

T
672.36
A353
C.2

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

EVALUACION DE CEMENTANTES SOLIDOS PARA ACERO

SAE 1020

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE

INGENIERO MECANICO

PRESENTADO POR

OTHON FERNANDO ALCIVAR BUSTAMANTE

GUAYAQUIL - ECUADOR

- 1983 -

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior
Politécnica del Litoral.

A los profesores del
Departamento de Ingeniería
Mecánica.

Al señor Ing. Ignacio Wiesner F.,
Director de tesis, por la ayuda
prestada para la realización del
presente trabajo.

A los señores del Laboratorio
de Metalurgia Mecánica.

DEDICATORIA

A mi esposa Patricia y a mi hijo Fernando Javier.

A mis queridos padres y padres políticos.

A mis hermanos.

Ignacio Wiesner F.

.....

Ing. Ignacio Wiesner F.

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad de los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusiva - mente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Titulos profesionales de la ESPOL).


.....
OTHON FERNANDO ALCIVAR BUSTAMANTE

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto realizar una investigación relacionada con el proceso de cementación en medio sólido, también conocido como proceso de carburación, con el cual se consigue aumentar el contenido de carbono en la superficie de una pieza de acero de bajo contenido de carbono mientras que el núcleo permanece prácticamente con su composición original.

Se investigó dicho proceso utilizando tres diferentes tipos de cementantes, a saber: carbón activado, carbón vegetal y carbón mineral. A continuación se realizó una evaluación de los resultados obtenidos, en lo referente a espesor de capa cementada y a la dureza para cada tipo de carbón, habiéndose encontrado como resultado de dicha evaluación que el carbón mineral puede reemplazar sin problema al carbón activado que es el de uso común en nuestro medio, se encontró además que el carbón vegetal puede ser usado para procesos en los que se quiera obtener una capa cementada de poco espesor.

Finalmente, se realizó un proceso típico de cementación con tratamientos térmicos posteriores, temple y revenido, utilizando el carbón mineral como cementante.

INDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVII
INTRODUCCION	18
CAPITULO I	
FUNDAMENTOS TEORICOS	
1.1 Generalidades	20
1.2 Aplicaciones del proceso	25
1.3 Estudio Físico-Químico del proceso	27
1.3.1 Reacciones químicas que se producen	27
1.3.2 El proceso de difusión	32
1.3.3 Parámetros que intervienen en este proce- so	55
1.3.4 Cementantes sólidos	58
1.3.5 Activadores del proceso	66
1.4 Aceros usados en el proceso de cementación ...	68
1.4.1 Aceros al carbono	70
1.4.2 Aceros débilmente aleados	71
1.4.3 Aceros de alta aleación	72
1.5 Cajas para cementación en medio sólido	74

1.6 Tratamientos térmicos posteriores a la cementación	76
CAPITULO II	
TRABAJO EXPERIMENTAL	
2.1 Materiales utilizados	82
2.1.1 Acero SAE 1020	82
2.1.2 Materiales para cementación en medio sólido	86
2.2 Equipo utilizado	87
2.3 Análisis químico de los cementantes utilizados	94
2.4 Técnicas operativas para la cementación	96
2.5 Control del proceso	101
2.5.1 Influencia del tiempo y temperatura sobre las características de la capa cementada	101
2.5.2 Microdurometría	109
2.5.3 Variaciones de la microestructura	133
CAPITULO III	
DISCUSION DE LOS RESULTADOS	139
3.1 Evaluación de los cementantes sólidos utilizados	139
3.1.1 Carbón vegetal	143
3.1.2 Carbón mineral	145

	Página
3.1.3 Carbón activado	146
3.2 Influencia del tratamiento térmico posterior en las características de la capa cementada ..	147
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	150
APENDICES	153
BIBLIOGRAFIA	159

LISTA DE FIGURAS

Número		Página
1.1	Gráfico obtenido de la ecuación (6)	38
1.2	Gráfico para la obtención de la segunda ley de Fick.	47
1.3	Límites de integración tomados para la ecuación del coeficiente de difusión D.	54
1.4	Profundidad de la penetración del carbono que se consigue a diferentes temperaturas en función de las horas de cementación.	56
1.5	Contenido en carbono de la capa cementada en función de la duración en horas de la cementación, cuando esta se realiza a 925°C	57
1.6	Influencia de la temperatura de cementación en la composición de la capa cementada. Duración de la cementación 48 hr.	57

Número		Página
1.7	Diferentes clases de tratamientos que se pueden dar a las piezas cementadas.	76
2.1	Diagrama de carburación del acero SAE 1020 a 900°C.	84
2.2	Diagrama de revenido del acero SAE 1020 durante 30 minutos.	85
2.3	Diagrama TTT para el acero SAE 1020	85
2.4	Horno LINBERG modelo 41-HC-10188-18AM	89
2.5	Microdurómetro	90
2.6	Microscopio Olympus, modelo 202827	91
2.7	Caja de cementación	92
2.8	Equipo de seguridad	93
2.9	Acero cortado para hacer las probetas y embutidas al finalizar el proceso de cementación.	97

Número		Página
2.10	Espesores de capa cementada a 850°C	102
2.11	Espesores de capa cementada a 900°C	104
2.12	Espesores de capa cementada a 950°C	106
2.13	Espesores de capa cementada a 1000°C	108
2.14	Durezas obtenidas con c. activado a 850°C	110
2.15	Durezas obtenidas con c. activado a 900°C	112
2.16	Durezas obtenidas con c. activado a 950°C	114
2.17	Durezas obtenidas con carbón act. a 1000°C	116
2.18	Durezas obtenidas con c. vegetal a 850°C	118
2.19	Durezas obtenidas con c. vegetal a 900°C	120
2.20	Durezas obtenidas con c. vegetal a 950°C	122
2.21	Durezas obtenidas con c. vegetal a 1000°C	124

Número		Página
2.22	Durezas obtenidas con c. mineral a 850°C	126
2.23	Durezas obtenidas con c. mineral a 900°C	128
2.24	Durezas obtenidas con c. mineral a 950°C	130
2.25	Durezas obtenidas con c. mineral a 1000°C	132
2.26	Microestructura del acero SAE 1020	133
2.27	Vista general de la capa cementada con <u>co</u> ke durante 8 horas a 950°C	135
2.28	Vista en detalle de la capa cementada con coke durante 8 horas a 950°C	138
2.29 y 2.30	Microestructura del acero SAE 1020 des <u>u</u> pués del tratamiento de temple	148
2.31 y 2.32	Microestructura del acero SAE 1020 des <u>u</u> pués del tratamiento de revenido.	149

LISTA DE TABLAS

Número		Página
1.1	Coeficientes de difusión (D).	46
1.2	Constantes de difusión.	52
1.3	Composición y cantidad de c. vegetal producido a diferentes temperaturas máximas.	62
1.4	Materiales producidos por tonelada de hulla a alta temperatura.	65
1.5	Reglas generales para la elección de aceros destinados a la fabricación de aceros cementados	74
2.1	Procesos de cementado para acero SAE 1020	83
2.2	Análisis químico de los cementantes utilizados	95
2.3	Espesores de capa cementada a 850°C	101

Número		Página
2.4	Espesores de capa cementada a 900°C	103
2.5	Espesores de capa cementada a 950°C	105
2.6	Espesores de capa cementada a 1000°C	107
2.7	Durezas obtenidas con c. activado a 850°C	109
2.8	Durezas obtenidas con c. activado a 900°C	111
2.9	Durezas obtenidas con c. activado a 950°C	113
2.10	Durezas obtenidas con c. activado a 1000°C	115
2.11	Durezas obtenidas con c. vegetal a 850°C	117
2.12	Durezas obtenidas con c. vegetal a 900°C	119
2.13	Durezas obtenidas con c. vegetal a 950°C	121
2.14	Durezas obtenidas con c. vegetal a 1000°C	123
2.15	Durezas obtenidas con c. mineral a 850°C	125

Número		Página
2.16	Durezas obtenidas con c. mineral a 900°C	127
2.17	Durezas obtenidas con c. mineral a 950°C	129
2.18	Durezas obtenidas con c. mineral a 1000°C	131

LISTA DE ABREVIATURAS

Ac_1	Temperatura de calentamiento crítica inferior
Ac_3	Temperatura de calentamiento crítica superior
C	Carbono
$^{\circ}C$	Grado centígrado
ccc	Cúbico de cuerpo centrado
ccac	Cúbico de cara centrada
cm	Centímetros
mm	Milímetros
Fe	Hierro
O_2	Oxígeno
CO	Oxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
CFe_3	Carburo de hierro o cementita
$Ba CO_3$	Carbonato de bario
Na_2CO_3	Carbonato de sodio
ln	Logaritmo decimal
T	Temperatura
t	Tiempo
R	Constante universal de los gases
SAE	Society of Automotive Engineers
Rc	Rockwell-c
Rb	Rockwell-b
Fig	Figura

INTRODUCCION

La mayor parte de las piezas que componen las máquinas y motores se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean bastante uniformes en toda la masa. Sin embargo, en ciertos mecanismos es necesario que algunas piezas tengan superficies muy duras, resistentes al desgaste y a la penetración, y el núcleo muy tenaz para poder soportar los choques a que están sometidas.

Los procedimientos más usados en la actualidad para conseguir estas características, gran dureza y mucha tenacidad al parecer entre sí son las siguientes: la cementación, la cianuración, la carbonitruración, la nitruración, la sulfidación, el temple local, el depósito por soldadura de delgadas capas superficiales de acero de elevado contenido en carbono y el cromado duro.

La cementación, que es el más antiguo de todos estos procedimientos de endurecimiento superficial, consiste en aumentar el contenido en carbono en las superficies de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto durante un cierto tiempo a la temperatura adecuada.

Es conocido que en nuestro medio, se usa como material cementante el carbón activado, el cual, al no ser de producción nacional, obligadamente se lo importa con el consiguiente recargo en los trabajos de cementación que se realizan.

El propósito del presente trabajo es el de experimentar con otros tipos de carbones además del mencionado anteriormente como el carbón mineral o coke y el carbón vegetal o carbón de madera. Realizadas dichas experiencias con estos tres tipos de carbones se evaluarán los resultados obtenidos en lo referente a profundidad de penetración del carbono y a la dureza, con la finalidad de recomendar o no el uso del carbón mineral y del carbón vegetal en reemplazo del carbón activado para los procesos de cementación en medio sólido.

Es necesario recalcar, sin embargo, que a pesar de que el carbón mineral o coke es también importado, tiene un costo mucho menor que el carbón activado.

Ni que decir del carbón de madera cuyo uso está muy generalizado en nuestro país.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 GENERALIDADES

La cementación es probablemente, el más antiguo de los tratamientos térmicos conocidos hasta hoy. La conversión a hierro a partir del mineral tal como se obtiene de la naturaleza, es varios centenares de años más antigua. El proceso de templar y revenir el acero era conocido ya 900 años A.C.

El hierro primeramente obtenido era sin duda producido calentando el mineral en una hoguera de carbón de leña, con características muy parecidas al moderno hierro maleable, su contenido de carbono era pequeño o nulo y no podía ser endurecido, sin embargo, si el hierro así elaborado era dejado un periodo de tiempo mayor en contacto con el carbón de leña encendido, su superficie iba a absorber carbono gradualmente. En esta forma su periferia sería rica en carbono y podría ser templada si se le enfriaba bruscamente desde elevada temperatura.

Posiblemente el primer acero haya sido obtenido en esta forma completamente accidental. La cementación era bien conocida en el siglo XVI, el procedimiento entonces seguido, consistía en calentar el hierro en contacto con un polvo com -

puesto de carbón con materiales orgánicos, también se conocía el sistema de cementar sumergiendo el trozo de hierro en fundición al estado líquido.

En los siglos XVII y XVIII la preparación de aceros hipereutectoides calentando varillas de hierro maleable en contacto con carbón de leña hasta una temperatura por debajo del punto de fusión, adquirió gran importancia, esto era conocido como el método "Elister" por el aspecto radiante que tomaban las varillas al finalizar el proceso. Las varillas utilizadas eran de hierro maleable de 15 a 19 mm de diámetro y calentadas en carbón de leña hasta una temperatura cercana a los 1040 grados centígrados entre 7 y 10 días. Desde el año 1740 muchos de los aceros así obtenidos y endurecidos eran refinados fundiéndolos en crisoles. El método descrito anteriormente, es de interés histórico solamente.

Después de hacer esta revisión histórica, se puede manifestar que los objetivos de someter a las aleaciones ferrosas, en atmósferas generadas por carbón han sido las siguientes:

- 1.- Cambio sustancial del carbono, tanto para desalojarlo como para introducirlo en el metal.
- 2.- Cambiar las propiedades mecánicas.

Que para el caso que aquí se trata, son conocimientos muy importantes.

En general, se ha establecido que la cementación es el proceso mediante el cual se eleva el contenido superficial de carbono en una pieza de acero, con el fin de mejorar la resistencia de las capas más externas. La cementación se la puede realizar a través del mantenimiento del metal a temperaturas elevadas en atmósferas con mezclas gaseosas CO/CO_2 o con carbón.

Cualquier mezcla $\text{CO} - \text{CO}_2$ que sea carburante, a una cierta temperatura y con relación a un acero de composición determinada, podrá producir un enriquecimiento en carbono, hasta que se alcance un tanto por ciento que corresponda al de e-quilibrio con la mezcla para la temperatura en cuestión.

El mecanismo a través del cual el carbono penetra o se disuelve en el acero, se explica de la siguiente forma: la mezcla gaseosa debe producir una concentración de soluto en el me - tal igual a la máxima posible (la de equilibrio o la de saturación, según la composición de la mezcla) en una capa superficial infinitamente delgada, y para que la carburación progrese en profundidad, es necesario que el carbono de esta capa superficial se difunda hacia el interior de la pieza gracias al gradiente de concentración (y por lo tanto de potencial de carbono creado).

Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos ,

oscilando la duración de la cementación de 4 a 10 horas cuando se utilizan cementantes sólidos, de 1 a 6 horas cuando se trata de sales o de cementantes líquidos y de 1 hora a varios días utilizando cementantes gaseosos. Se emplean aceros aleados y sin aleación, de bajo contenido en carbono, generalmente de 0,08 a 0,25 %. La operación se realiza a temperaturas comprendidas entre 850 y 1000 grados C, siendo las temperaturas próximas a 900°C las más utilizadas.

La cantidad y distribución del carbono absorbido por las piezas depende de:

- a.- La composición del acero sometido a la cementación.
- b.- La naturaleza de la sustancia cementante.
- c.- La temperatura y la duración de la cementación.

Una pieza después de cementada se puede considerar compuesta, por dos zonas principales de composición química diferente ; el alma o núcleo central y la periferia o capa cementada, existiendo entre ellas otra tercera zona de transición de menor importancia. Por quedar después de la cementación, la capa exterior con un alto contenido en carbono y el corazón, de la composición inicial, es posible obtener luego gran dureza

en la periferia y alta tenacidad en el núcleo. Pero, como solo con la cementación, las piezas no adquieren estas propiedades, es necesario hacerles temple. Después de la cementación, la periferia a pesar de tener un elevado contenido en carbono, está todavía relativamente blanda y el núcleo aún - siendo de muy bajo contenido en carbono, puede ser frágil - por tener la estructura muy grosera por haber permanecido el acero durante mucho tiempo a alta temperatura. Como la periferia y el núcleo de las piezas cementadas son de distinta - composición, necesitarán diferentes tratamientos, pero como las dos zonas son inseparables, esos tratamientos deberán - ser de tal naturaleza, que actúen favorablemente sobre las dos partes, o que si favorecen a una, sean lo menos desfavorables para la otra.

Se da el nombre de capa cementada a la zona que después de la cementación queda con un contenido de carbono superior a la del acero original y recibe el nombre de capa dura la zona superficial que después del último tratamiento queda con una dureza superior a 60 Rockwell-c (Rc).

Se puede considerar, que en la mayoría de las piezas cementadas el espesor de la capa dura varía de la cuarta parte a la mitad de la profundidad de la capa cementada.

A veces en lugar de hacer referencia a la profundidad de la capa cementada, se señala, según preferencias la capa con carbono superior a 0,5 %. Esto se hace porque en ocasiones ese espesor es casi aproximadamente el de la capa dura.

1.2 APLICACIONES DEL PROCESO

En cuanto a las aplicaciones en sí, los espesores de las capas cementadas que normalmente se emplean en las piezas de máquinas y motores, se pueden clasificar en los siguientes grupos:

1.- Capas delgadas con menos de 0,5 mm de espesor de cementación.

Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono las cuales deberán ser templadas directamente desde la temperatura de cementación. Es importante recalcar que dichas piezas se las deberá utilizar siempre sin rectificado posterior, tales como tuercas hexagonales, eslabones, pasadores de bisagras, etc.

2.- Capas medias de 0,5 a 1,5 mm de espesor.

Estos espesores son los más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores, tales como porta cojinetes, levas ,

bujes, engranajes, ejes de levas, pinones de transmisión, etc.

3.- Capas de gran espesor, superiores a 1,5 mm.

Se las emplea en aplicaciones muy especiales y son obtenidas con cementantes gaseosos y con materias sólidas y muy raramente con cementantes líquidos. Las chapas de blindaje que suelen fabricarse con capas cementadas de 3 a 4 mm son cementadas con gases.

Cualquiera que sea el proceso que se emplee, conviene - que el contenido en carbono de la capa cementada no pase de 1 % y debe procurarse que la parte periférica de la - pieza después de rectificada, quede aproximadamente con - 0,8 a 0,9 % de carbono con lo que se obtiene en el temple durezas de 62 a 65 Rc. Siempre conviene obtener durezas - superiores a 60 Rc que es aproximadamente el límite de dureza en que la lima ya no marca al acero.

Cuando el contenido en carbono de la zona periférica es - superior a la composición eutectoide de 0,78 % de C, suelen aparecer redes de cementita o de carburos que pueden hacer frágil la capa cementada y con tendencia a descascarillarse. En estos casos se da a las piezas después de la cementación un recocido de difusión a unos 800 grados C

en una atmósfera o baño apropiado para disminuir el porcentaje de carbono de la periferia. Con este tratamiento se uniformiza bastante el contenido en carbono y se evitan posibles desconchamientos en las piezas cementadas.

1.3 ESTUDIO FISICO-QUIMICO DEL PROCESO

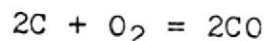
1.3.1 REACCIONES QUIMICAS QUE SE PRODUCEN

Durante mucho tiempo se creyó que la cementación de los aceros se verificaba al penetrar el carbono del cementante sólido a través de la superficie del acero y difundirse luego hacia el interior. Pero se ha comprobado que la transferencia del carbono al acero, se verifica siempre por medio de los gases que se desprenden al calentarse las mezclas cementantes a alta temperatura, siendo en estos procesos el óxido de carbono el principal agente carburante. Si se coloca un trozo de acero rodeado de materias carburantes y se calienta a unos 900°C en el vacío, de forma que no haya gases a su alrededor, el acero no absorbe carbono. Para que la cementación se verifique, ha de ponerse el carbono en contacto con la superficie del acero caliente en un estado adecuado para que se verifique la absorción. El éxito de la cementación, depende en gran

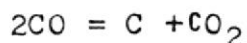
parte de la aptitud del medio carburante para sumi
nistrar y rodear la superficie del acero con carbon
no en un estado que se puede llamar activo, de tal
naturaleza que la absorción por el acero se efec -
túe rápidamente.

La experiencia ha demostrado que el carbono nacien
te que se forma en el interior de las cajas de ce-
mentación al descomponerse el óxido de carbono se
encuentra en un estado muy favorable para que se
produzca la cementación. El proceso de cementación
por el carbón vegetal, coke o activado, se explica
en la siguiente forma:

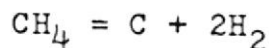
El carbón a elevada temperatura en contacto con el
oxígeno del aire que hay siempre en el interior de
las cajas entre los huecos que deja la materia ce-
mentante da óxido de carbono (CO) según la siguiente
reacción:



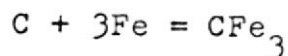
Luego el óxido de carbono formado se descompone a
elevada temperatura en carbono naciente y dióxido
de carbono:



En algunos procesos (en especial en la cementación gaseosa) también se realiza la cementación por la acción del metano que se descompone en hidrógeno y carbono naciente de acuerdo a la siguiente reacción:



En todos los casos, el carbono naciente que se forma es el que produce la cementación. Al estar en contacto con el hierro a alta temperatura se combinan:



Formándose carburo de hierro o cementita, y luego al difundirse el carbono hacia el interior de las piezas es cuando puede decirse que se produce verdaderamente la cementación.

En todos los casos, para que se verifique con facilidad la absorción del carbono, es necesario que el acero se encuentre en estado austenítico con el hie

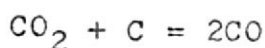
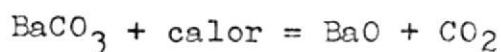
ro en forma de hierro gamma, condición que se cum
ple utilizando las temperaturas normales de cemen-
tación. En estas condiciones, el acero puede absorber
hasta 1,4 % de carbono aproximadamente.

Cuando el hierro se encuentra en estado alfa a tem
peraturas más bajas, la capacidad de absorción del
carbono es, en cambio, muy limitada. A 720°C, por
ejemplo, el hierro sólo puede disolver 0,035 % de
carbono aproximadamente. El carbono después de ha-
ber pasado al acero, queda disuelto en el hierro
gamma y de acuerdo con las leyes de difusión, al
existir en la periferia una concentración más ele-
vada que en el interior, penetra hacia el corazón.
En el proceso de cementación se señalan, por tanto
las siguientes fases:

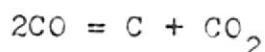
- a.- Producción de carbono naciente en las proximi-
dades de la superficie de acero, a elevada tem
peratura.
- b.- Reacción del carbono con el hierro para formar
carburo de hierro o cementita.
- c.- Descomposición de la cementita en Fe y carbono
libre en la zona periférica.
- d.- Difusión del carbono hacia la zona central.

Los carbonatos que se emplean mezclados con el car

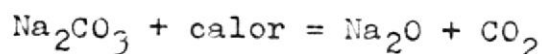
bón, aceleran la penetración del carbono naciente que es el verdadero agente carburante, al facilitar la formación de óxido de carbono de acuerdo con las siguientes reacciones (para el caso del carbonato bórico):



El CO producido se descompone en todos los casos produciéndose carbono naciente:



y el BaO producido reacciona con el CO_2 obteniéndose nuevamente el carbonato de bario. Otro de los activadores utilizados es el carbonato de sodio, cuya reacción es similar a la del carbonato de bario:



Es necesario recalcar que, como las mezclas cementantes pierden con el uso su actividad, es necesario renovarlas periódicamente.

1.3.2 EL PROCESO DE DIFUSION

Una mezcla de gases carbonáceos CO y CO₂, posee un potencial oxidante y un potencial carburante bien determinados y puede jugar, más aún, juega un papel importante en los procesos de tratamiento térmico, bien con la finalidad de evitar modificaciones de la composición superficial durante la permanencia a temperaturas elevadas, o bien, por el contrario, con el fin de obtener una modificación útil de esa composición superficial.

En el primer caso, se pretende que la superficie no se oxide ni decarbure, mediante la sumersión en una atmósfera de composición controlada. En el segundo, se pretende cementar una pieza de acero por carburación de su superficie. El potencial oxidante de una mezcla de CO y CO₂, está determinado únicamente por el valor de la relación:

$$y = \frac{p_{CO}}{p_{CO_2}}$$

de las presiones parciales de ambos gases en la mezcla. El potencial de oxígeno es:

$$RT \ln p_{O_2} = -135100 + 45,5T - 2RT \ln y \quad (1)$$

En donde R es la constante de los gases, T la temperatura Kelvin y los logaritmos son neperianos.

