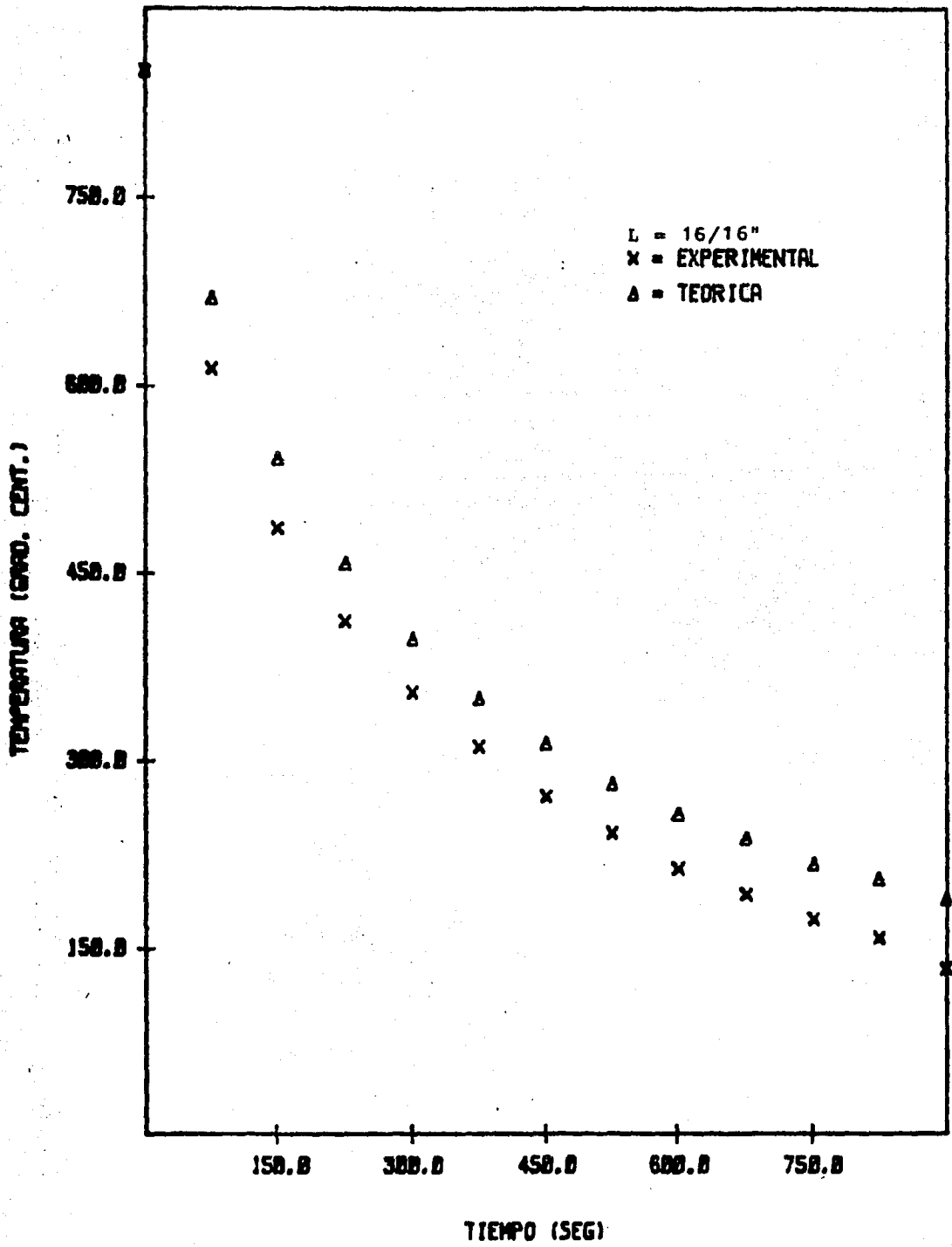


FIG. 5.8

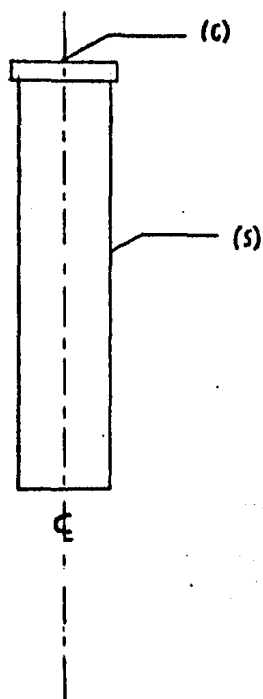


Fig. No. 5.9. Temperaturas en la región central (C) y superficial (S) de la muestra Jominy.