A aquellas temperaturas a las que el progreso de la óxidación superficial de un acero es importante, la fase formada directamente en la oxidación es la Wüstita o, en la denominación más usual, el óxido de FeO. El potencial de oxígeno en el equilibrio entre el hierro sólido y el óxido sólido, puede expresarse por:

$$RT \ln p_{O_2} = -125700 + 30,89T \quad (2)$$

Eliminando el potencial de oxígeno entre las dos ecuaciones anteriores e igualándolas, se obtiene fácilmente la relación, en logaritmos decimales:

$$\log y = - \frac{1030}{T} + 1,16 \quad (3)$$

que nos da el valor de la relación "y" en un sistema en equilibrio que contenga CO y CO₂, en la fase gaseosa, y hierro sólido y FeO como fases condensadas.

El valor de "y", dado por la ecuación (3), es el minimo que puede contener una mezcla gaseosa de CO y CO₂ incapaz para oxidar al hierro metal. Cualquier valor, mayor de "y", corresponde a mezclas gaseosas que dan

seguridad contra la oxidación y los menores determi -
 nan mezclas oxidantes frente al hierro sólido. Esto
 no quiere decir que una mezcla de este último tipo ha
 ya forzosamente a oxidar, pues pueden darse impedimen -
 tos de naturaleza cinética que impidan que la capaci -
 dad latente pueda manifestarse. Así, esta bastante -
 bien comprobado que mezclas absolutamente secas, po -
 tencialmente oxidantes, pueden no producir oxidación;
 las trazas de humedad actuarían como catalizador de
 la reacción que llevaría el sistema al equilibrio con
 formación de cascarilla sobre el metal. La condición
 necesaria para que una mezcla de CO y CO₂ no decarbu -
 re, no es tan sencilla como la encontrada para la no
 oxidación. El potencial de carbono de una mezcla de
 los gases en cuestión es expresada por:

$$RT \ln a_c = 40900 - 41,7T + RT \ln p + RT \ln \frac{y^2}{1 + y} \quad (4)$$

En donde:

a_c es la actividad del carbono en una fase sólida en
 equilibrio con la gaseosa, y

$p = p_{CO} + p_{CO_2}$ la presión total de los gases.

El potencial de carburación depende, por lo tanto, no solo de "y", sino también de la presión.

En una fase condensada, la actividad del carbono no puede ser mayor que la unidad, porque, entonces separaría carbono libre (grafito); sin embargo, nada impide la existencia de equilibrios metaestables con posibilidad de actividades mayores que la unidad. Precisamente, en el caso del hierro, lo normal es la presentación del equilibrio metaestable con cementita, que corresponde a actividades ligeramente superiores a la unidad. Bajo la temperatura eutectoide, el acero se compone de ferrita en equilibrio con cementita, por lo que puede admitirse, en todos los casos, que la actividad del carbono en tal sistema es aproximadamente la unidad, ya que la diferencia que se indicó al final del párrafo anterior puede dejar de tenerse en cuenta, no debe olvidarse, sin embargo, que la martensita es una solución sólida sobresaturada de carbón en hierro alfa, en la cual, la actividad puede ser mucho mayor que la unidad, y que la constitución de los productos de la zona intermedia y los del revenido no está suficientemente clara. Sin embargo, la descarburación a temperaturas por bajo de la eutectoide es poco de temer en las condiciones de los tratamientos ordinarios,

por la lentitud de las reacciones que podrían producirse, y, por esta razón es menos importante la mayor sensibilidad a la descarburación de estos productos metaestables.

En la zona austenítica, por el contrario, el metal puede disolver relativamente mucho carbono antes de saturarse, siendo la actividad de estas soluciones función de la composición y de la temperatura. La actividad del carbono en la austenita ha sido estudiada detenidamente por Smith, a partir de cuyos datos puede obtenerse, para ella, la siguiente expresión:

$$\log a_c = \log x + (0,277 - 0,243 \cdot 10^{-4} - \frac{328}{T})x + \frac{2100}{T} - 2,03$$

en la que x es el % de carbono en la austenita y los logaritmos son decimales. Esta mayor solubilidad del carbono es la que hace que, en la austenización, se disuelvan los carburos en la fase hierro gamma, obteniéndose una aleación monofásica homogénea, cuya descomposición en el enfriamiento posterior da origen a la gama de productos de transformación que dan al acero la variedad de propiedades que todos conocemos. A las temperaturas de austenización, es cuando el peligro de descarburación es importante.

Si a la ecuación (4) se la pasa a logaritmos decimales y después eliminamos $RT \ln a_c$, entre ella y la ecuación anterior, obtendremos la expresión:

$$\log \frac{v^2}{1+y} = \log x - \log p + (0,277 - 0,243 \cdot 10 - \frac{328}{T})x - \frac{6860}{T} + 7,09 \quad (6)$$

Que nos determina los valores de la relación "y", de una mezcla gaseosa de CO y CO₂ en equilibrio con austenita de composición x, a la presión p y temperatura T. Puesto que el potencial carburante de la fase gaseosa aumenta con "y", se deduce que los valores de esta relación mayores que los dados por la ecuación (6) corresponden a mezclas que carburan al hierro gamma y, por el contrario, los valores menores corresponden a mezclas decarburantes, siempre con relación a una composición inicial x de la fase sólida, a la temperatura T y a la presión p.

Con los datos obtenidos mediante la ecuación (6) se ha construido el siguiente gráfico:

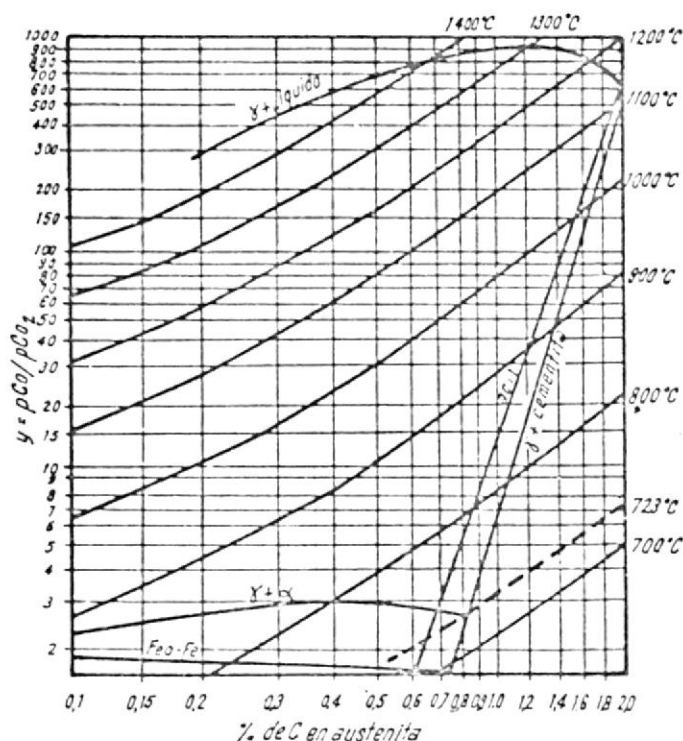


Figura 1.1 Gráfico obtenido de la ecuación (6)

En este gráfico, las abscisas son los valores de $\log x$ acotados con el valor de x , y las ordenadas son los valores de $\log y^2/(y+1)$, acotados con los de y ; utilizando la ecuación (6) y admitiendo siempre $p = 1$ atmósfera, tendremos para cada temperatura una curva sobre el gráfico, que aparece acotada con la correspondiente temperatura Celsius. Sobre el gráfico se han dibujado además, la curva correspondiente a los valores de " y ", en el equilibrio FeO-Fe (función solo de T) y los límites de coexistencia de la austenita con las o

tras fases del sistema hierro-carbono; la primera de estas curvas se obtiene uniendo los puntos que sobre las acotadas con temperaturas corresponden a los valores de "y", dados por la ecuación (3) y las restantes uniendo los puntos que, sobre las mismas curvas, corresponden a los valores de x en los equilibrios de las distintas fases con la austenita.

Como ejemplo de utilización del gráfico, supongamos un acero con 0,4 % de carbono a 900°C, a cuya temperatura es austenítico. Tomando la ordenada de la curva acotada con 900°C en el punto correspondiente a $x = 0,4$ por ciento de carbono, obtendremos $y = 8$, que corresponderá a la mezcla CO-CO₂ en equilibrio, que no podrá carburar ni descarburar. Si, conservando la composición constante, elevamos la temperatura, el valor de "y", para el equilibrio es mayor, y por tanto, la mezcla de equilibrio a 900°C se habrá convertido en una mezcla descarburante; por el contrario, si descendemos de la temperatura por debajo de 900°C, la misma mezcla se comporta como carburante, porque los valores de "y", en el equilibrio, serían menores. A la temperatura constante de 900°C una mezcla con "y" mayor a 8 será carburante respecto al acero en cuestión, mientras una con "y" menor a 8 lo descarburará; como se

deduce al desplazarse sobre la curva de 900°C, los valores de "y" mayores a 8, corresponden a equilibrios con austenitas de más de 0,4 % de C, mientras los de "y" menores a 8 pertenecen a equilibrios con x menor al 0,4 % de C.

El gráfico está construido para $p = 1$ atmósfera, pero sus datos pueden utilizarse para calcular el comportamiento a otras presiones; para ello basta tener en cuenta que, según la ecuación (6) si se conoce el valor "y", correspondiente a valores dados T y x, y $p = 1$, el valor de y' , correspondiente a las mismas T y x, pero a una presión distinta p' , puede deducirse de la relación:

$$\frac{(y')^2}{1+y'} = \frac{y^2}{1+y} \cdot \frac{1}{p'} \quad (7)$$

que para valores de "y" mayores que 10, puede simplificarse sin grave error, obteniéndose:

$$y' = \frac{y}{p'} \quad (8)$$

De estas relaciones se deduce que "y", en el equilibrio, varía de forma inversa con p; para una composición del acero y una temperatura dada, una mezcla en

equilibrio a la presión p se hace carburante a presiones mayores y descarburantes a las menores.

El gráfico está calculado para austenita y no puede utilizarse para líquido o hierro alfa más que a lo largo de las curvas límites representativas del equilibrio con austenita; la línea $a_c = 1$, corresponde al equilibrio de austenita con grafito, pasando por cada uno de sus puntos una curva de las acotadas con temperaturas, que corresponden a las de dicho equilibrio para la composición dada por la abscisa; a las temperaturas inferiores a las de las intersecciones, un acero de la misma composición sería, en el equilibrio, una mezcla de austenita menos rica en carbono y grafito. Como el equilibrio normal es el metaestable, tiene más interés la línea de equilibrio con cementita, puesto que, para las temperaturas y composiciones que representan puntos a la derecha de la curva en cuestión, estaremos en presencia de mezclas de actividad constante, independiente de la composición del acero. El punto en que cortan las curvas límites alfa + gamma y gamma + cementita, representa el punto eutectoico del sistema $Fe - Fe_3C$.

Del gráfico se deduce que las mezclas que no descarburan

ran, tampoco, en general, oxidan; es por esta razón más importante la condición de no descarburación y un compromiso entre las dos condiciones solo podrá ser - tenido en cuenta en los aceros muy pobres en carbono. Los diversos elementos disueltos en hierro gamma modi fican la actividad del carbono. De datos de Smith pue de deducirse que la actividad, en presencia del silicio y manganeso es:

$$\log a_c = \log (a_c)_0 + 0,077 (\%Si) - 0,019 (\%Mn) \quad (9)$$

En donde $(a_c)_0$ es la actividad en ausencia de silicio y manganeso, tal como se obtiene de la ecuación (5). Puesto que los términos correctivos aparecerían en el lado derecho de la ecuación (6), es fácil deducir que la relación y' para el equilibrio, en presencia de esos elementos, está relacionada con la y' para las mismas condiciones, pero sin ellos (dada por el gráfi co de la figura 2.1) por la expresión:

$$\log \frac{(y')^2}{1+y'} = \log \frac{y^2}{1+y} + 0,077 (\%Si) - 0,019 (\%Mn) \quad (10)$$

Que para valores altos de y , se puede simplificar a:

$$\log y' = \log y + 0,077 (\%Si) - 0,019 (\%Mn) \quad (11)$$

Mientras los contenidos de silicio y manganeso son los normales, los términos correctivos pueden ignorarse por estar afectados de coeficientes pequeños. En general, los elementos que forman carburos estables, actuarán en forma análoga al manganeso, disminuyendo la actividad del carbono, facilitando los procesos de carburación, y haciendo más difícil la descarburación.

La difusión es un desplazamiento de iones provocado por la agitación térmica de amplitud más o menos igual a una distancia interatómica y que tiende a homogenizar la composición de la aleación.

La difusión interviene en todos los tratamientos térmicos, excepto en las transformaciones martensíticas.

En las soluciones sólidas de inserción se admite que el ión disuelto (de pequeña dimensión) emigra a través de los vacíos de la red. En las soluciones de sustitución, la difusión no es posible más que como consecuencia de la existencia de "lagunas", un ión adyacente a un hueco, puede venir a ocuparlo provocando el desplazamiento del hueco en sentido inverso. La repetición conveniente de este proceso de permutación

permite imaginar el desplazamiento de un ión a través del cristal.

Hace más de un siglo, Parrot (1815) observó cualitativamente que los gases tienden a entremezclarse cuando son agitados mecánicamente. Más adelante observaciones del fenómeno de difusión en gases y líquidos fueron reportadas por Graham en la década 1860-1870 ; en 1870 Loschmidt desarrolló los primeros experimentos sobre la difusión en los gases, de tal manera, que permitieron los primeros tratamientos matemáticos sobre este fenómeno. El trabajo teórico de Adolf Fick , publicado en 1855 precede a cualquier trabajo experimental cuantitativo y es todavía recordado como las bases descriptivas del fenómeno de difusión.

Tanto los aspectos atómicos como los estadísticos de difusión pueden ser sumados como ecuaciones de difusión llamados Leyes de Fick. La primera ley de Fick establece que la cantidad de sustancia que se está difundiendo por unidad de tiempo a través de una unidad de área de un plano que es perpendicular a la dirección de difusión, conocida como el flujo J , es proporcional al gradiente de concentración de la sustancia que se está difundiendo. Representando la concentra -

ción o cantidad por unidad de volumen, por C y llamando x a la dirección que coincide con la dirección en la cual la difusión ocurre, la primera ley puede ser escrita de la siguiente manera:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

El factor D , es conocido como la difusividad o coeficiente de difusión, está presente en la ecuación como un factor de proporcionalidad y sus dimensiones son longitud al cuadrado sobre tiempo y usualmente está dado en cm^2/seg . Esta primera ley es similar en forma a la ley de Fourier para el flujo de calor la cual es proporcional al gradiente de temperatura, el signo negativo de la ecuación que representa la primera ley, indica que el flujo está en la dirección hacia abajo del gradiente.

Los coeficientes de difusión varían con la naturaleza de los átomos en solución, con la naturaleza de la estructura sólida y con los cambios de temperatura.

A continuación se presenta una tabla con distintos valores del coeficiente de difusión:

Solutos	Solvente • (estructura patrón)	Coeficiente de difusión cm ² /seg	
		500°C (930°F)	1 000°C (1 830°F)
1. Carbón	ccac hierro	(10 ^{-10.3})*	10 ^{-6.5}
2. Carbón	ccc hierro	10 ^{-8.2}	(10 ^{-6.2})
3. Hierro	ccac hierro	(10 ^{-19.5})	10 ^{-11.8}
4. Hierro	ccc hierro	10 ^{-16.1}	(10 ^{-9.5})
5. Níquel	ccac hierro	(10 ^{-19.0})	10 ^{-11.6}
6. Manganeso	ccac hierro	(10 ^{-19.6})	10 ^{-12.0}
7. Cinc	Cobre	10 ^{-12.2}	10 ^{-8.0}
8. Cobre	Aluminio	10 ^{-9.3}	Fundiciones
9. Cobre	Cobre	10 ^{-13.1}	10 ^{-8.8}
10. Plata	Plata (cristal)	10 ^{-12.9}	Fundiciones
11. Plata	Plata (límites de grano)	10 ^{-6.9}	Fundiciones
12. Carbón	Titanio altamente compacto	10 ^{-11.5}	(10 ^{-6.8})

* el paréntesis indica que la fase es metaestable.

Tabla 1.1 Coeficientes de difusión (D)

Algunas razones para los distintos valores de la tabla 1.1 son:

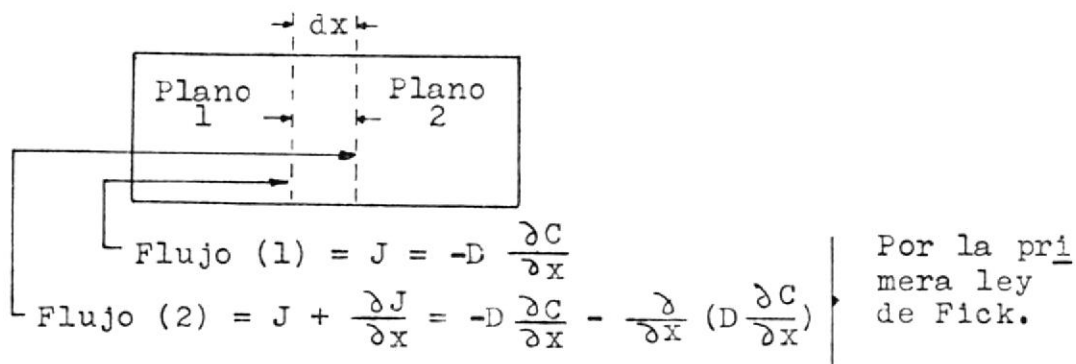
- a.- Mayores temperaturas llevan a mayores coeficientes de difusión porque los átomos tienen mayor energía térmica.
- b.- El carbón tiene un mayor coeficiente de difusión en el hierro que el que tiene el níquel en el hierro, porque el átomo de carbón es pequeño.
- c.- El cobre se difunde más fácilmente en aluminio que en el cobre porque las ligas Cu-Cu son más fuertes

que las ligas Al-Al (como puede evidenciarse por sus temperaturas de fusión).

d.- Los átomos tienen mayores coeficientes de difusión en el hierro ccc que en el hierro ccac, porque el anterior tiene un menor acomodamiento atómico (0,68 contra 0,74).

e.- La difusión se produce más rápidamente a lo largo de los límites de grano, porque éstos son una zona de imperfecciones de cristal.

Para la deducción de la segunda ley de Fick nos basaremos en la siguiente figura:



Tasa de cambio de la concentración = flujo 1 - flujo 2

$$\text{o} \quad \frac{\partial J}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Figura 1.2 Gráfico para la deducción de la segunda ley de Fick.

La segunda ley de Fick es derivada de la primera, haciendo la consideración de que la tasa de acumulación de sustancia que se difunde en un volumen dado es la diferencia entre el flujo que entra y el flujo que sale. Por la primera ley, el flujo a través del primer plano es:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Y el flujo a través del segundo plano es:

$$J + \frac{\partial J}{\partial x} = -D \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Restando las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Pero $\partial J / \partial x$, la diferencia en flujo, es igual a la tasa negativa del cambio de concentración, $-\partial C / \partial t$. De esta manera se arriba a la segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Si consideramos que el coeficiente de difusión D es una constante, entonces la segunda ley puede ser escri-

ta de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Se explicará esta ecuación para el caso de la cementación. Supongamos que en el instante inicial $t = 0$, el acero tenga una concentración nula en carbono, y que cada instante la concentración sobre la superficie, esto es, $x = 0$ sea constante e igual a C , se introduce una incógnita auxiliar:

$$u = \frac{x}{2(Dt)^{1/2}}$$

Se calcula:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial u} \left(-\frac{u}{2t} \right) \quad y$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 C}{\partial u^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 = \frac{\partial^2 C}{\partial u^2} \frac{1}{4Dt}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación de la segunda ley de Fick se tiene:

$$-2u \frac{\partial C}{\partial u} = \frac{\partial^2 C}{\partial u^2} = \frac{\partial \left(\frac{\partial C}{\partial u} \right)}{\partial u}$$

o sea:

$$\frac{\partial(\frac{\partial C}{\partial u})}{\frac{\partial C}{\partial u}} = -2u \partial u$$

Integrando:

$$\ln \frac{\partial C}{\partial u} = -u^2 + \text{cte.}$$

$$\frac{\partial C}{\partial u} = A e^{-u^2}$$

Integrando nuevamente se obtiene:

$$C = A \int_0^u e^{-u^2} du + B$$

Las condiciones límites permiten escribir:

Para t cualquiera y $x = 0$; $u = 0$, $C = C_0$ de donde $B = C_0$.

Para $t = 0$ y x cualquiera; $C = 0$, $u = \infty$

Se sabe además que:

$$\int_0^{\infty} e^{-u^2} du = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

De esto se deduce que:

$$A = -2 \frac{C_0}{\sqrt{\pi}}$$

y

$$C = C_0 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du \right)$$

$\frac{\partial C}{\partial u} = -2 \frac{C_0}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2}$ es siempre negativo, por consiguiente, C es una función constante decreciente de u .

Para todos los puntos en que C tiene un valor determinado, también lo tiene u y por consecuencia $x/\sqrt{t}$. De esto se deduce que la profundidad de cementación crece como la raíz cuadrada de la duración de la cementación. La comparación entre esta teoría y los resultados prácticos deja bastante que desear, se obtiene una concordancia bastante buena mediante diversos retoques, en particular reemplazando concentración por actividad.

Los valores experimentales relativos a D , coeficiente de difusión, son aún muy imprecisos. D crece con la temperatura; en una primera aproximación se tiene:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

La energía de activación Q (20 a 70 Kcal/mol) correspondería a la energía de enlace interatómico, también llamada energía de activación para la difusión. La expresión anterior puede ser expresada también en base a los logaritmos naturales, se tendría:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{Q}{RT}$$

R tiene el valor de $1.987 \text{ cal/mol}^\circ\text{K}$. La temperatura, está en $^\circ\text{K}$, D. es una constante que incluye varios factores que son esencialmente no afectados por la temperatura. Incluidos en esta constante, están tales factores como la distancia de brinco y la frecuencia de vibración del átomo, los cuales contribuyen a la eficiencia del movimiento de tales átomos que tienen suficiente energía para difundirse por brincos. Los valores de D. y Q son únicos para cada sistema de difusión. La siguiente tabla da tales valores a varios pares de difusión que se muestran en la tabla 1.2:

Soluto	Solvente (estructura huésped)	D_0 , cm^2/seg	Q, Cal/mol
1. Carbón	ccac hierro	0.21	33 800
2. Carbón	ccc hierro	0.0079	18 100
3. Hierro	ccac hierro	0.58	67 900
4. Hierro	ccc hierro	5.8	59 700
5. Níquel	ccac hierro	0.5	66 000
6. Manganeso	ccac hierro	0.35	67 500
7. Cinc	Cobre	0.033	38 000
8. Cobre	Aluminio	2.0	33 900
9. Cobre	Cobre	11.0	57 200
10. Plata	Plata (cristal)	0.72	45 000
11. Plata	Plata (límite de grano)	0.14	21 500
12. Carbón	Titanio altamente compacto	2.24	41 600

Tabla 1.2 Constantes de difusión.

El coeficiente de difusión D, varía también con la con

centración, si se supone que D depende de C , la segunda ley de Fick se escribe:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Para una duración de difusión t constante se puede determinar la curva $C = f(x)$. Introduciendo la variable auxiliar:

$$\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}}$$

Se advierte que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(\frac{\partial C}{\partial \lambda} \right)_t \left(\frac{\partial \lambda}{\partial t} \right)_x$$

Y después de haber calculado $\left(\frac{\partial \lambda}{\partial t} \right)_x$ se puede escribir:

$$- \frac{1}{2t} \frac{x}{\sqrt{t}} \frac{\partial C}{\partial \lambda} = \frac{\partial}{\partial (\lambda \sqrt{t})} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Se considera un punto de abscisa x determinada, y se multiplican los dos miembros de la ecuación por dx , se tiene de esto:

$$- \frac{1}{2t} x \, dC = d \left(D \frac{dC}{dx} \right)$$

Se integra entre un punto P del interior de la pieza ,

donde aún no ha llegado el elemento que se difunde - $(\frac{dC}{dx})$ allí es nulo) y el punto particular A, ver figura 2.3:

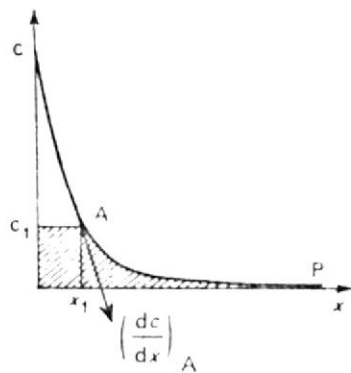


Figura 1.3 Límites de integración tomados para la ecuación del coeficiente de difusión D.

$$-\frac{1}{2t} \int_0^{c_1} x dC = \left| D \frac{dC}{dx} \right|_A - \left| D \frac{dC}{dx} \right|_p = D_A \left(\frac{dC}{dx} \right)_A$$

De esto se deduce que:

$$D_A = -\frac{1}{2t} \left(\frac{dx}{dC} \right)_A \int_0^{c_1} x dC$$

La integral es proporcionada por el área rayada de la figura 2.3. La experiencia muestra que D varía según una fórmula lineal. Así, para cementación se tiene:

$$D = (0,07 + 0,06 C) \exp\left(-\frac{32000}{RT}\right)$$

1.3.3 PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN ESTE PROCESO

La profundidad de la capa cementada aumenta con la temperatura y con la duración de la cementación (tiempo) y depende también de la actividad del carburante empleado y de la composición del acero que se va a cementar.

Aunque la penetración del carbono no se verifica con idéntica velocidad en los diferentes tipos de aceros en la práctica industrial no son muy sensibles las diferencias entre las penetraciones que se consiguen en los aceros al carbono y los aceros al níquel, cromo - níquel, etc. La absorción del carbono, es tanto más activa cuanto menor sea el porcentaje en carbono del acero.

A medida que la carburación progresa, cuando el porcentaje de carbono progresa, la velocidad de absorción disminuye, comportándose en ese caso el acero como una solución que se aproxima a su grado de saturación.

A continuación se presenta un gráfico en el que se observa la profundidad de penetración del carbono a diferentes temperaturas en función de las horas de ce -

mentación, se usó un acero de 0,15 % de carbono, 0,5 % de cromo y 1 % de níquel.

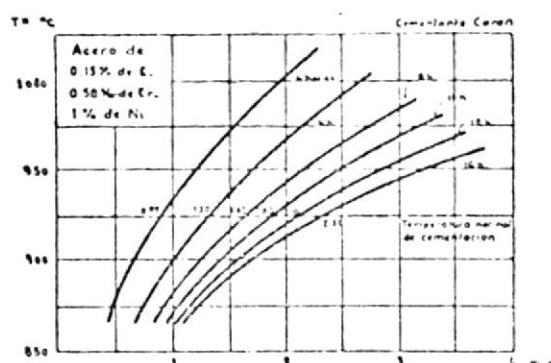


Figura 1.4 Profundidad de la penetración del carbono que se consigue a diferentes temperaturas en función de las horas de cementación.

Se usó como activador el carbonato bórico, de este gráfico se observa que al cabo de 4 horas se obtiene una profundidad de 0,89 mm y una velocidad media de penetración de 0,22 mm por hora. A las 8 horas se llega a 1,6 mm y a las 16 horas a 2,3 mm.

Cuando la cementación se verifica a bajas temperaturas la penetración del carbono es muy pequeña y, en cambio, el porcentaje en carbono de la periferia es mayor que cuando se efectúa la cementación a temperaturas próximas a 925°C.

A continuación se presentan otros gráficos que permiten apreciar los resultados que se obtienen al variar los parámetros indicados anteriormente.

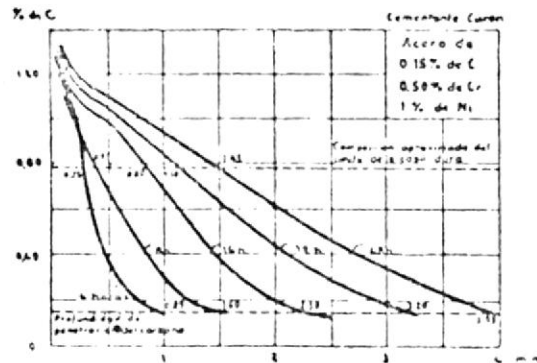


Figura 1.5 Contenido en carbono de la capa cementada en función de la duración en horas de la cementación, cuando esta se realiza a 925°

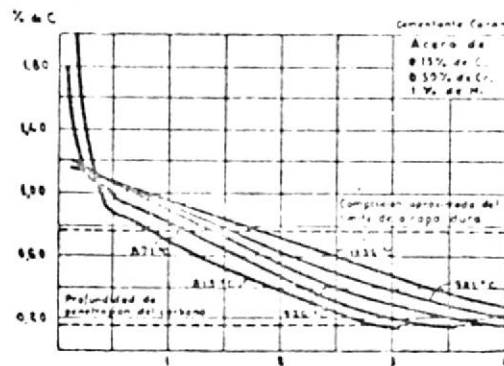


Figura 1.6 Influencia de la temperatura de cementación en la composición de la capa cementada. Duración de la cementación 48 horas.

1.3.4 CEMENTANTES SOLIDOS

Entre los cementantes sólidos más utilizados, encontramos, el carbón vegetal o carbón de madera, el carbón mineral o coke y el carbón activado. A continuación , se hará un breve análisis de cada uno de estos carbonos.

a.- Carbón vegetal.

La madera viene siendo carbonizada desde el principio de la historia con el fin de producir carbón vegetal, apreciado como combustible de peso ligero y casi exento de humo. Mucho después, la aparición y adelantos de la industria de la fundición del hierro, aumento grandemente la demanda de carbón vegetal. Este se obtenía simplemente en hornos de tierra, denominados carboneras, que realizaban la combustión lenta de la madera apilada convenientemente y que poseía una abertura a título de chimenea para el tiro de aire, y la pila se recubría con turba y tierra para reducir la circulación de aire, aún hoy en día se produce el carbón de madera o vegetal por este primitivo procedimiento, pero, con este proceso, el rendimiento en carbón representaba solo una tercera parte del peso de la madera siendo el resto gases y vapores.

La primera recuperación industrial de los gases y vapores fue llevada a cabo por James Ward en - North Adams, Massachusetts en 1830. Los gases y vapores se enfriaban y las partes condensables se transformaban en líquidos. De la parte acuosa, conocida con el nombre de ácido piroleñoso, se recuperaban, el ácido acético y sus sales, así nació la industria de la destilación de las maderas duras. Más tarde se recuperó también el metanol y los alquitranes se separaban y se usaban como combustibles o se fraccionaban en aceite de creosota, alquitrán soluble y brea.

Con el tiempo, los perfeccionamientos en las instalaciones y las mejoras en los procedimientos tecnológicos dieron como resultado un mejor control, reducción de las pérdidas de calor y operaciones continuas, lo que a su vez dió lugar a rendimientos elevados y productos de mejores calidades, así como a la separación y purificación de productos adicionales de los licores acuosos condensados y del alquitrán. Los gases no condensables se recirculaban en parte para calentar las nuevas retortas a la temperatura deseada, pero la mayor parte de las mismas se utilizaban para pro-

ducir calor y energía por combustión de los mismos en la caldera.

Con la aparición de los procedimientos continuos de bajo coste para la producción sintética de metanol, ácido acético y acetona, la industria de la destilación de la madera sufrió un descenso notable después de la II guerra mundial. Sin embargo, la demanda de carbón vegetal se ha mantenido firme y aún ha aumentado, como consecuencia de esto, se han puesto a punto métodos mejorados para la producción de carbón y las últimas tendencias se dirigen hacia la fabricación continua. Así, la carbonización de la madera ha sufrido un ciclo completo en su aplicación, desde la fabricación exclusiva de carbón se pasó a la producción de productos químicos industriales en donde el carbón jugaba un papel secundario y ahora de nuevo se vuelve a la producción principalmente de carbón.

La carbonización de la Madera, es un proceso de descomposición térmica, cuando la madera se somete a temperaturas superiores a 100°C tiene lugar una descomposición térmica, o sea, que el solo hecho de elevar la temperatura provoca una descomposición

química. La descomposición más activa tiene lugar, por encima de los 250°C y las carbonizaciones industriales emplean temperaturas de hasta 500°C . Hacia los 270°C tienen lugar reacciones exotérmicas que llevan a cabo la carbonización completa sin su ministro posterior de calor exterior. El proceso, recibe muchos nombres, tales como: carbonización, pirólisis, destilación de la madera, destilación destructiva y destilación seca. Las descomposiciones térmicas dan por resultado cambios drásticos en la madera. Las moléculas grandes, polímeros complejos de los tejidos de la madera, se rompen para dar carbón y una gran variedad de moléculas simples o originadas por su naturaleza en cuatro grupos: carbón, ácido pirolenoso, alquitrán y gases no condensables. El carbón es el producto de mayor interés industrial de la destilación de la madera, el cual queda como residuo después de que casi todos los productos de descomposición volátiles se han eliminado.

El carbón de madera, consta principalmente de carbono, junto con materia orgánica incompletamente descompuesta y sustancias absorbidas. La cantidad de estos productos secundarios (que contienen hi -

drógeno y oxígeno) asociados con el carbono, disminuye rápidamente al aumentar la temperatura de destilación, tal como muestra la tabla siguiente:

TEMPERATURA DE DESTILACION	COMPOSICION DEL CARBON			PRODUCCION DE CARBON RESPECTO AL PESO DE LA MADERA SECA
	C	H ₂	O ₂	
	%	%	%	%
250	70,6	5,2	24,2	65,2
300	73,2	4,9	21,9	51,4
400	77,7	4,5	18,1	40,6
500	89,2	3,1	6,7	31,0
600	92,2	2,6	5,2	29,1
1000	96,6	0,5	2,9	26,8

Tabla 1.3 Composición y cantidad de carbón vegetal producido a diferentes temperaturas máximas.

El carbón comercial corresponde al producto obtenido a unos 400°C y posee un contenido en volátiles (residuo orgánico) del 15 al 25 %. El rendimiento medio del carbón vegetal es del 37 - 40 %.

b.- Carbón mineral (coke).

Es sabido que el coke fue un artículo comercial entre los chinos hace más de 2000 años y que en la e-

dad media se utilizó en las artes y para usos domésticos. Sin embargo, hasta el año 1620 no existe ningún dato de haberse obtenido coke en un horno. En este año, Sir William St. John obtuvo una patente en Inglaterra para el horno de colmena.

Hasta mediados del siglo 19 el alquitrán de hulla y sus productos se consideraron como residuos que se quemaban en las retortas de coquización.

Los primeros hornos de rectángulo de retorta fueron contruidos en Alemania en 1830. En 1835 fue fabricado el primer coke de retorta por William Firnstone en el horno Mary Ann de Pennsylvania.

El uso más importante del coke es en los altos hornos, los países que tienen yacimientos de hulla coquizable junto con minerales de hierro han tenido un desarrollo industrial más rápido. El principal uso de la hulla es como combustible, pero alrededor de un 20 % de la hulla en los Estados unidos se pirogena en los hornos de coke, las hullas bituminosas pueden formar coke, cuando dichas hullas se calientan en ausencia de aire, se funden y al elevar más la temperatura, desprenden

productos volátiles, dejando un residuo sólido poroso, junto con la materia mineral de la hulla, el residuo carbonoso producido por calentamiento de hullas bituminosas en los hornos de coke, es el coke comercial. El coke se fabrica generalmente a - partir de una mezcla de hullas bituminosas con proporciones determinadas de cada tipo para obtener a sí la calidad deseada. Los altos hornos para producir hierro colado por ejemplo, precisan un coke duro y fuerte, de un tamaño entre 2 y 10 cms y resistente a la rotura y a la abrasión, otros usos del coke incluyen fundiciones, industrias diversas, entre las que puede citarse la fabricación del CO_2 . El rendimiento aproximado del coke útil es de un - 70 % de la hulla pirogenada. La coquización se divide básicamente en 3 clases, según la temperatura final, coquización a alta temperatura entre $900^{\circ}C$ y $1150^{\circ}C$ para lo cual se utilizan hornos de canal o colmena, coquización a temperatura media entre 600° y $890^{\circ}C$ se utilizan hornos de canal, poseyendo cámaras más estrechas que en los tipos utilizados en la coquización a alta temperatura, coquización a baja temperatura entre 510° y 650° , se utilizan , varias clases de retortas. Les cantidades de gas , coke y otros productos obtenidos a partir de una

tonelada de hulla, varían con el tipo de hulla utilizada. A continuación se presenta una tabla en la que constan los productos obtenidos a partir de una tonelada de hulla a alta temperatura:

Gas	293 m ³
Coke	637 Kg.
Alquitrán	31,82 lts.
Sulfato amónico	8,16 Kgs.
Aceites ligeros	10,64 lts.

Tabla 1.4 Materiales producidos por tonelada de hulla a alta temperatura.

Es de anotar que, la coquización a baja temperatura, produce más alquitrán por tonelada de hulla, que los procesos a alta temperatura, debido a que se produce una menor descomposición térmica de los vapores del alquitrán en gases.

c.- Carbón activado.

El carbón activado inició su importancia en la primera guerra mundial por su uso como absorbente en las máscaras antigás, este carbón es mucho más eficaz que el negro animal. Este aumento de su actividad es debido completamente a su gran superficie,

se calcula que 2 Kgs. de carbón activado tienen una superficie activa de más de una milla cuadrada. La adsorción es un fenómeno físico que depende considerablemente de la extensión superficial, muchos materiales carbonáceos pueden ser utilizados para la fabricación del carbón activo pero, las propiedades del producto acabado dependen naturalmente de su origen. La activación es una transformación física en la cual se aumenta enormemente la superficie del carbón por la eliminación de los hidrocarburos de su superficie. Existen varios métodos para la activación del carbón, los más utilizados son por ejemplo, el tratamiento del material carbonáceo con gases oxidantes como el aire, vapor o CO_2 y la carbonización de la materia prima en presencia de agentes químicos como el cloruro de zinc o el ácido fosfórico.

1.3.5 ACTIVADORES DEL PROCESO

Para el proceso de cementación en medio sólido, el carbón solo no se emplea porque con el no se suelen conseguir concentraciones de carbono en la periferia del acero, superiores a 0,65 %. Mezclándolos en cambio con carbonatos alcalinos o alcalino-térreos, se alcanza hasta 1,2 % de carbono.

Durante muchos años, uno de los cementantes más utilizados fué la mezcla Carón preparada con 60 % de carbón vegetal y 40 % de carbonato bórico (BaCO_3). El carbón se tritura en trozos de 3 a 6 mm de diámetro y luego se mezcla con el carbonato bórico en polvo.

El carbonato bórico, es uno de los compuestos de bario más importante, este es un compuesto químico producido en grandes cantidades y exige una elevada capacidad de producción y una explotación eficiente para que rinda beneficios, tal como se vende en el comercio, el carbonato de bario, es un polvo fino de color blanco con una densidad aparente de 593 a 657 gr/dm^3 .

Recientemente se ha comprobado que se puede disminuir el contenido del carbonato bórico, obteniéndose muy buenos resultados con porcentajes de 10 a 15 %, sin que pierda efecto sensible la acción carburante de la mezcla; bajando en cambio de 8 %, el rendimiento disminuye ya notablemente. Se suele añadir a veces un 20 % de coke como diluyente, porque aumenta la velocidad de penetración del calor a través del compuesto carburante, permite obtener rápidamente temperaturas uniformes en el interior de las cajas y disminuye, el coste de la mezcla.

Otro de los activadores de uso común en la cementación es el carbonato sódico (Na_2CO_3), el cual es un polvo higroscópico, blanco cristalino, se le denomina también ceniza de sosa (soda ash), soda y, sosa calcinada (calcined soda). Es moderadamente soluble en el agua fría y muy soluble en agua caliente.

Otro de los activadores utilizados, pero con mucha menor frecuencia, es el carbonato cálcico (CaCO_3) ya que en la actualidad se ha comprobado que el carbonato de calcio que se añade como acelerador no posee ninguna eficacia aceleradora. Además de los mencionados también se emplean los carbonatos de potasio, de magnesio o de estroncio.

1.4 ACEROS USADOS EN EL PROCESO DE CEMENTACION

Los aceros para cementar son de contenido bajo en carbono, y en los que después del tratamiento de carburación se logra, por el tratamiento térmico, una superficie muy dura y un núcleo relativamente tenaz.

Una vez realizada la cementación de la capa externa hasta un contenido de carbono superior al 0,6 %, se alcanza una dureza superficial que no depende del tipo de acero utilizada

do, siempre que el tratamiento térmico posterior a la carbu
ración se haya realizado correctamente. La resistencia del
núcleo por el contrario, depende de los contenidos de carbo
no y de elementos de aleación.

Entre los diversos factores que deben tenerse en cuenta pa-
ra la elección de uno u otro tipo de acero de cementación ,
los más importantes a considerar son tres:

1.- La forma o tamaño de las piezas que se van a fabricar,
junto con las tolerancias de dimensiones que se exigirá
a las piezas después del temple (ya que en función de -
las tolerancias que se admitan en las deformaciones, se
decidirá si el temple se debe hacer en agua, en aceite,
o por algún otro procedimiento y, en consecuencia, es -
tas condiciones servirán, en gran parte, para señalar
los elementos de aleación que debe tener el acero).

2.- La resistencia que deben tener las piezas en el núcleo
central.

3.- El costo que puede tener el acero seleccionado.

Los aceros de cementación, de acuerdo con los elementos de
aleación que contienen, se pueden clasificar en tres grupos.

1.4.1 ACEROS AL CARBONO

En este grupo, están incluidos los aceros que solo - contienen en cantidades apreciables carbono, silicio y manganeso, que son los tres elementos fundamentales en los aceros ordinarios; además siempre contienen pequeños porcentajes de impurezas como fósforo, asufre, etc. Se caracterizan fundamentalmente porque para conseguir normalmente con estos aceros, después de la - cementación y temple posterior, durezas superiores a 60 Rockwell-c, es necesario enfriarlos rápidamente en agua, ya que la velocidad crítica de temple del acero de 0,9 % de carbono aproximadamente que constituye la capa cementada, es muy elevada.

El porcentaje de carbono que contienen estos aceros - de cementación, suele variar de 0,1 a 0,25 %. El porcentaje de silicio suele ser inferior a 0,35 % y el de manganeso suele variar de 0,5 a 0,7 %. En la periferia, después del temple rápido en agua, cuando se trata de piezas de tamaño reducido, se consiguen, prácticamente las mismas durezas que con los aceros aleados.

También debe destacarse que durante la cementación, en

general, a los aceros al carbono les crece el grano más que a los aceros aleados y, por tanto, quedan más frágiles y para obtener con ellos buenos resultados (tenacidad aceptable) es necesario cuidar bien los tratamientos de regeneración, que con frecuencia suele ser necesario dar después de la cementación.

1.4.2 ACEROS DEBILMENTE ALEADOS

A este grupo pertenecen los aceros de baja aleación, en los que la suma de los porcentajes de elementos aleados cromo, níquel, molibdeno y manganeso es inferior a 3 %. Entre ellos se encuentran los aceros Cr-Mo con Cr = 1 %, Mo = 0,2 % y C = 0,14 % y también los de la misma aleación y más elevado carbono C = 0,17 y C = 0,2 %. Los aceros Ni-Mo con C = 0,1 a 0,2 %, Ni = 1,6 a 2 % y Mo = 0,2 a 0,3 %. En la actualidad son cada día más utilizados los aceros de triple aleación y bajo porcentaje de elemento aleado, Cr-Ni-Mo, con porcentajes de carbono, variables desde 0,1 a 0,25 % y contenidos en cromo que van de 0,35 a 1 %, Ni = 0,35 a 1,5 % y Mo = 0,15 a 0,4%. De todos estos aceros los de más elevada aleación se suelen temprar en aceite y los de menos aleación en agua.

Los aceros de triple aleación y bajo porcentaje de ele-

mentos aleados tienen templabilidades muy aceptables y tienen la ventaja de que en su fabricación se llega a un aprovechamiento muy completo de las chatarras que contienen elementos de aleación.

1.4.3 ACEROS DE ALTA ALEACION

En algunos casos, para la fabricación de piezas de gran responsabilidad, en que se quiere evitar las deformaciones y se quieren obtener además elevadas resistencias en el núcleo central, se emplean aceros con elementos de aleación en porcentajes superiores a 3 %. El contenido en carbono casi siempre suele ser inferior a 0,2 %, pues al ser la templabilidad de estos aceros muy elevada no son necesarios porcentajes más altos de carbono para alcanzar resistencias en el núcleo de 90 a 150 Kg/mm².

A este grupo pertenecen los clásicos aceros al níquel, de C = 0,1 a 0,2 % y Ni = 3 a 5 %. También son muy utilizados para estos usos los aceros Cr-Ni con C = 0,1 a 0,2 %, Cr = 0,75 % y Ni = 3 %, y los de Cr = 1 % y Ni = 4 %. Para piezas de aviones y motores de aviación y piezas de alta resistencia y gran tamaño son muy empleados aceros Cr-Ni-Mo con los mismos o parecidos porcen

tajes de carbono y elementos de aleación que los Cromo-Níquel-Molibdeno que se acaba de citar, y contenidos de Mo variables de 0,2 a 0,6 %.

En estos aceros, conviene en general conservar el contenido en carbono relativamente bajo para que no se endurezca demasiado el corazón y llegue a disminuir sensiblemente la tenacidad.

Para evitar la presencia de austenita retenida, en la zona periférica, después del temple, a veces se da a las piezas tratamientos especiales a temperaturas inferiores a cero grados centígrados.

Aunque es muy difícil dar unas reglas generales para la elección de aceros destinados a la fabricación de piezas cementadas, ya que es un problema complejo, por ser muchos los factores que intervienen en el mismo, a manera de orientación, se señala a continuación unas normas que pueden servir de base para su elección.

PIEZA A FABRICARSE	CLASE DE ACERO	TRATAMIENTO RECOMENDABLE
Piezas pequeñas de formas regulares , en las que no es probable que se presenten problemas de deformaciones.	Aceros al carbono	Temple al agua
Piezas de tamaño mediano y pequeño en las que deben cuidarse las deformaciones, 1 en las que interesan buena tenacidad y resistencia en el núcleo.	Aceros de media <u>aleación</u> .	Temple al agua o al aceite
Piezas de cualquier tamaño en las que no se permiten deformaciones sensibles en el temple y en las que interesa buena tenacidad y alta resistencia en el núcleo.	Aceros de alta <u>aleación</u> .	Temple al <u>aceite</u> .

Tabla 1.5 Reglas generales para la elección de aceros destinados a la fabricación de piezas cementadas.

1.5 CAJAS PARA CEMENTACION EN MEDIO SOLIDO

Para la cementación de las piezas en un medio sólido se emplean hornos calentados con carbón, gas, fuel-oil y eléctrico.

cos. En ellos se colocan las cajas de cementar, con las piezas y las mezclas cementantes dentro, cerrando bien las juntas de las cajas ya sea con barro o mejor aún, con arcillas refractarias, el objeto de esto, es hacer que las cajas estén cerradas lo más herméticamente posible a fin de impedir la entrada del aire al interior de las mismas.

En cuanto al material de que están hechas las cajas, se suelen utilizar recipientes de fundición (hierro gris), de acero moldeado, de plancha negra de acero soldada, de acero inoxidable y de chapa embutida.

Aunque el proceso de cementación se verifique de igual forma, cualquiera que sea el material de las cajas, las de acero moldeado inoxidable (resistentes al calor), son las mejores, porque no se oxidan y son de gran duración, sin embargo, cuando en algún taller o fábrica se realiza ocasionalmente este proceso de cementación en medio sólido, es común fabricar las cajas con plancha negra ya que si bien no son tan resistentes al calor como las fabricadas con acero moldeado inoxidable, son mucho más económicas y el resultado obtenido, como se comentó anteriormente, es el mismo.