CAPITULO VI

DISCUSION

Analizando los resultados, en general, para las distintas clases de acero, se observa que sí existe variación al aislar la muestra longitudinalmente en la velocidad de enfriamiento cuando se compara con el ensayo a condiciones normales.

Ahora bien, para discutir los resultados en cada uno de los aceros trabajados, se toma como referencia el valor obtenido con el ensayo normal.

El proceso de enfriamiento en el ensayo modificado es similar al descrito en el capítulo anterior pero con la diferencia de que ahora el dispositivo aislante no permite la disipación de calor en el sentido radial, teniéndose más tiempo para la realización de la transformación. Al chocar el agua con el extremo inferior de la muestra y debido a la diferencia de temperaturas entre estos, causa que el flujo de calor se efectúe principalmente en el sentido axial, aún en el ensayo modificado, ocasionando que los puntos cercanos a este extremo se enfríen más rápidamente, al aumentar la distancia del extremo templado el proceso de enfriamiento es lento porque hay un incremento en la resistencia térmica y trae como consecuencia que la parte superior se enfríe lentamente.

Esta última discusión explica los resultados experimentales, que a continuación se mencionan: en el acero 1018 se observa que el valor de dureza máximo a 1/16" se logra con el -



ensayo normal, mientras que con los otros dos ensayos la dureza es 3 unidades Rockwell C menor, y comparativamente entre estos 2 últimos no hay diferencia alguna.

Para el acero 1045 sucede prácticamente lo mismo que en el caso anterior, la máxima dureza se obtiene con el ensayo normal, al utilizar el dispositivo ésta propiedad disminuye, como se describió en el capítulo anterior. La variación entre los ensayos modificados y el normal es de 2 unidades Rockwell C en promedio.

Con respecto al acero W2 y analizando las 3 curvas y como se describió en el Capítulo V, la influencia del aislamiento de la muestra no se manifiesta en los primeros 10/16" del extremo templado, es decir, no hay variación considerable en la dureza, pero después del mencionado punto, el aislamiento tiene un gran efecto, entre los ensayos modificados y el normal, ocurriendo una notable separación de las curvas Jominy de los ensayos modificados con respecto al normal. Entre el ensayo realizado con el dispositivo y lana mineral y arena, también existe -- una pequeña variación en la dureza, siendo mayor esta propiedad en el primero.

Los resultados esperados teóricamente son: que la curva Jominy obtenida con el ensayo normal quedara situada por encima de las otras dos, seguida de la resultante con el dispositi-

tivo y lana mineral y por último con arena, esto debido a que el material mencionado en segundo término es más aislante térmico que la lana mineral, conservándose por más tiempo la temperatura, promoviendo con ello que las transformaciones de fases -- sean más lentas, originando microestructuras con baja propiedad en la dureza; además presentando una característica en común: -- la dureza en el extremo templado fuera igual para las 3 pruebas debido a que en todas ellas se está sometiendo al mismo tratamiento, y además la variación en la distribución de durezas, cuyo orden de mayor a menor sería el mencionado anteriormente.

Refiriéndose ahora a las curvas de enfriamiento tanto las calculadas por el modelo como experimentales, se observa -- que hay una cierta similitud entre ellas hasta el punto situado a 14/16" del extremo templado, y a fin de que se pudiera hacer esta comparación teórica-experimental, se realizaron varias corridas del programa de computación hasta ajustar el modelo a -- los datos experimentales. Para que los resultados experimentales como los calculados por el modelo se pudieran comparar, el intervalo de tiempo utilizado en las gráficas fué de 75 segundos en ambos casos con el objeto de tener constante este término y la comparación sea más precisa. El intervalo de tiempo mencionado se debe a la escala utilizada en el registrador de temperaturas.

A partir de los 16/16" y hasta las 2", los resultados

teóricos difieren bastante de los experimentales, la curva teórica se separa de la experimental, situándose ésta última por debajo de la mencionada en primer término, esto quiere decir, que el análisis sólo describe el proceso de enfriamiento y con bastante aproximación del extremo templado hasta los 14/16".