Es conveniente, además, que las cajas tengan patas o queden colocadas sobre apoyos para que penetre el calor por debajo

y la cara inferior se pueda calentar con facilidad.

1.6 TRATAMIENTOS TERMICOS POSTERIORES A LA CEMENTACION

Según la clase de acero y el destino de las piezas que se van a cementar se pueden utilizar muchas clases de tratamientos. En cada caso, la elección de uno u otro tratamiento, dependerá de su tamaño de grano, o sea de la tendencia del acero a adquirir una estructura grosera durante la cementación y de las características que se quieran conseguir en el corazón y en la periferia de las piezas. A continuación se describen los tratamientos térmicos más utilizados, se señalan además sus ventajas e inconvenientes y los casos en que conviene emplearlos. En la figura 1.7 se representan esquemáticamente cada uno de estos tratamientos:

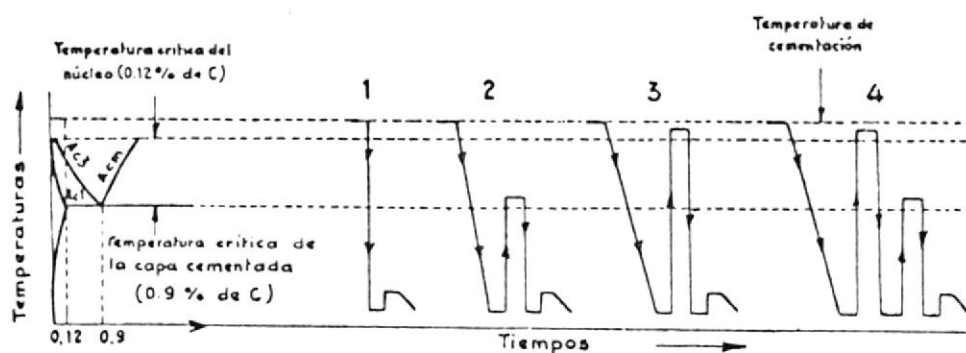


Figura 1.7 Diferentes clases de tratamientos que se pueden dar a las piezas cementadas.

- a.- Cementación, temple directo desde la temperatura de cementación y revenido final.

Este tratamiento se da generalmente cuando se cementa , en baño de sales o en atmósferas carburantes, y raramente cuando se cementa en cajas.

Se recomienda para piezas de poca responsabilidad y para cementaciones ligeras de 0,2 a 0,6 mm de espesor, en las que la tenacidad del núcleo no tiene mucha importancia. Conviene utilizar aceros de baja aleación o al carbono, de grano fino, no siendo recomendable emplear aceros de alta aleación, porque como el temple se hace desde muy altas temperaturas, hay peligro de que quede la capa cementada con mucha austenita residual sin transformar. Con aceros de grano grueso, el corazón queda frágil, porque después de la cementación los granos habrán crecido exageradamente, y templando directamente desde la temperatura de cementación no se regenera el grano. Con este tratamiento las deformaciones son muy grandes y se obtiene gran dureza en el corazón y en la periferia, pero hay peligro de que ambas zonas queden frágiles.

- b.- Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura in

termedia entre Ac_1 y Ac_3 y revenido final.

Este tratamiento se puede emplear con éxito cuando se usan aceros de alta aleación, que son generalmente de grano fino y no necesitan regenerar el corazón. Así se obtiene la máxima tenacidad del corazón, cuya resistencia, será un poco inferior a la máxima que se obtiene templando a más alta temperatura. Si se utiliza este tratamiento para aceros de grano grueso, la periferia quedará con buenas características, pero el corazón quedará bastante frágil por no haber sido regenerado. Con este tratamiento hay poco peligro de deformaciones.

c.- Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a Ac_3 y revenido final.

Con este tratamiento se obtiene la máxima resistencia en el núcleo. La tenacidad del corazón será buena, pues aunque haya crecido el grano durante la cementación, se afinará por haber sido calentado el acero para el temple a temperatura ligeramente superior a Ac_3 . En este tratamiento hay peligro de que la periferia quede con grano grueso y sea frágil, porque ha sido templada desde muy alta temperatura. La dureza de la capa cementada puede ser un poco baja por quedar algo de austenita residual sin trans

formar. Este es el tratamiento que debe emplearse con los aceros de media aleación y grano fino, siempre que se quiera conseguir la máxima resistencia en el corazón, como ocurre en algunas piezas empleadas en la industria aeronáutica, de automóviles, etc.

- d.- Cementación, enfriamiento lento, primer temple a temperatura ligeramente superior a A_{c3} , segundo temple a temperatura ligeramente superior a A_{c1} y revenido final.

Conviene emplear este tratamiento con los aceros al carbo no y de media aleación y, en general, con todos los de grano grueso, en los que durante la cementación crece mucho el grano. Hasta hace poco tiempo era el tratamiento más utilizado para piezas de responsabilidad, pero hoy, al poderse fabricar aceros de grano fino, se emplea en menos ocasiones. Empleándolo, la periferia quedará dura y tenaz, y el corazón, que con el segundo temple ha recibido un temple imperfecto, quedará con una resistencia ligeramente inferior a la máxima y muy buena tenacidad. Este tratamiento se suele utilizar todavía en algunos talleres para aceros de alta aleación en piezas de gran responsabilidad, cuando se teme que la cementación haya hecho crecer el grano del acero y se quiere utilizar un tratamiento que asegure en el corazón la máxima tenacidad.

e.- Austempering y Martempering.

Cuando se requiere reducir al mínimo las deformaciones - de las piezas cementadas, el temple se hace enfriando en sales fundidas en lugar de agua o aceite. Las durezas - que se obtienen en la periferia dependen de muchos factores como son: composición, tamaño de las piezas, temperatura del baño de sales, tiempo de permanencia en el mismo, etc.

A menudo, por así exigirlo el diseño de las piezas, es necesario que ciertas zonas de las piezas queden blandas después de cementadas, es decir, hay que evitar que absorban carbono durante la cementación. Para protegerlas en forma adecuada, se utilizan diversos procedimientos.

Un método bastante empleado para impedir el total endurecimiento de las piezas, consiste en dejar un exceso de material en las zonas que se quiere que queden blandas, que luego se eliminan por mecanizado después de la cementación y antes del tratamiento térmico correspondiente.

Si la cementación se hace en cajas, se puede evitar el endurecimiento de superficies fáciles de recubrir, protegiéndolas con varias capas de alambre de acero, que se enrolla a

su alrededor. De esta forma se cementará el alambre, sin que penetre en cambio el carbono en el acero de la pieza. Cuando se trata de agujeros, se suelen rellenar con amianto o cementos especiales.

El procedimiento que tiene más aceptación de todos, es el cobreado electrolítico.

Se comienza pintando las superficies que se van a endurecer con cera, pinturas, lacas o resinas especiales. Luego se desengrasan bien las piezas y a continuación se introducen en un baño de cobreado electrolítico, en el que se precipita una capa de cobre sobre las zonas sin pintar, que son las que deben quedar blandas, quedando sin cobrear las zonas protegidas con pinturas.

Finalmente se colocan las piezas en las cajas de cementación y al elevarse la temperatura, se queman las capas protectoras de cera, laca, etc. cementándose esas superficies, sin que penetre el carbono a través de las superficies protegidas por el cobre.

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1 MATERIALES UTILIZADOS

2.1.1 ACERO SAE 1020

Cualquier acero que deba sus propiedades distintivas - al carbono químicamente combinado con el hierro se denomina acero al carbono, si hay en el acero otros elementos en proporciones trascendentes, se le da el nombre de acero aleado.

El acero SAL 1020 es un acero al carbono de alta calidad fabricado en hornos de alta frecuencia, se usa para fabricar bocines, pistas, engranajes y piezas donde se necesite ahorro de material y tiempo. Tiene buena soldabilidad y se permite soldar tanto por el sistema eléctrico como por el autógeno. Su composición química aproximada es la siguiente:

Carbono	0,18 %
Silicio	0,3 %
Manganeso	0,3 - 0,6 %
Azufre	0,03 %
Fósforo	0,04 %

Este acero no es lo suficientemente duro superficialmente pero puede ser cementado de tal manera que su superficie tenga la dureza requerida. A continuación se presenta una tabla donde se puede apreciar los procesos de cementado para el acero en cuestión.

TEMPLE DIRECTO	TEMPLE NORMAL	MEDIOS Y TEMPERATURAS
Carburación		Con un cementante sólido a 850-875 C
	Carburación	Con un cementante sólido a 900-930 C
	Enfriamiento	Dentro del recipiente carburante
	Precalentamiento	A 790-830 C
Temple		En aceite, preferentemente con un previo enfriamiento del acero a 800-825C
	Temple	En aceite
Revenido	Revenido	A 150-200 C seguidamente después del temple.

Tabla 2.1 Procesos de cementado para acero SAE 1020.

Cuando el tratamiento térmico es adecuado, el acero , tiene un grano fino, buenas cualidades contra el desgaste en el exterior y un núcleo tenaz.

Cuando el acero SAE 1020 es laminado en frío o estirado, tiene una resistencia a la tensión que oscila entre 30 a 40 kg/mm².

El tratamiento de normalizado se realiza en este acero a 900°C. Se sostiene al acero a esta temperatura hasta que el calor haya atravesado toda su masa, luego se lo enfria al aire libre. El relevo de tensiones se lo efectúa a 550-600°C. En las siguientes figuras se presentan, el diagrama de carburación y el diagrama de revenido. La carburación se la realizó a 900°C durante 8 horas, temple desde 810°C en aceite y revenido durante 30 minutos.

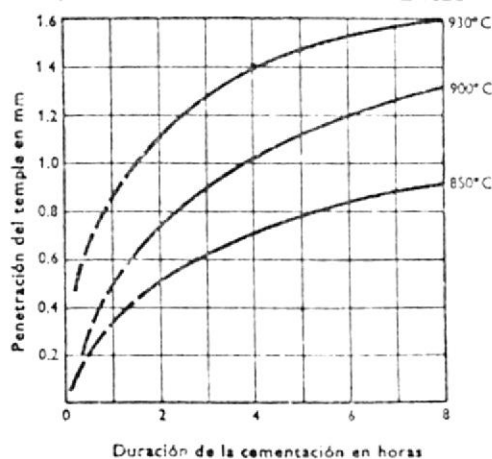


Figura 2.1 Diagrama de carburación del acero SAE 1020 a 900°C.

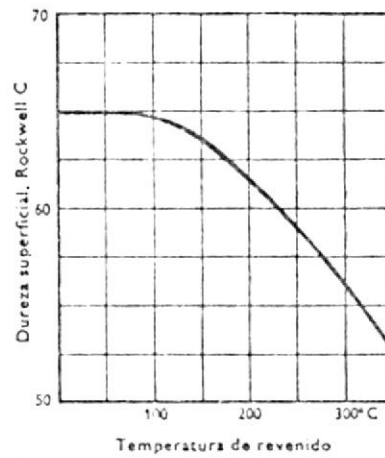


Figura 2.2 Diagrama de revenido del acero SAE 1020 durante 30 minutos

En la siguiente figura, se aprecia el diagrama de transformaciones isotérmicas (diagrama T-T-T) para el acero SAE 1020.

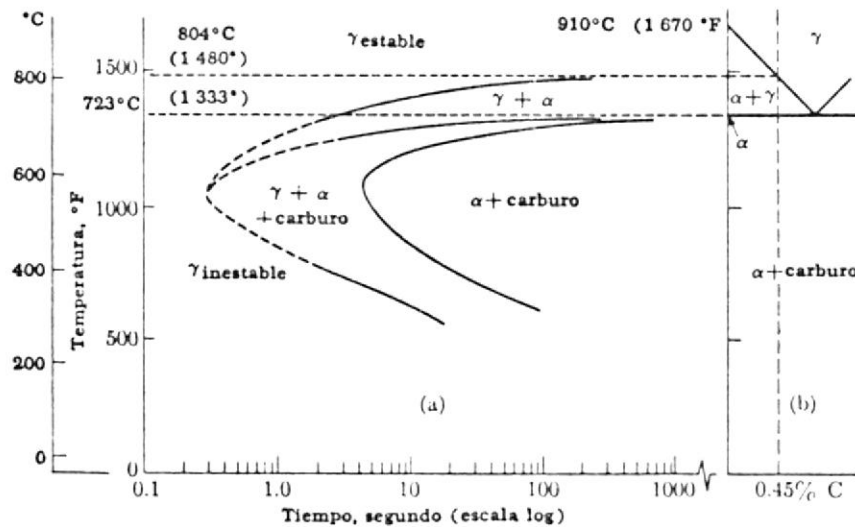


Figura 2.3 Diagrama T-T-T para el acero SAE 1020.

El acero SAE 1020 fue escogido para el presente trabajo por sus excelentes cualidades para ser cementado , su bajo costo y la facilidad con que se lo obtiene en el mercado.

2.1.2 MATERIALES PARA CEMENTACION EN MEDIO SOLIDO

Cuando se habla de materiales para la cementación, - hay que considerar en primer lugar a las sustancias - cementantes, o sea, los diferentes tipos de carbones que se van a utilizar. Para el presente trabajo, como se trata de una evaluación de dichas sustancias, se emplean tres tipos de carbones:

Carbón vegetal o de leña

Coke o carbón mineral

Carbón activado

De estos, solo el carbón vegetal es producido en el país, los otros dos deben ser importados, es importante señalar que en nuestro medio, el proceso de cementación se lo realiza con carbón activado.

Otro de los elementos de importancia, necesario para

el proceso, son los activadores, que como su nombre lo indica, ayudan a acelerar o activar la carburación.

Las sustancias que cumplen ésta función son los carbonatos de sodio, bario y potasio.

Se ha utilizado en ésta experiencia el carbonato de so dio por ser el que con mayor facilidad se encuentra en el mercado.

2.2 EQUIPO UTILIZADO

La elección y puesta a punto del equipo para tratamientos térmicos, son los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de realizar dichos tratamientos, ya que del cuidado que se tenga con el equipo, dependerá el éxi to de las pruebas a realizarse. El equipo utilizado para el proceso de cementación, es el que se describe a continuación:

a.- Horno eléctrico LINDBERG

Este es sin lugar a dudas el principal elemento para un tratamiento térmico, horno eléctrico calentado por resis tencias y con una capacidad de calentamiento de hasta - 1100°C. El horno es modelo 41-HC-10188-18AM de 230 volts. 1 fase, 60 Hertz.

En la puerta del horno, tiene un pequeño tubo que sirve - como escape para los gases que se generan en el interior dicha puerta posee además un revestimiento de asbesto con la finalidad de hacer lo más hermética posible la cámara del horno, ya que para el tratamiento de cementación es - de primordial importancia que el oxígeno del exterior no penetre a la cámara.

b.- Microdurómetro

Se tomó dureza Knoop en todas las probetas, para averiguar la variación de la dureza desde la periferia hacia el núcleo. Luego los valores de dureza Knoop fueron transformados a sus equivalentes en dureza Rockwell-C para hacer - los gráficos presentados en el numeral 2.5; ya que esta - medida de la dureza (Rc) es la que más se usa en los talleres.

c.- Microscópio

Se uso un microscópio Olympus modelo 202827, para el estudio de la variación de la microestructura o cambio de la composición del acero utilizado desde la periferia hacia el núcleo.

d.- Cajas de cementación

Descritas con más detalle en el capítulo I numeral 1.5.

e.- Equipo de seguridad.

Consta de casco con vicerá, pinzas y guantes.

El equipo utilizado, se apreciá mejor en las siguientes figuras:

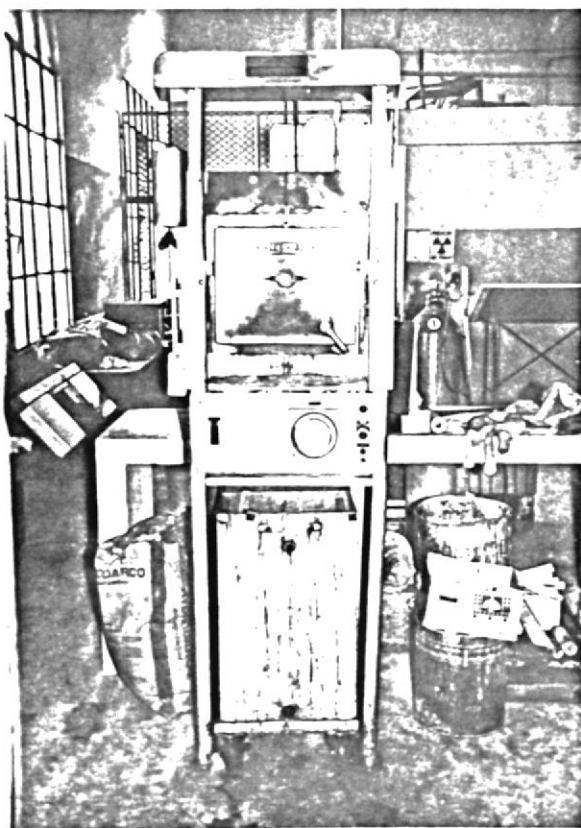


Figura 2.4 Horno eléctrico LINDBERG modelo 41-HC-10188-18AM

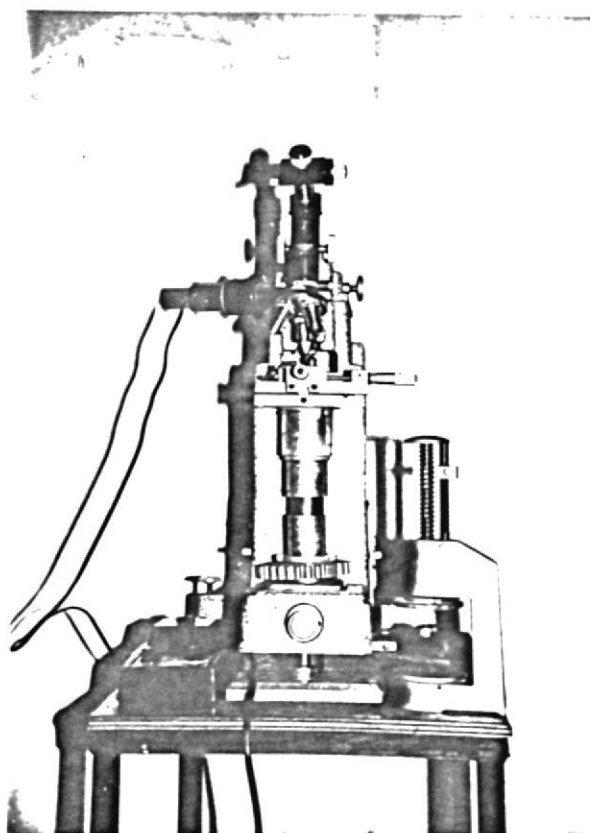


Figura 2.5 Microdurômetro

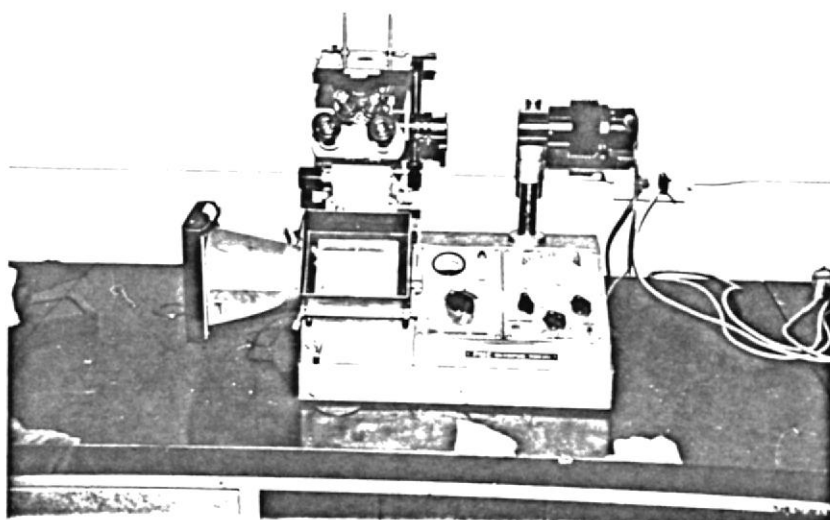


Figura 2 .6 Microscopio Olympus, modelo 202827.

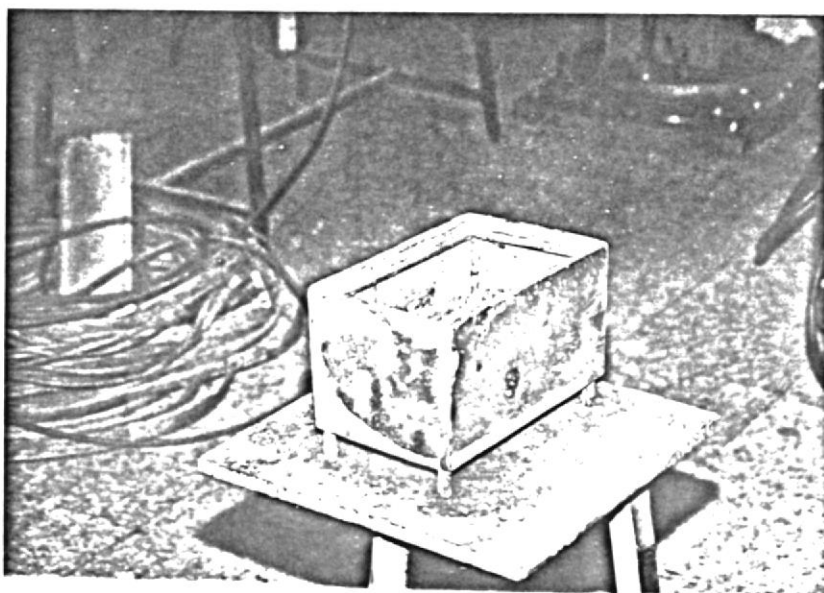


Figura 2.7 Caja de cementación

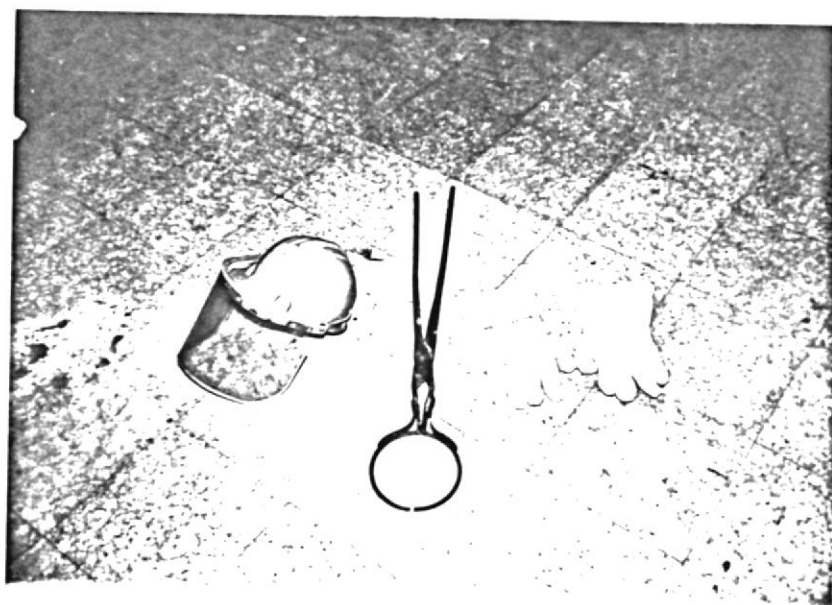


Figura 2.8 Equipo de seguridad

2.3 ANALISIS QUIMICO DE LOS CEMENTANTES UTILIZADOS

Antes de exponer los resultados de los análisis, se pasará a describir brevemente el procedimiento seguido al realizar dichos análisis:

a.- Para determinación de la humedad.