Considerando los valores de temperatura calculados para las regiones central y superficial de la muestra, hay 10  $^{\circ}\text{C}$  de diferencia durante todo el ensayo en una distancia de 12.7 mm y comparándolos con dos puntos del eje central, se puede ver que esta diferencia no es considerable, sin embargo, la diferencia de temperaturas en el eje axial si es determinante porque va desde un máximo de 132  $^{\circ}\text{C}$  en los primeros 75 segundos de enfriamiento hasta 3  $^{\circ}\text{C}$  mínimo a 900 segundos de enfriamiento y como este proceso de enfriamiento se efectúa donde hay un mayor gradiente de temperatura, el sentido axial predomina sobre el radial, aun cuando no se pudieron registrar curvas de enfriamiento en el centro de la muestra ésta última discusión apoya a la teoría de que el proceso de enfriamiento de la muestra es principalmente en el sentido axial, aunque la muestra se aisle longitudinalmente. El modelo es aceptable porque cumple con su objetivo, aunque no en todos los puntos, porque no considera los errores ocurrentes durante las pruebas realizadas. El análisis térmico predice las curvas de enfriamiento en estas clases de aceros al carbono, con gran aproximación hasta los 14/16" y estas curvas se pueden asociar a velocidades de enfriamiento.

C A P I T U L O   V I I

C O N C L U S I O N E S   Y

R E C O M E N D A C I O N E S

1.- Si existe influencia en la velocidad de enfriamiento al aislar la muestra, aunque ésta es mínima, es decir hay una diferencia de 2 unidades de dureza Rockwell C en promedio con respecto al ensayo Jominy normalizado.

2.- Al aislar la muestra se obtienen valores de dureza menores comparados con el ensayo normal. Esta variación es de 3 unidades Rockwell C en los aceros con bajo y medio contenido de carbono.

3.- En el caso de aceros con alto contenido de carbono (W2), el hecho de aislar la muestra se manifiesta marcadamente a partir de los 10/16" del extremo templado; esto se observa por la gran diferencia que existe en los valores de la dureza en las curvas Jominy.

4.- El análisis térmico propuesto describe el proceso de enfriamiento con gran aproximación hasta los 14/16" del extremo templado.

5.- La diferencia de temperaturas en el sentido radial es de 10 °C en promedio y en el eje axial de 132 °C máximo a una misma distancia, por lo que el gradiente de temperatura es mayor en este eje, originando que el flujo de calor sea principalmente unidireccional

Las recomendaciones que se pueden plantear para posteriores trabajos son: predecir en cierta forma microestructuras y por lo tanto propiedades mecánicas con ayuda del correspondiente diagrama isotérmico, aplicar este análisis a aceros de baja y media aleación, compararlo con el análisis térmico propuesto por Ziviani<sup>(18)</sup>, en donde propone que el flujo de calor es unidireccional resolviendo el mismo modelo bajo diferentes condiciones con una técnica diferencial parcial. Considerar en este análisis presentado el dispositivo aislante y registrar sus perfiles de temperatura experimentales para compararlos.

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

- 1.- Anual ASTM Standards 1980, pte. 5
- 2.- Apraiz Barreiro J., Tratamientos Térmicos de los Aceros, Ed. DOSSAT, Madrid, 1971.
- 3.- Bain E.C., Paxton H.W., Alloying Elements in Steel, AMS, 1939.
- 4.- Brown G.T., Re-Appraisal of the Jominy Test and its Applications, G.K.N. Group Technological Centre, Wolverhampton England.
- 5.- Delicado del Valle J., Curvas Jominy y sus Aplicaciones - Industriales.
- 6.- Fox L., Numerical Solution of Ordinary and Partial Differential Equations, Adison, Wesley, 1962.
- 7.- Grossman M.A., Bain E.C., Principios de Tratamiento Térmico, AMS, Ed. Blume, 1977.
- 8.- Jominy W.E., Boegehold A.L., A Hardenability Test for Carburizing Steel, Transactions, AMS, vol. 26, 1938.
- 9.- Just E., New Formulas for Calculating Hardenability Curves. International Report, Nov. 1969.
- 10.- Leslie W.C., The Physical Metallurgy of Steel, Mc Graw-Hill, Book Company.
- 11.- Ozisik M.N., Heat Conduction, Mc Graw-Hill, Book Company
- 12.- Ozisik M.N., Transferencia de Calor, Mc Graw-Hill Latinoamericana S.A., 1979.
- 13.- Rowland E.S., Welchner J., Hill R.G., The Effect of Carbon Content on Hardenability, Transaction, AMS, Vol. 35 - 1945.
- 14.- Siebert C.A., Doane D.V., Breen D.H., The Hardenability - of Steel, AMS, 1977.
- 15.- Smith G.V., Numerical Solution of Partial Differential Equations with Exercises and Work Solutions, Oxford, U. -- Press, 1965.
- 16.- Trout H.E., Some Thoughts on Hardenability of Steel, Industrial Heating, Oct. 1965.



- 17.- Weymueller C.R., Specifying Steels to Solve Hardenability Problems, Metal Progress, Ap. 1973.
- 18.- Ziviani Márcio, Análise Térmica do Ensaio de Temperabilidade Jominy, Tese de Mestrado, EE UFMG, 1977.