Se utilizaron tres cápsulas de porcelana, las cuales fueron debidamente lavadas y metidas al horno a 100°C el tiempo suficiente para asegurar que estén completamente secas, se tomaron como muestras para los análisis 4 gramos de cada uno de los cementantes, para lo cual se hizo uso de una balanza de precisión. A continuación se pusieron las muestras en las cápsulas de porcelana y se introdujeron al horno a 105°C por el lapso de 4 horas, con lo cual, la humedad fue separada de los cementantes, se procedió luego a pesar nuevamente las muestras con el objeto de determinar el peso perdido por la humedad y por consiguiente el porcentaje de humedad que poseía cada muestra.

b.- Para determinación de sustancias orgánicas volátiles.

Para este análisis se toman las mismas muestras anteriores, ya sin humedad. Se introducen nuevamente al horno y se las mantiene a una temperatura de 600°C por el lapso de 5 horas. De esta manera, son quemadas las materias

orgánicas volátiles y pequeñas trazas de sustancias i -
norgánicas que son susceptibles de ser quemadas, para -
nuestro análisis se puede considerar prácticamente sin
error que la sustancia orgánica quemada siguiendo este
procedimiento, es en su totalidad carbono.

c.- Determinación de las cenizas.

Para determinar el porcentaje de cenizas que tienen las
muestras de los cementantes, se utilizaron los restos
que quedaron del análisis anterior, esto es, una vez -
realizada la quema de las sustancias orgánicas, se con-
sidera que todo lo que queda es ceniza.

A continuación se presentan los resultados de los análisis:

CEMENTANTE *	PESO HUMEDAD (grs.)		PESO MATERIA ORGANICA QUEMADA (grs.)		PESO CENIZAS (grs.)	
carbón vegetal	0,57	14,2	3,03	75,6	0,41	10,2
carbón activado	0,39	9,8	3,22	80,3	0,39	9,84
carbón mineral	0,07	1,85	3,17	79,2	0,75	18,8

* Peso de las muestras analizadas = 4 grs.

Tabla 2.2 Análisis químico de los cementantes utilizados.

2.4 TECNICAS OPERATIVAS PARA LA CEMENTACION

Las técnicas que se siguieron en este proceso fueron las siguientes:

a.- Referentes al acero utilizado.

Como se menciona en capítulos precedentes el acero es el SAE 1020, el cual es suministrado en forma tubular. El primer paso sería la obtención de las probetas, para esto, se corta el acero suministrado, en forma transversal, de tal suerte que se obtienen "anillos" de aproximadamente 2 cm. de espesor, dicho anillo es cortado entonces en cuatro partes simétricas obteniéndose de esta forma las probetas que se utilizarán en las prácticas. El acero una vez cortado, es pasado por el esmeril con la finalidad de eliminar de su superficie todo vestigio de óxidos y grasas que puedan interferir en el proceso de cementado, se obtiene con este esmerilado una superficie brillante en la probeta, a continuación, y momentos antes de introducir el acero en la caja de cementación, se calentó el acero en el horno por pocos minutos para eliminar la humedad que pudiera tener la superficie del acero, ya que, si se realizan las pruebas con las probetas húmedas no se obtendrán los resultados esperados por que estamos introduciendo dentro de la caja

sustancias indeseables para el proceso, como el oxígeno.

En la siguiente figura, se aprecia el acero cortado para hacer las probetas y dos probetas embutidas y listas para pulirlas, una vez que se ha realizado la cementación.

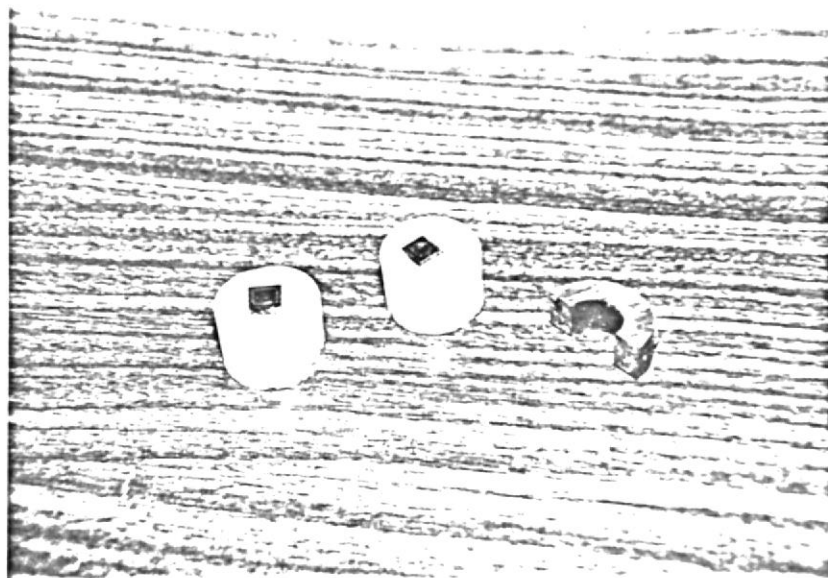


Figura 2.9 Acero cortado para hacer las probetas y probetas embutidas al finalizar el proceso de cementación.

b.- Referente a la caja de cementación.

Se utilizaron para las experiencias cajas fabricadas con planchas negras de acero y con dimensiones aproximadas de 12 x 7 x 8 cms. Se siguió el siguiente procedimiento: Las cajas fueron calentadas cierto tiempo en el horno para eliminarles la humedad, una vez realizada esta operación se procedió al llenado de las mismas con la materia cementante y con las probetas, a continuación se preparó una pasta compuesta con materiales refractarios como el asbesto, con la finalidad, de sellar la caja y evitar la entrada de oxígeno al interior de la misma, se dejó sin embargo un pequeño orificio en la tapa para aliviar un poco la presión dentro de la caja, la cual, al ser de mayor valor que la presión circundante evitará la entrada del oxígeno. Una vez finalizado el proceso, las cajas fueron retiradas del horno y dejadas enfriar al aire antes de abrirlas y recobrar las probetas para su posterior análisis. Es importante señalar que se utilizaron cajas fabricadas con planchas negras de acero por la relativamente poca cantidad de pruebas efectuadas las cuales no afectan en gran medida a las cajas, ya que este material a las temperaturas a las que se realizaron las pruebas, es susceptible de corroerse rápidamente, por lo tanto, cuando se trate de realizar muchos procesos de cementación en caja, es deseable que se fabriquen dichas -

cajas con un material que sea más resistente a las altas temperaturas. Para mayores detalles, ver el capítulo I, numeral 1.5.

c.- Referentes a los cementantes utilizados.

Como se menciona anteriormente, los cementantes que se utilizaron fueron el carbón activado, el carbón vegetal o carbón de leña y el carbón mineral o coke. Se usó además como activador el carbonato de sodio. Para preparar la mezcla cementante, esto es, el carbón más el activador se procedió de la siguiente manera:

Se pesaron muestras de cada tipo de carbón y se le añadió el activador, carbonato de sodio, en una proporción del 20 % en peso para cada carbón, a continuación se mezclaron bien para obtener una mezcla uniforme, se obtuvieron así las tres mezclas cementantes, luego se llenaron las cajas de cementación, con una capa de aproximadamente 3 cm. de espesor, se colocaron las probetas y se rellenaron las cajas con el cementante casi hasta el borde con el objeto de eliminar lo más posible el oxígeno contenido en ellas, se taparon las cajas, se sellaron como está descrito en el literal b y se introdujeron al horno.

d.- Referentes al proceso mismo.

Las probetas permanecieron en el horno 4, 6, 8 y 10 horas a las siguientes temperaturas: 850, 900, 950 y 1000° C. Es to es, por ejemplo, de la mezcla de carbón activado se introdujeron 4 cajas con sus respectivas probetas, primeramente a 850° C y se retiró la primera a las 4 horas de permanencia a esta temperatura, la segunda a las 6 horas y así sucesivamente para los otros tiempos. A continuación se introdujeron otras 4 cajas a 900° C y se realiza el mismo procedimiento, el proceso se repite para las otras temperaturas y para las otras mezclas cementantes. Se obtienen de esta manera las 48 probetas previstas, se procede entonces con la embutición en resina de cada una de ellas para su posterior pulido y análisis al microscópio.

e.- Referentes a los tratamientos posteriores a la cementación.

Los tratamientos realizados en forma posterior a la cementación tuvieron como finalidad la de endurecer la capa de carbono en la superficies de las piezas, en consecuencia, se realizó un tratamiento de temple seguido por un revenido.

El temple se lo realizó a 900° C por una hora, seguido por un enfriamiento en agua, el revenido se lo realizó

a 200° C por dos horas.

2.5 CONTROL DEL PROCESO

2.5.1 INFLUENCIA DEL TIEMPO Y TEMPERATURA SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA CEMENTADA

Como se explico anteriormente, los tiempos usados en el proceso fueron 4,6,8 y 10 horas y las temperaturas, 850, 900, 950 y 1000° C. A continuación se muestran los valores de los espesores de las capas cementadas obtenidas. Dichos valores se presentan en forma de tablas y en forma de gráficos.

TEMPERATURA 850° C			
TIEMPO (horas)	ESPESOR DE CAPA (mm)		
	C. VEGETAL	C. ACTIVADO	C. MINERAL
4	0,2	0,3	0,4
6	0,4	0,5	0,55
8	0,56	0,7	0,65
10	0,65	0,85	0,75

Tabla 2 .3 Espesores de capa cementada a 850° C.

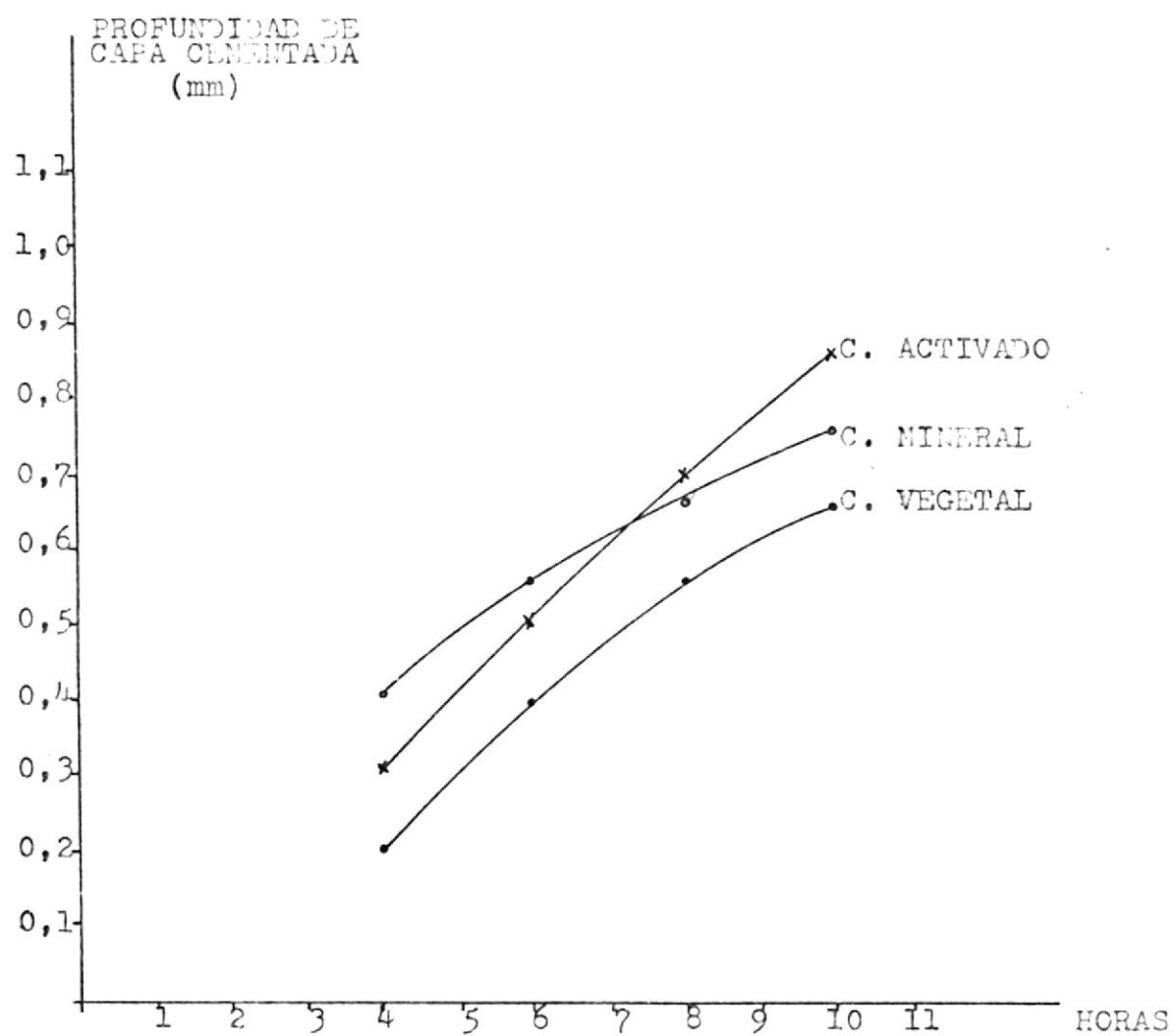


Figura 2.10 Espesores de capa cementada a 850° C

TEMPERATURA 900° C			
TIEMPO (horas)	ESPESOR DE CAPA (mm)		
	C. VEGETAL	C. ACTIVADO	C. MINERAL
4	0,2	0,45	0,4
6	0,45	0,7	0,75
8	0,65	0,9	0,9
10	0,75	1,05	1,0

Tabla 2.4 Espesores de capa cementada a 900° C

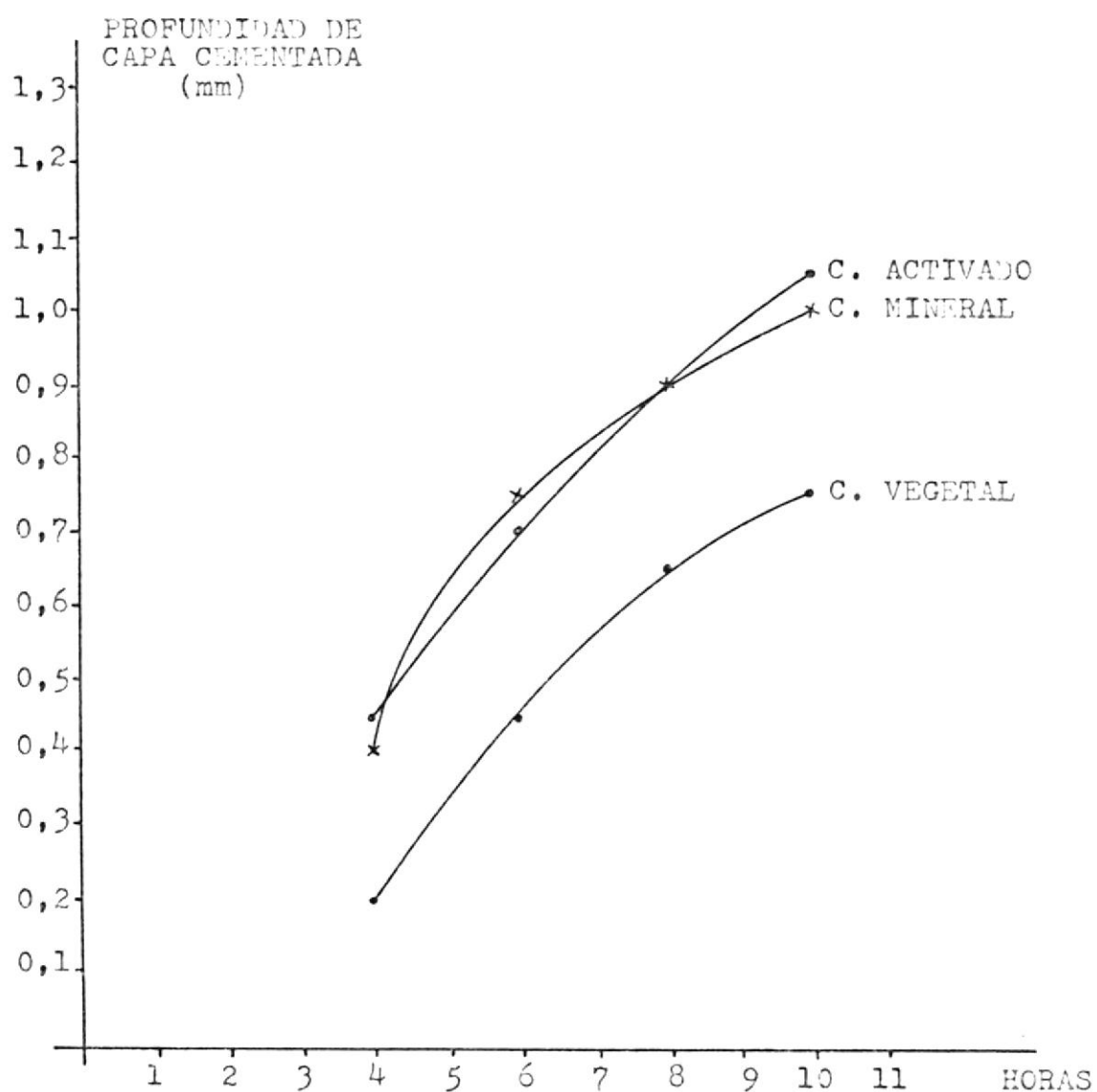


Figura 2.11 Espesores de capa cementada a 900 C

TEMPERATURA 950° C			
TIEMPO (horas)	ESPESOR DE CAPA (mm)		
	C. VEGETAL	C. ACTIVADO	C. MINERAL
4	0,35	0,5	0,6
6	0,65	0,75	0,8
8	0,9	1,0	0,95
10	1,0	1,1	1,07

Tabla 2.5 Espesores de capa cementada a 950° C

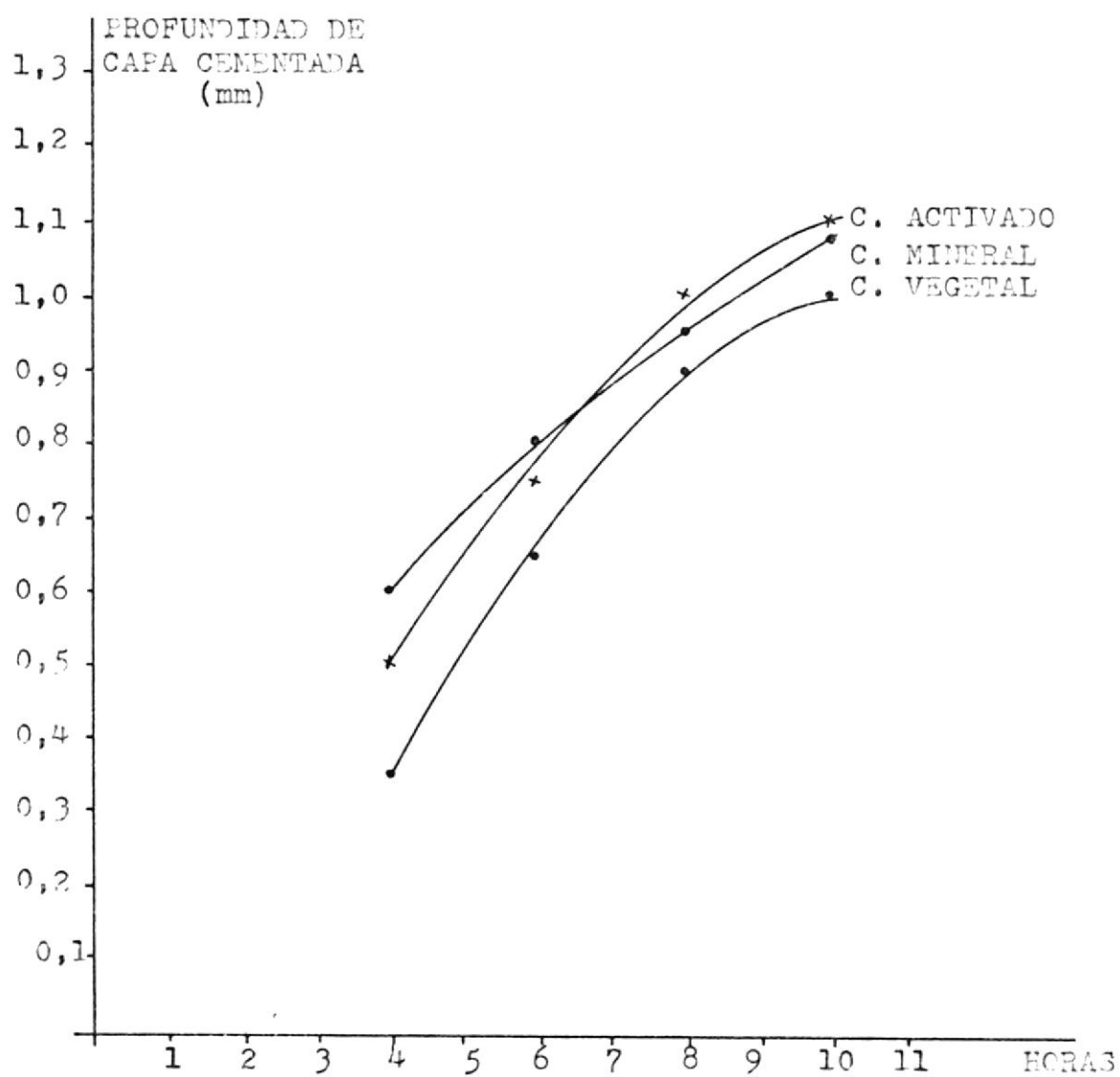


Figura 2.12 Espesores de capa cementada a 950° C

TEMPERATURA 1000° C			
TIEMPO (horas)	ESPESOR DE CAPA (mm)		
	C. VEGETAL	C. ACTIVADO	C. MINERAL
4	0,6	0,7	0,8
6	0,95	1,1	1,05
8	1,15	1,35	1,17
10	1,35	1,5	1,3

Tabla 2.6 Espesores de capa cementada a 1000° C

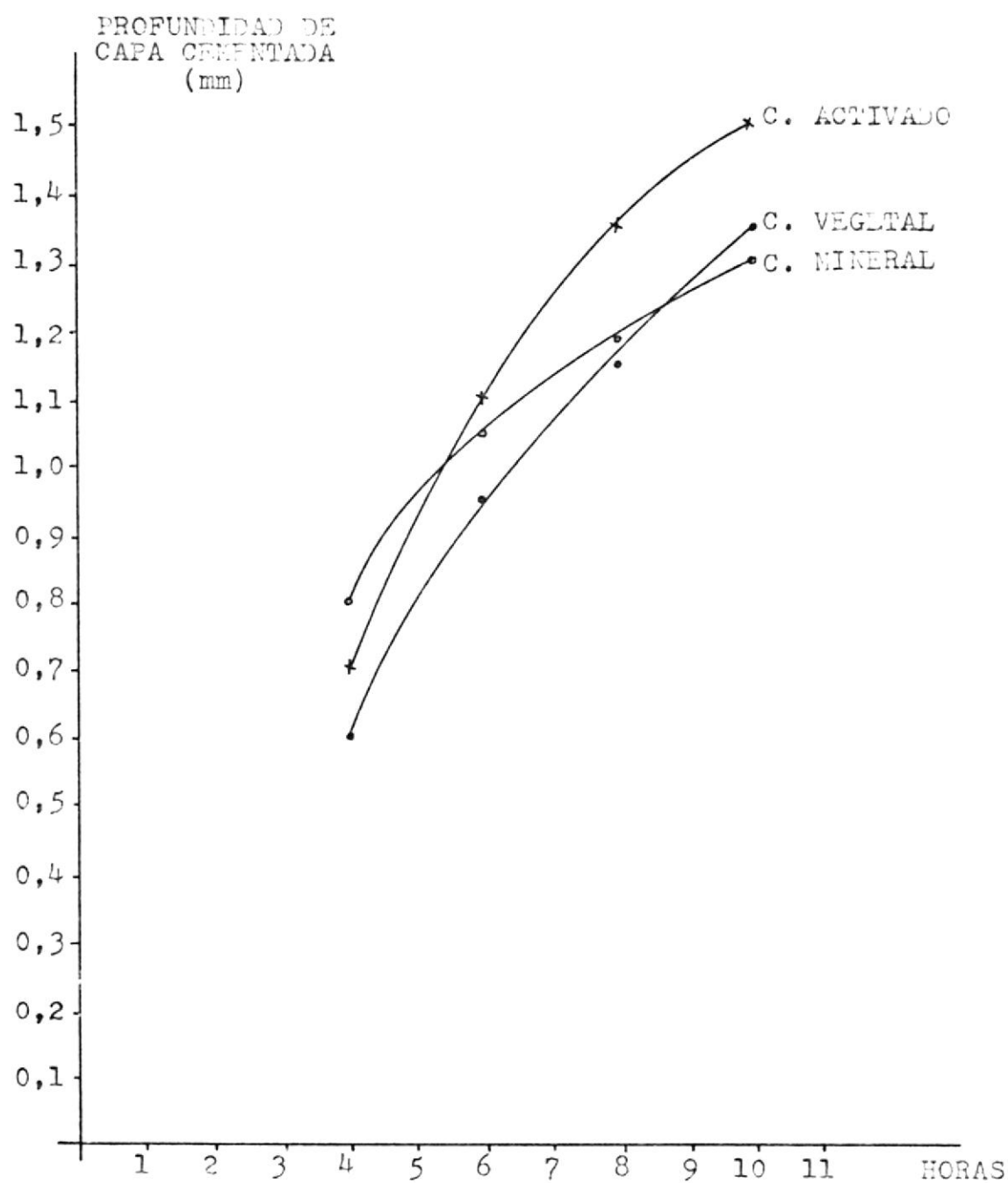


Figura 2.13 Espesores de capa cementada a 1000° C

2.5.2 MICRODUREMETRIA

Una vez pulidas las probetas se tomaron las medidas de dureza a partir de la superficie hacia el núcleo. Se tomaron dichas lecturas cada 0,1 mm hasta que la dureza se hizo más o menos constante. A continuación se presentan los datos obtenidos, tal como en el numeral precedente, los datos de la dureza se presentan tanto en forma de tablas como en forma de gráficos.

CARBON ACTIVADO 850° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	25	25	27	28
0,1	20	22	24	27
0,2	17	22	20	24
0,3	12	17	17	21
0,4	10	13	16	20
0,5	10	9	12	16
0,6		9	10	15
0,7			10	13

Tabla 2.7 Durezas obtenidas con carbón activado a 850° C

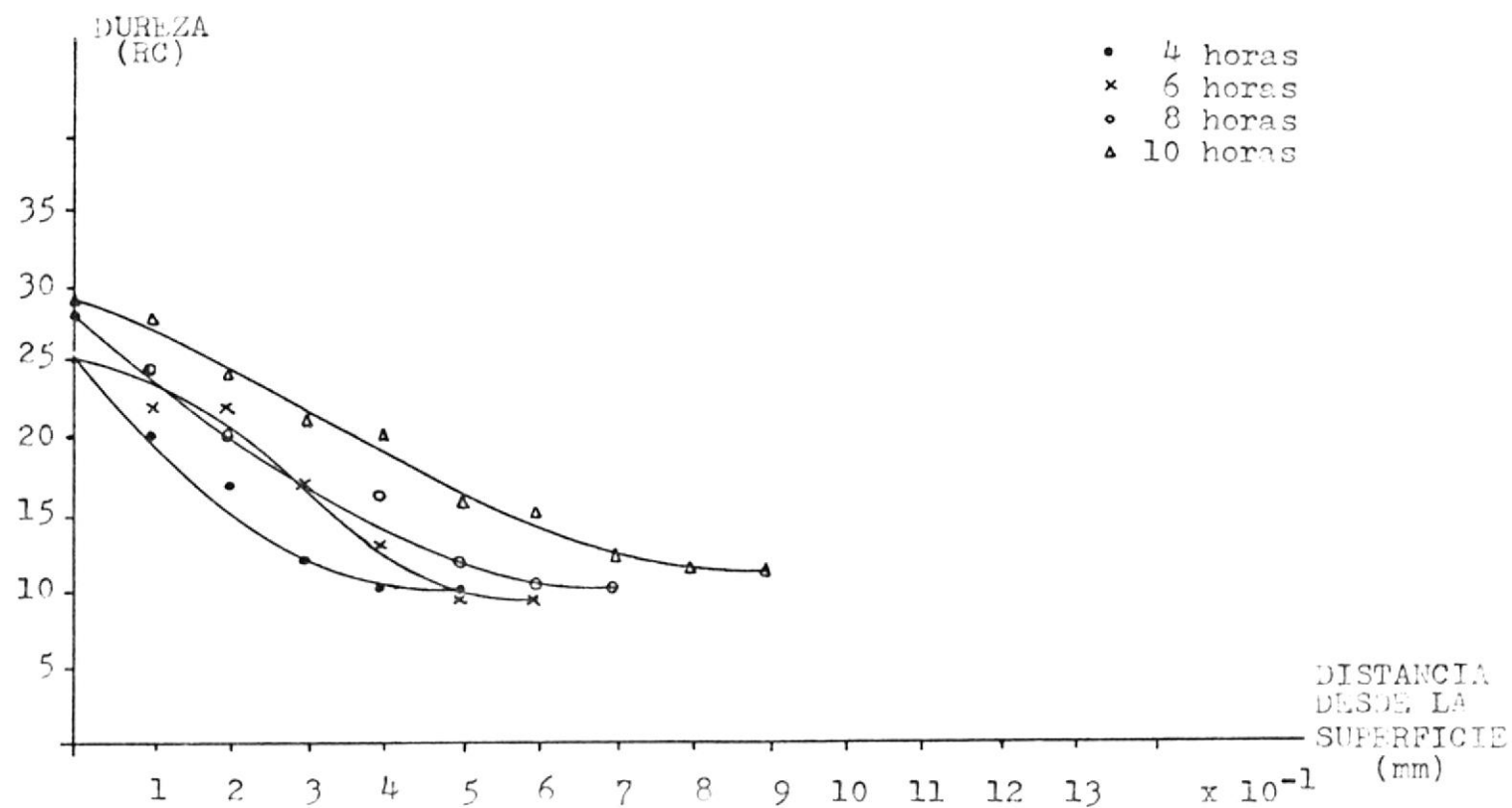


Figura 2.14 Durezas obtenidas con carbón activado a 850°C

CARBON ACTIVADO 900° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	28	28	30	30
0,1	27	28	27	30
0,2	23	25	27	28
0,3	23	23	25	30
0,4	17	20	22	26
0,5	15	18	20	22
0,6	14	15	19	20
0,7	14	14	15	17
0,8		14	13	15
0,9			10	14
1,0			10	14
1,1				12
1,2				12

Tabla 2.8 Durezas obtenidas con carbón activado a 900° C

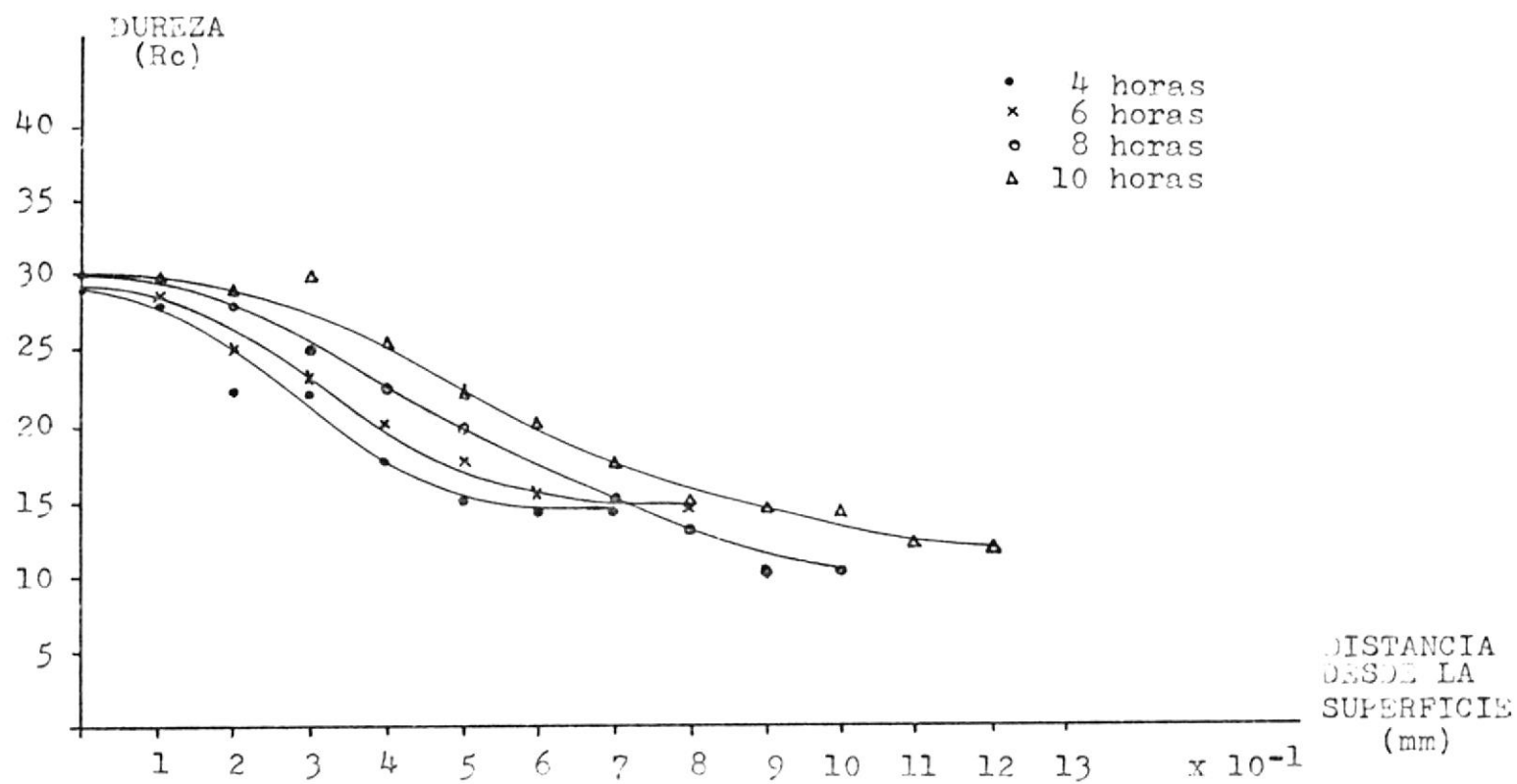


Figura 2.15 Durezas obtenidas con carbón activado a 900° C

CARBON ACTIVADO 950° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	29	32	30	34
0,1	27	28	29	33
0,2	27	25	29	32
0,3	24	22	27	30
0,4	20	20	24	27
0,5	18	18	23	27
0,6	15	17	20	22
0,7	12	15	18	21
0,8	12	13	18	18
0,9		13	15	14
1,0			13	13
1,1			13	12
1,2				12

Tabla 2.9 Durezas obtenidas con carbón activado a 950° C

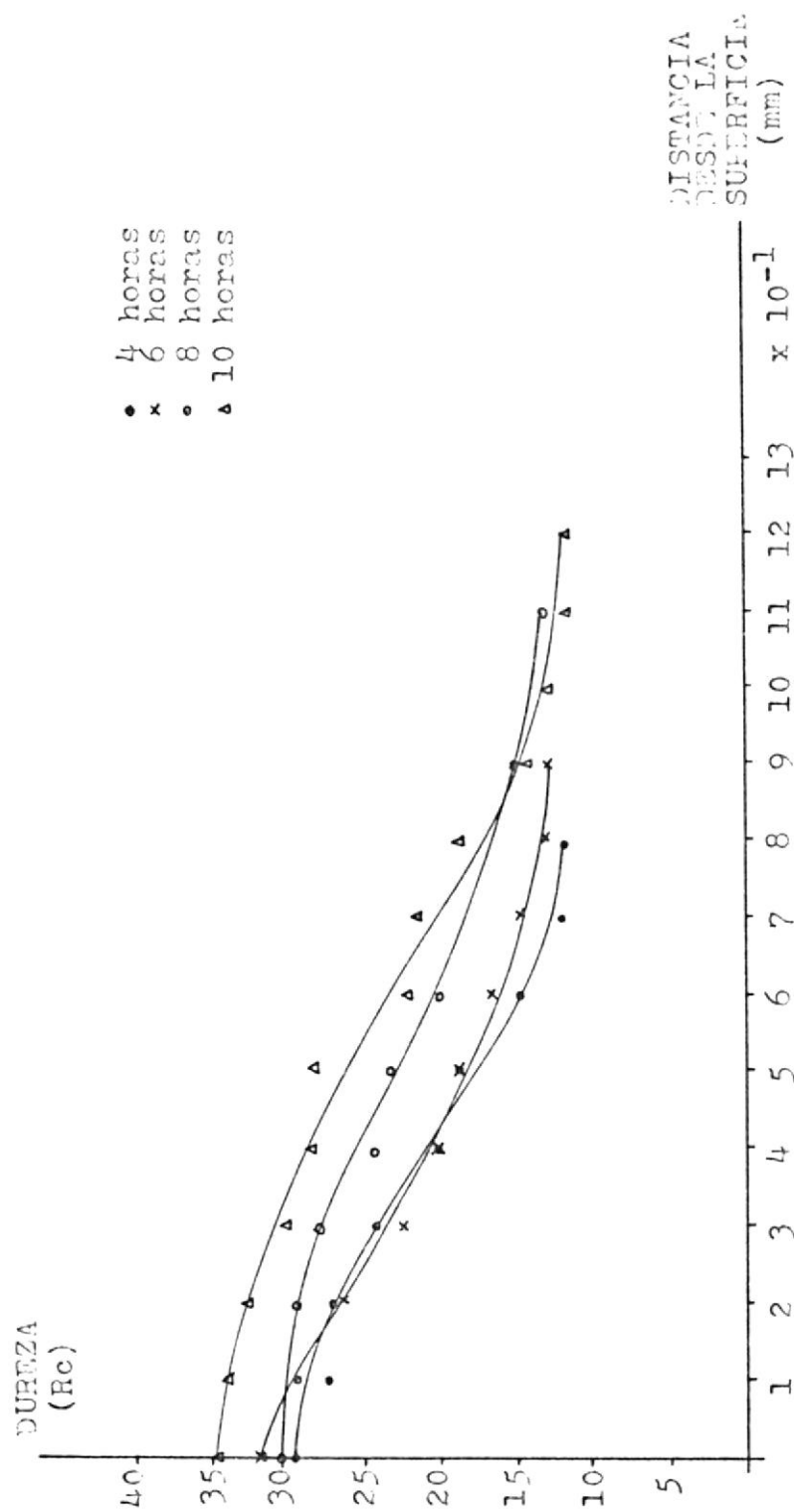


Figura 2.16 Durezas obtenidas con carbón activado a 950°C

CARBON ACTIVADO 1000° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	28	30	35	35
0,1	26	27	33	35
0,2	23	30	32	31
0,3	21	26	30	31
0,4	19	25	28	29
0,5	15	23	28	28
0,6	14	21	25	26
0,7	16	20	23	25
0,8	16	17	20	23
0,9	13	15	20	21
1,0		14	18	20
1,1		14	17	20
1,2		12	17	18
1,3			17	15
1,4				15

Tabla 2.10 Durezas obtenidas con carbón activado a 1000° C

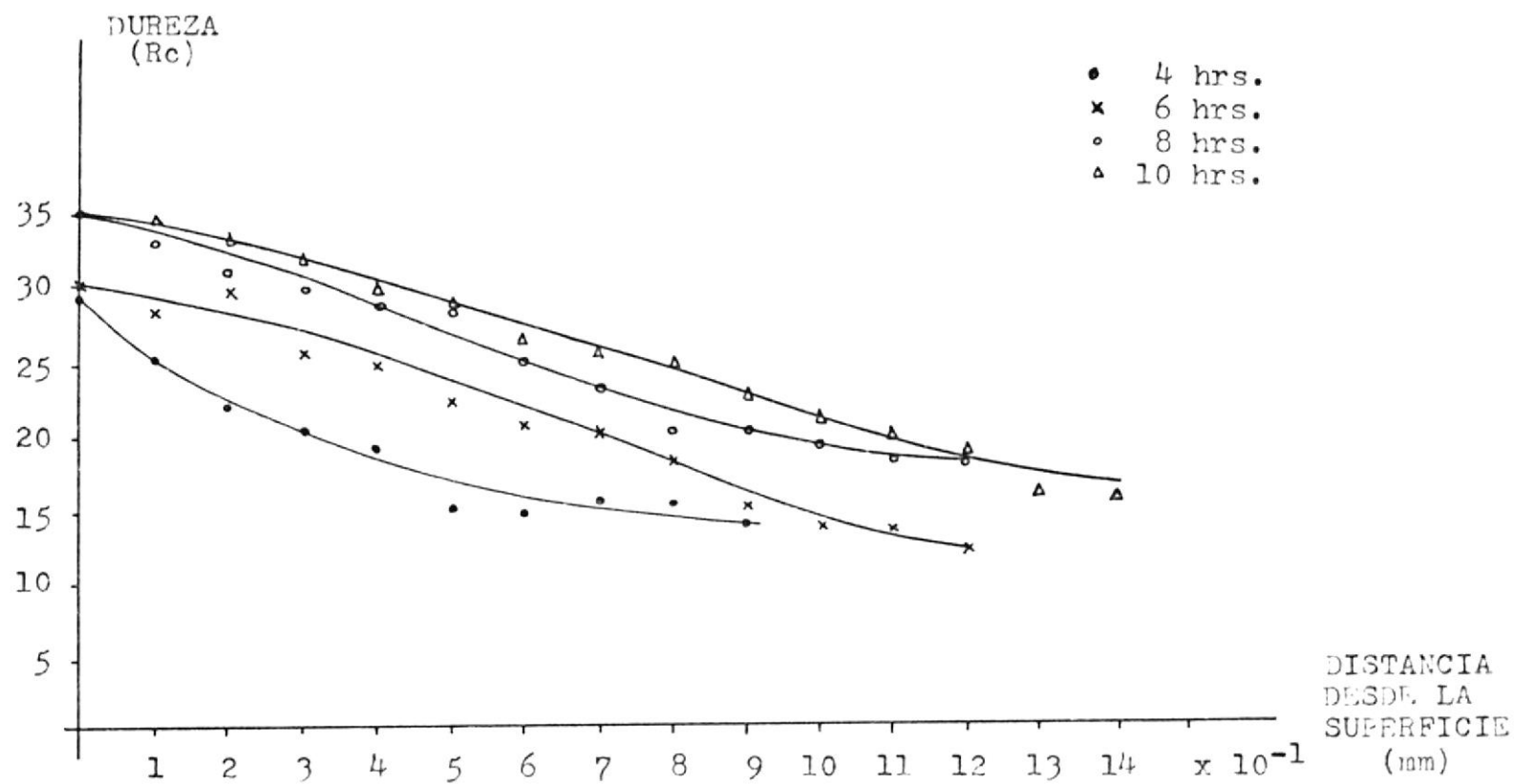


Figura 2.17 Durezas obtenidas con carbón activado a 1000° C

CARBON VEGETAL 850° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	15	18	21	20
0,1	13	17	18	20
0,2	12	14	17	18
0,3	10	11	15	19
0,4		10	14	18
0,5			13	16
0,6			13	15
0,7				15

Tabla 2.11 Durezas obtenidas con carbón vegetal a 850° C

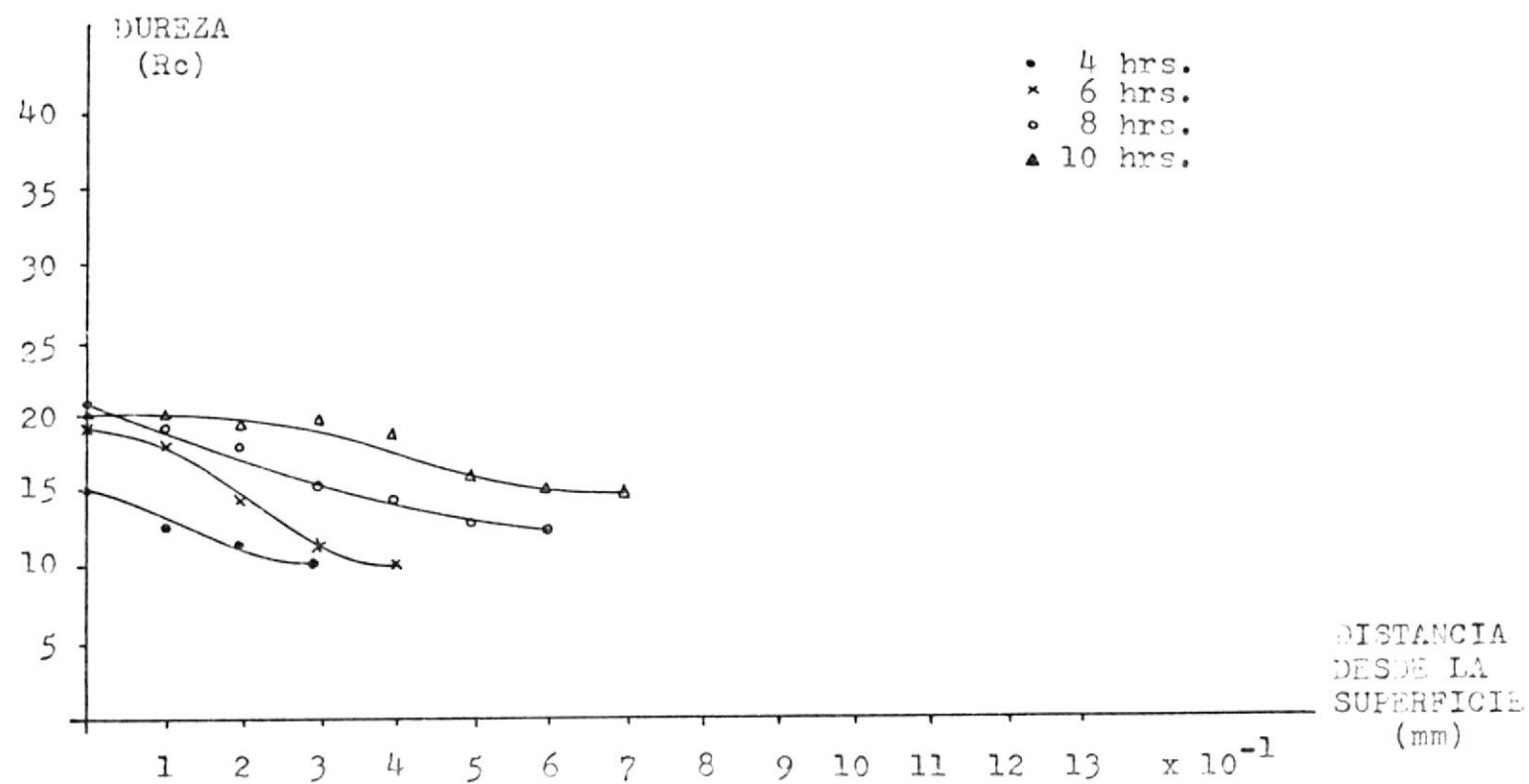


Figura 2.18 Durezas obtenidas con carbón vegetal a 850° C

CARBON VEGETAL 900° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	16	16	20	20
0,1	14	14	19	18
0,2	11	12	17	18
0,3	11	12	16	17
0,4			15	16
0,5			13	16
0,6			12	15
0,7			12	15

Tabla 2.12 Durezas obtenidas con carbón vegetal a 900° C

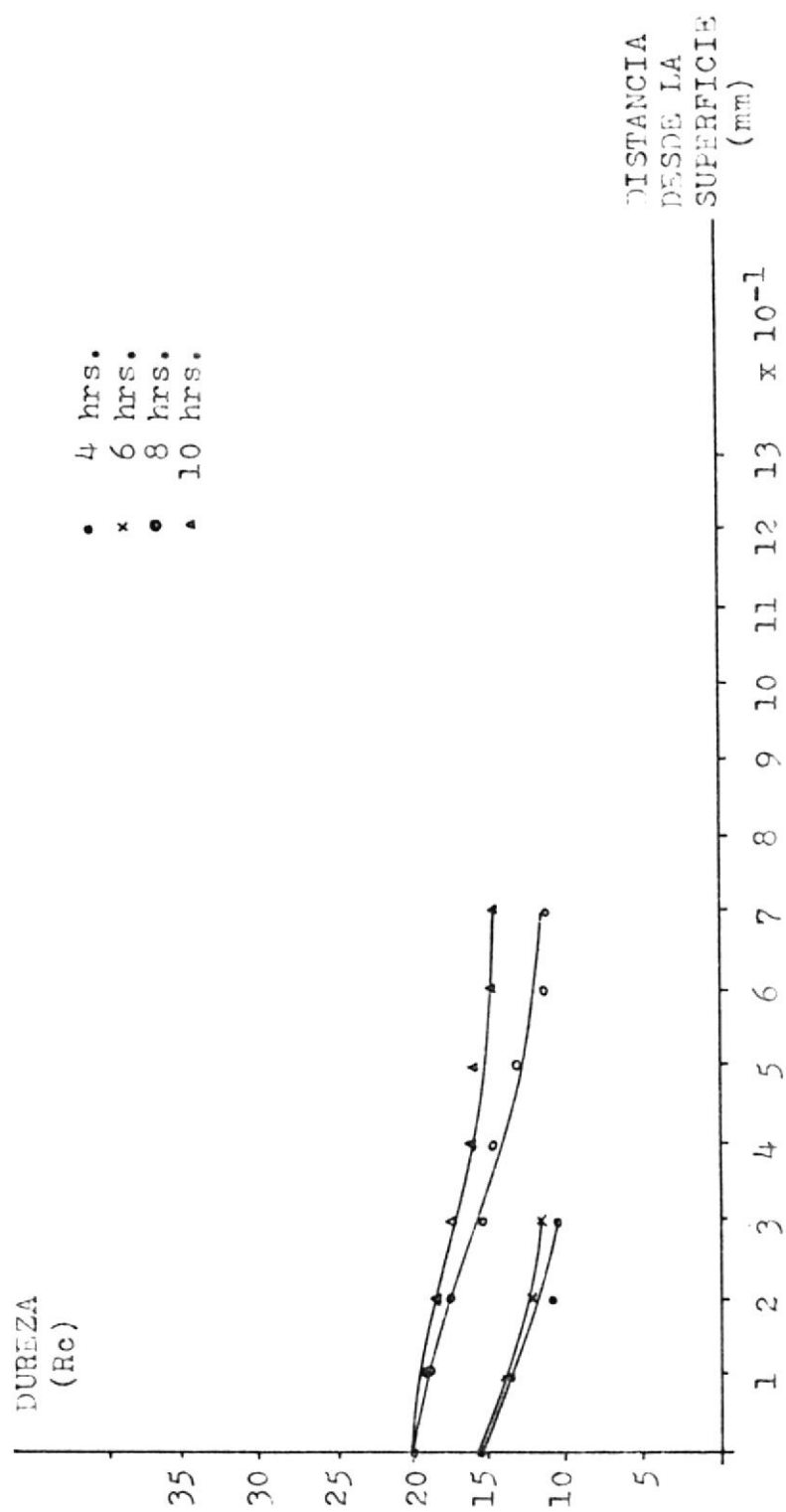


Figura 2.19 Durezas obtenidas con carbón vegetal a 900°C

CARBON VEGETAL 950° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	19	22	26	29
0,1	19	20	26	27
0,2	16	18	25	25
0,3	15	18	23	23
0,4	15	17	22	22
0,5		17	20	21
0,6		16	19	20
0,7			19	19
0,8			16	17
0,9			15	16
1,0			15	16

Tabla 2.13 Durezas obtenidas con carbón vegetal a 950° C

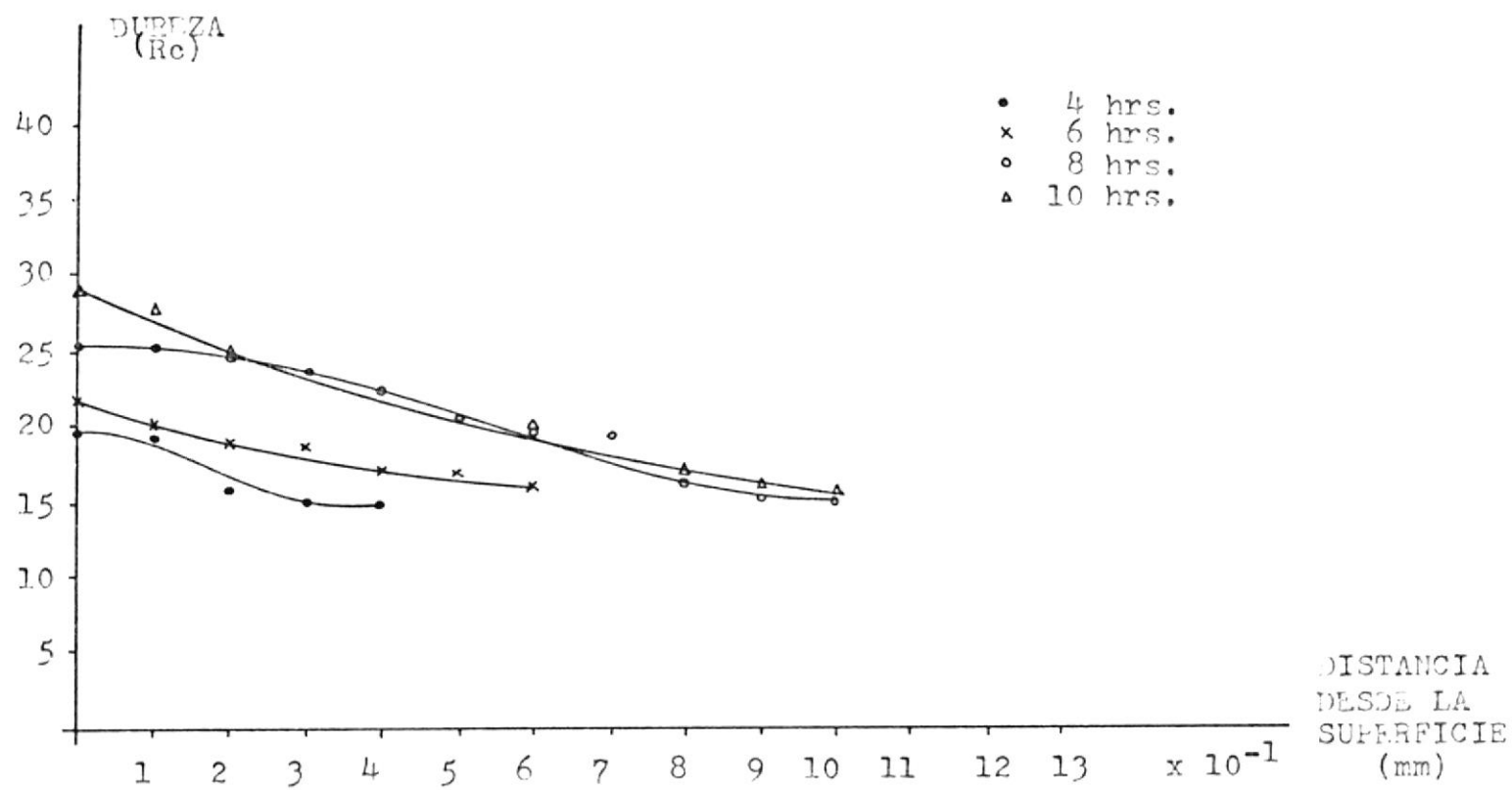


Figura 2.20 Durezas obtenidas con carbón vegetal
a 950° C

CARBON VEGETAL 1000° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	25	28	28	30
0,1	22	25	28	30
0,2	20	23	26	29
0,3	17	20	25	29
0,4	16	18	24	26
0,5	15	17	23	25
0,6	14	15	20	24
0,7	14	14	19	22
0,8		13	16	21
0,9		13	15	19
1,0			14	17
1,1			14	16
1,2				15
1,3				15

Tabla 2 .14 Durezas obtenidas con carbón vegetal a 1000° C

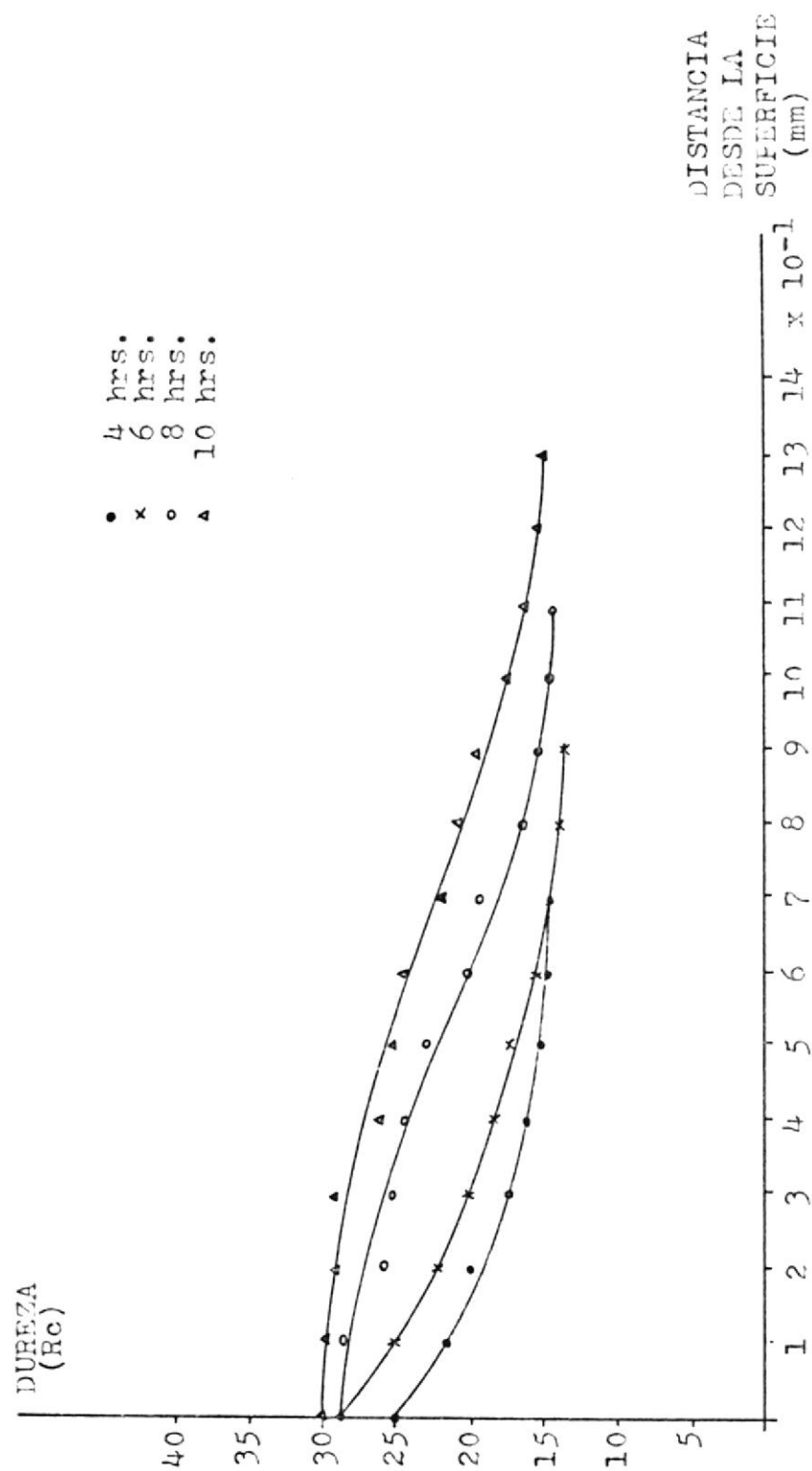


Figura 2.21 Durezas obtenidas con carbón vegetal a 1000°C

CARBON MINERAL 850° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	26	28	26	27
0,1	22	25	25	27
0,2	20	20	24	24
0,3	16	19	22	22
0,4	12	15	20	20
0,5	12	11	18	18
0,6		10	16	17
0,7			15	16
0,8				17

Tabla 2.15 Durezas obtenidas con carbón mineral a 850° C

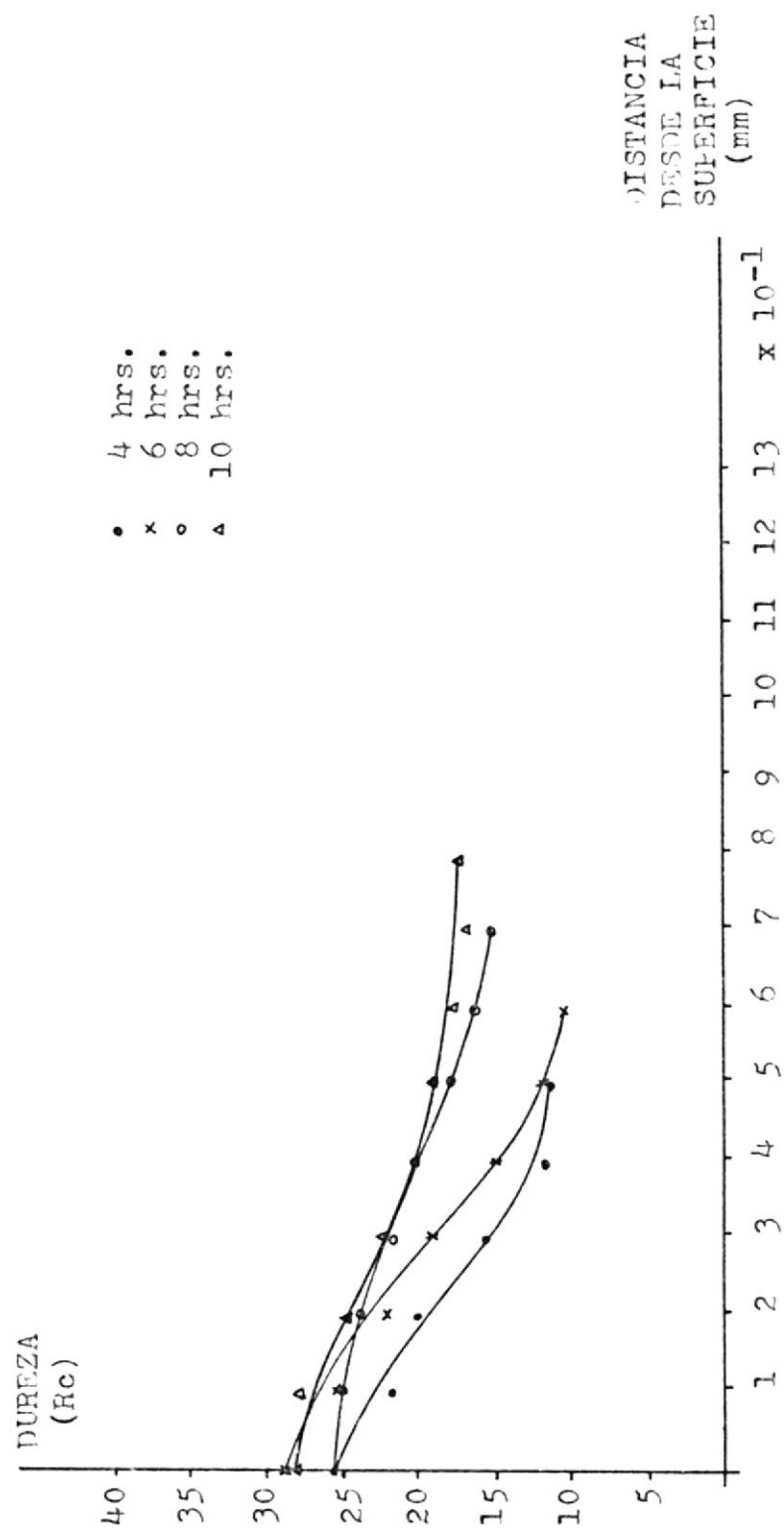


Figura 2.22 Durezas obtenidas con carbón mineral a 850°C

CARBON MINERAL 900° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	20	25	30	29
0,1	22	25	28	29
0,2	18	24	28	28
0,3	15	24	23	26
0,4	13	22	21	25
0,5	13	21	19	22
0,6		18	18	20
0,7		15	16	17
0,8		14	15	16
0,9			15	15
1,0				15

Tabla 2.16 Durezas obtenidas con carbón mineral a 900° C

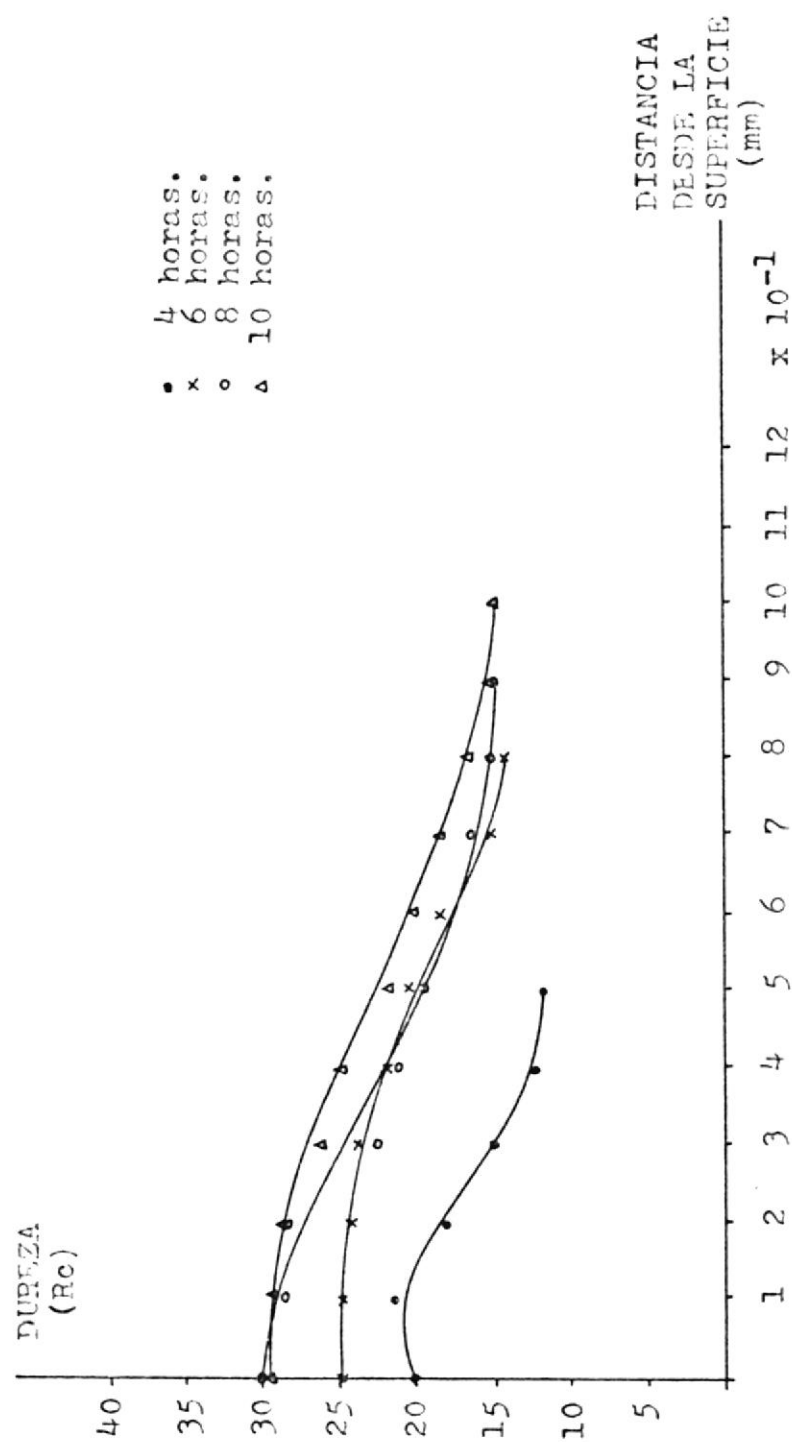


Figura 2.23 Durezas obtenidas con carbón mineral a 900°C

CARBON MINERAL 950° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	27	30	30	32
0,1	26	25	28	28
0,2	23	22	24	25
0,3	20	20	21	22
0,4	16	15	17	20
0,5	13	15	17	19
0,6	11	12	14	18
0,7	10	11	13	16
0,8		11	11	15
0,9			10	16
1,0			10	14
1,1				14

Tabla 2 .17 Durezas obtenidas con carbón mineral a 950° C

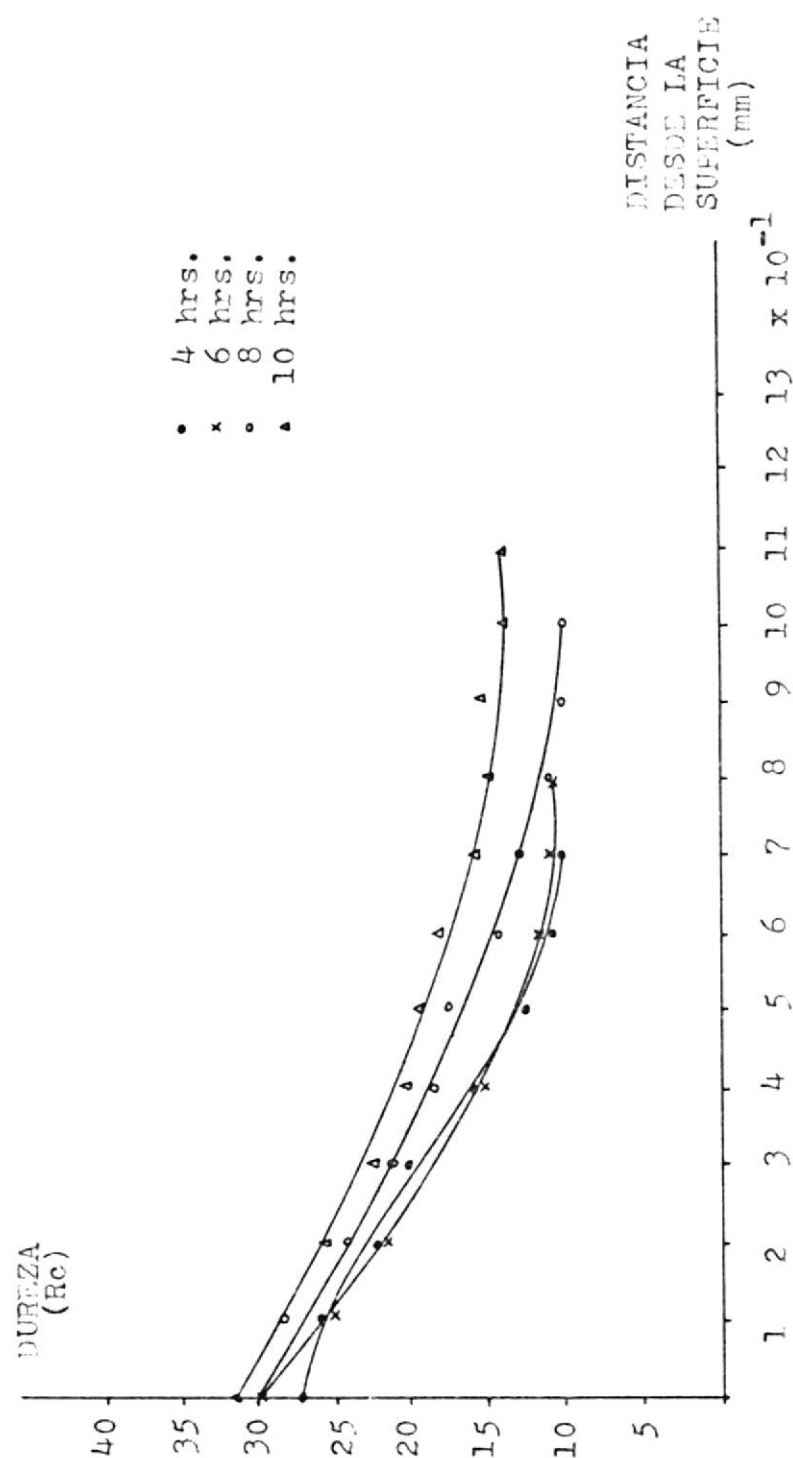


Figura 2.24 Durezas obtenidas con carbón mineral
a 950 C

CARBON MINERAL 1000° C				
DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE (mm)	DUREZA (Rc)			
	4 hrs.	6 hrs.	8 hrs.	10 hrs.
0	29	30	34	32
0,1	28	28	30	33
0,2	25	27	30	32
0,3	25	25	25	30
0,4	20	25	24	26
0,5	18	20	21	24
0,6	14	17	19	22
0,7	13	15	18	20
0,8	12	12	16	17
0,9	11	11	15	17
1,0	11	10	15	16
1,1		10	16	15
1,2			14	15
1,3				15

Tabla 2.18 Durezas obtenidas con carbón mineral a 1000° C

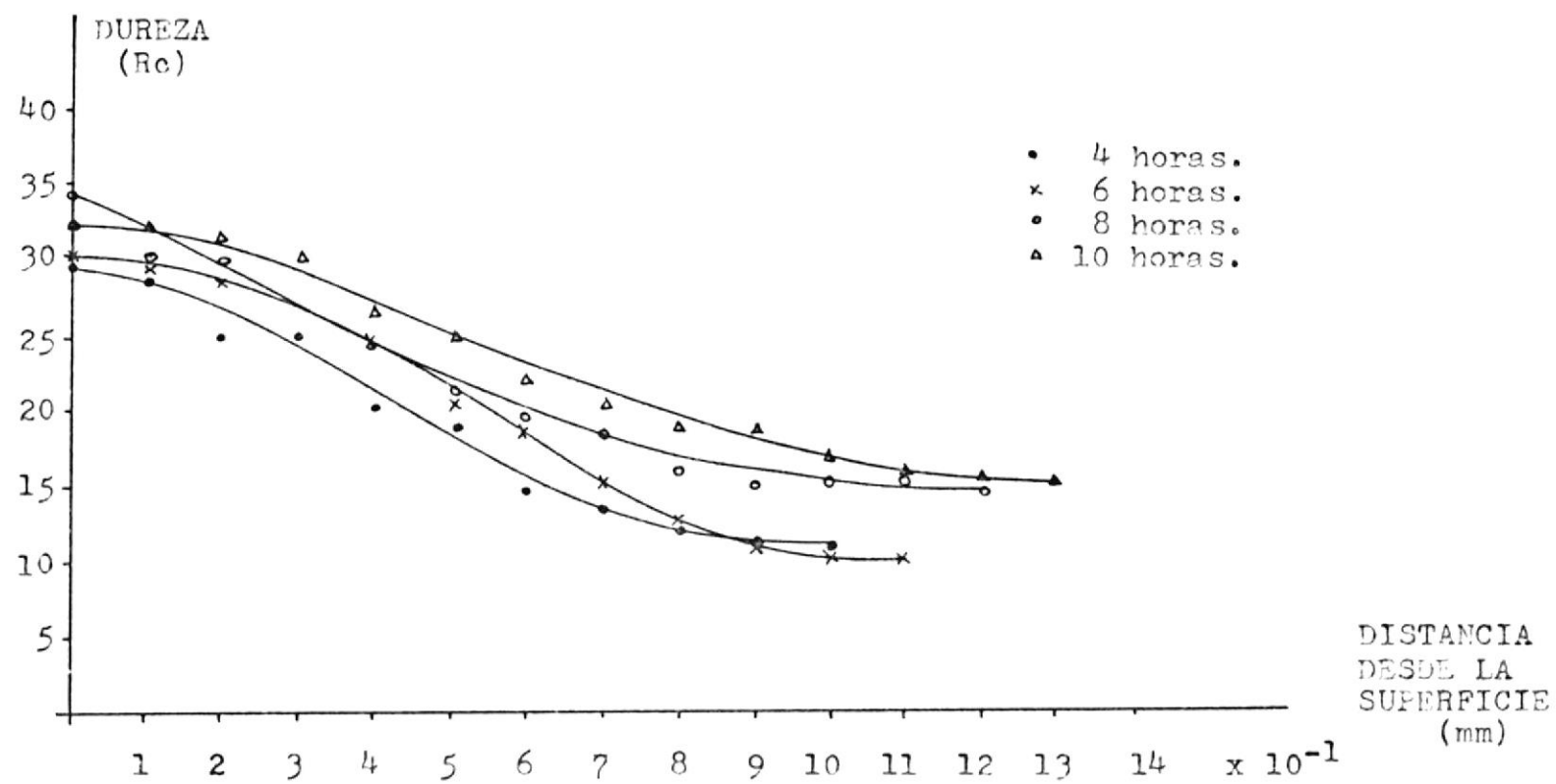


Figura 2.25 Durezas obtenidas con carbón mineral
a 1000°C

2.5.3 VARIACIONES DE LA MICROESTRUCTURA

Antes de presentar los cambios sufridos por la microestructura del acero, se presentará la microestructura original del acero SAE 1020 para podernos dar una idea, de los cambios sufridos después del proceso de cementación. En la siguiente figura se aprecia dicha microestructura:



100x

Nital 2 %

Figura 2 .26 Microestructura del acero SAE 1020
Ferrita zonas blancas
Perlita zonas oscuras

En la figura 2 .26 correspondiente al acero SAE 1020 se aprecia la estructura bandeada característica de los a

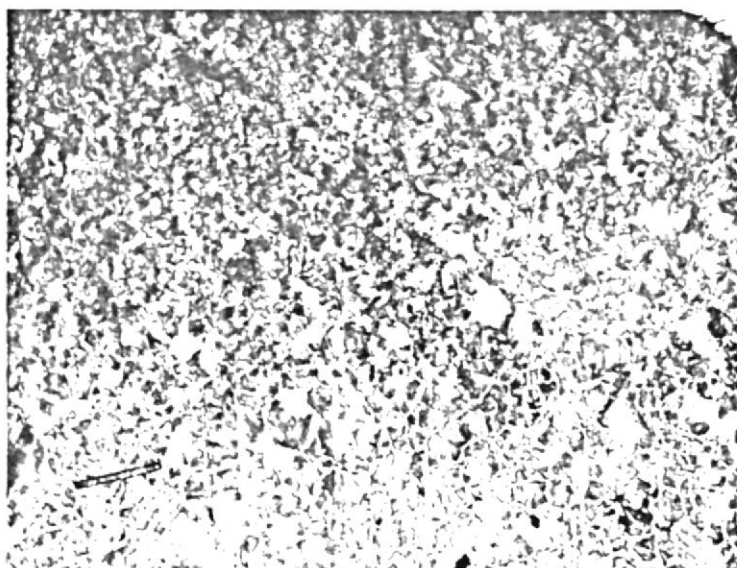
ceros laminados en caliente, compuesto por granos de ferrita y columnas de perlita.

En las siguientes figuras se aprecian las variaciones sufridas por la microestructura del acero SAE 1020 después de ser cementado con carbón mineral durante 8 horas a una temperatura de 950°C .

Se escogieron esas horas y temperatura por que dan al acero una capa cementada de aproximadamente 0,94 mm de espesor (ver figura 2.12). Espesores comprendidos entre 0,5 y 1,5 mm son los de uso más corriente, ver capítulo I sección 1.2.

Se escogió además al carbón mineral porque como se verá más adelante, dicho carbón es un buen sustituto del carbón activado.

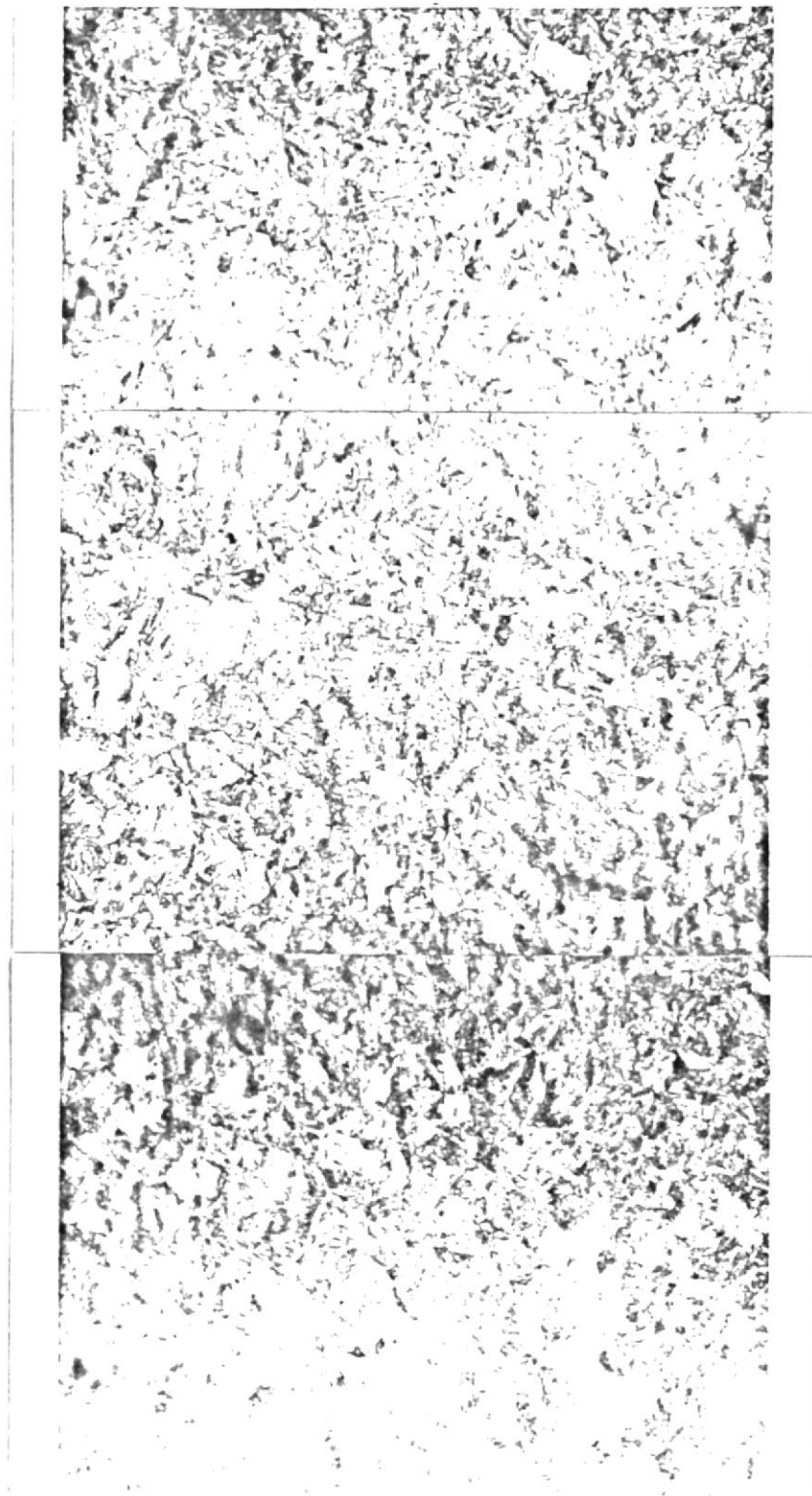
A continuación se presentan dichas figuras, la vista general de la capa, figura 2.27 y la vista en detalle de la misma, figura 2.28:



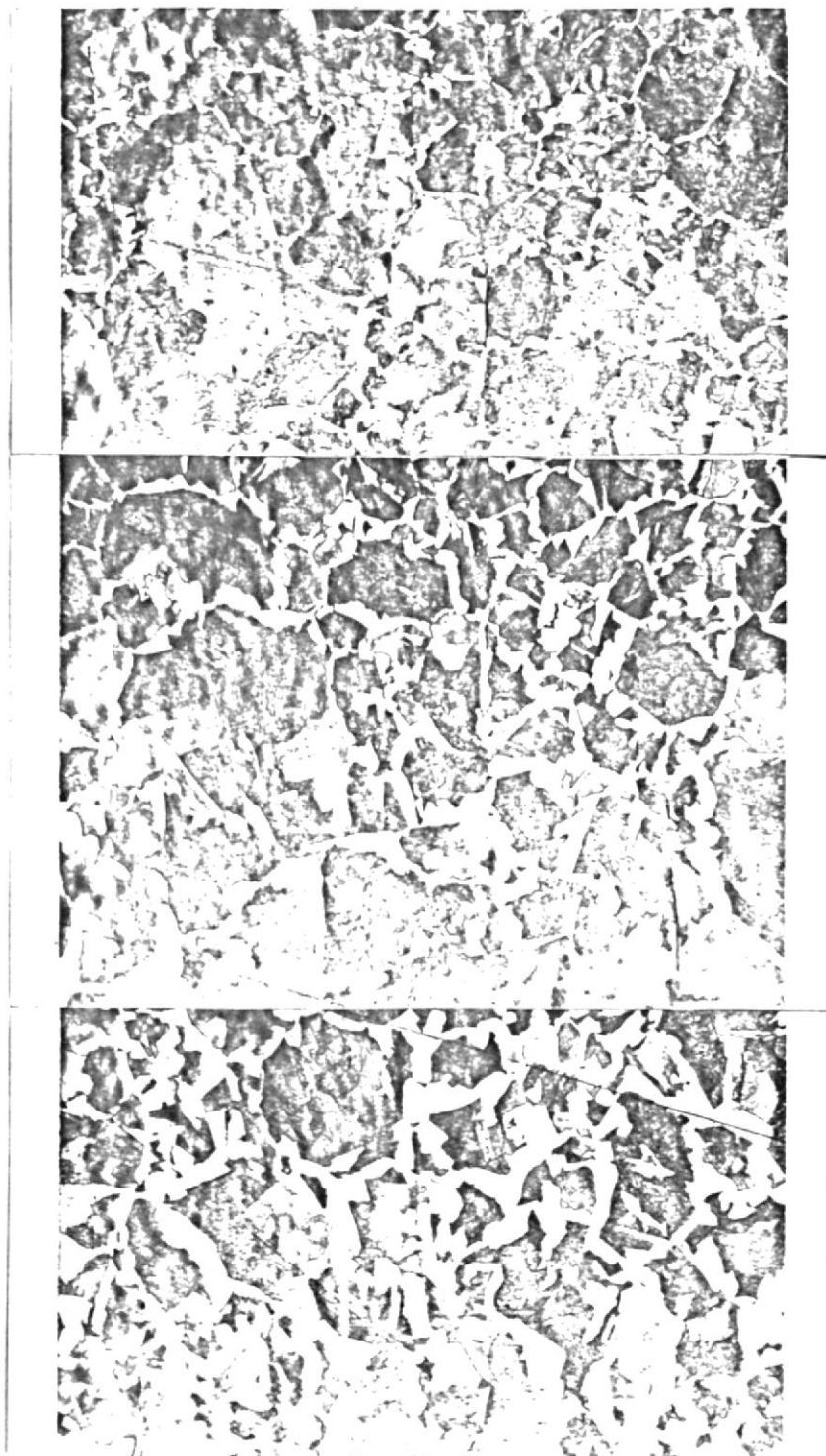
100x

Nital 2 %

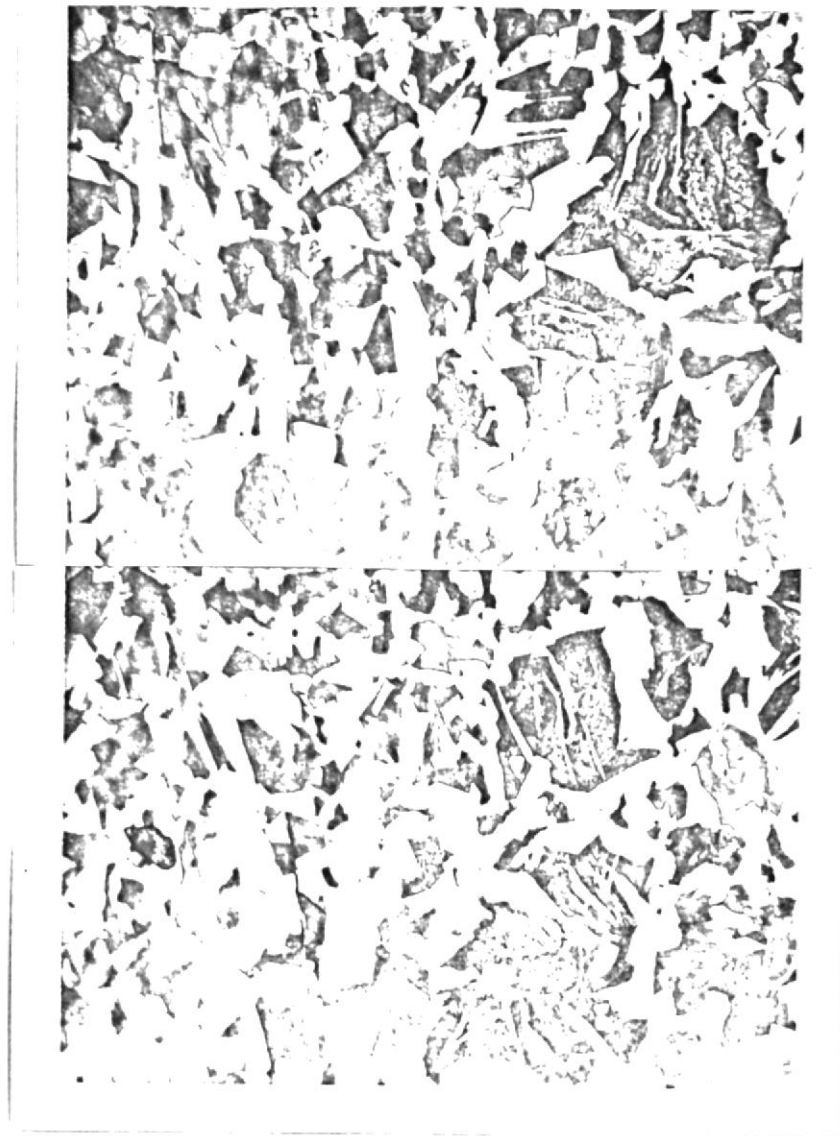
Figura 2.27 Vista general de la capa cementada con co-
ke durante 8 horas a 950°C



Desde la superficie, hasta 1 mm de profundidad.
(Figura 2.28, continúa)



Desde 1 mm de profundidad, hasta 2 mm de prof.
(Figura 2.28, continúa)



200x

Nital 2 %

Figura 2.28 Vista en detalle de la microestructura del acero SAE 1020, cementado con coque durante 8 horas a 950°C. Espesor de capa 0,94 mm aprox. contenido de carbono en la superficie 0,85 %.

CAPITULO III

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

3.1 EVALUACION DE LOS CEMENTANTES SOLIDOS UTILIZADOS

Una vez realizada la parte experimental. o sea lo relativo a los diferentes ensayos y controles practicados, se hace necesario discutir el por qué de estos. Es necesario recalcar en primer lugar, que la presente investigación no trata de la realización del proceso de cementación solamente, ya que, en nuestro medio es práctica común la realización de dicho tratamiento. Este trabajo consiste fundamentalmente en el estudio de otros medios carburantes, y sus efectos sobre el acero SAE 1020, diferentes al carbón activado, que, como se menciona en el capítulo I, es el que se usa en los talleres de tratamientos térmicos por sus excelentes cualidades cementantes.

Se ha realizado el proceso de cementación con otras materias cementantes: carbón mineral (coke) y carbón vegetal además del carbón activado y se analizaron: la profundidad de la capa cementada y la dureza desde la superficie hacia el núcleo y el proceso se lo realizó a diferentes tiempos y temperaturas.

Al hacer la evaluación correspondiente a cada carbón, se pre

tende recomendar el uso de otro cementante, con la finalidad de que la persona que realice el proceso de cementado tenga otra u otras alternativas para realizar la carburación, además del carbón activado.

En la realización del presente trabajo actúan diversos parametros, sus efectos se analizan de acuerdo a los resultados presentados en el capítulo II.

En lo que respecta a la mezcla cementante, esto es, cemen-tante más activador, se usó para todos los tratamientos la proporción 80 % cementante, 20 % activador. Es de anotar , que esta proporción puede variar entre 90 % cementante y 10 por ciento activador y 60 % - 40 %, obteniéndose los mismos resultados. Se utilizó la proporción 80 - 20 %, para no trabajar con los extremos, si no, estar situado más o menos en la mitad y estar de esta manera a salvo de cualquier error que pueda presentarse en las mediciones de los pesos al preparar la mezcla.

Referente a las cajas de cementación, como se mencionó anteriormente, estas tenían un pequeño orificio con la finali - dad de aliviar un poco la presión dentro de las mismas y evitatar que esta excesiva presión levante las tapas, las cua - les estaban selladas con una pasta refractaria para conse -

guir que la caja, salvo por el orificio de alivio de la presión, este perfectamente sellada.

En lo que concierne a los parámetros de tiempo y temperatura existe una íntima relación, los resultados obtenidos y graficados en el capítulo anterior son elocuentes, pues al aumentar el tiempo y la temperatura del proceso, los valores del espesor de la capa cementada y dureza que se obtienen son mayores.

Lo que corresponde al medio de enfriamiento de las piezas cementadas, parámetro este cuyo efecto sobre las piezas tratadas es de singular importancia, se puede acotar que después del tratamiento, las piezas fueron sacadas del horno y dejadas enfriar al aire lo cual explica la relativamente alta dureza alcanzada por las probetas sólo con el tratamiento de cementación, durezas del orden de 25 a 35 Rc, lo que no sucede si es que las piezas son dejadas para que se enfrien dentro del horno, en este caso, las durezas alcanzadas son inferiores a 12 Rc.

En la sección 3.2 se explican los resultados obtenidos cuando se completan los tratamientos posteriores a la cementación.

El control metalográfico efectuado muestra en sus diferentes figuras, la transformación que sufre el acero original cuando es sometido a este tratamiento, así, en la figura 2.26 se puede observar la distribución de la ferrita y la perlita en forma de bandas, zonas oscuras, del material original. En las siguientes figuras 2.27 y 2.28 se muestra claramente 3 zonas bien diferenciadas, la capa superficial donde se aprecia el aumento del contenido de carbono de dicha capa, la zona central que corresponde al metal base y entre ellas una zona llamada zona de transición.

El tratamiento de cementación, es muy usado en nuestro medio por la fácil preparación de la mezcla cementante, ya que, además del bajo costo del carbón (sobre todo del carbón vegetal) y del activador. El proceso no representa ningún peligro para el operario por que no trabaja con materiales tóxicos como en el caso de la carbonitruración, en el cual hay que manipular cianuros, lo cual, si no se toman las debidas precauciones es muy peligroso. Se obtienen además, con este proceso, mayores espesores de la capa superficial con un núcleo sumamente tenaz.

Una vez analizadas las condiciones bajo las cuales se obtuvieron los resultados expuestos en el capítulo II, se hará una evaluación de cada uno de los cementantes que intervinieron en

este proceso.

3.1.1 CARBON VEGETAL

En primer lugar se hará un análisis referente a la profundidad de la capa carburada y posteriormente el correspondiente a la dureza.

Al examinar las figuras 2.10 a 2.13, se aprecia que la capa conseguida con el carbón vegetal es inferior a la de los otros carbones, excepto para 1000°C y 10 horas en que la capa conseguida es superior a la del carbón mineral, pero esta temperatura es extrema, ya que, en la práctica, la cementación se la efectúa generalmente entre 930 a 950°C.

A pesar de que los resultados obtenidos con este carbón son inferiores a la de los otros cementantes, esto no significa que el carbón vegetal no sea adecuado o no pueda usarse para el proceso de carburación, ya que los espesores de capa conseguidos, permiten afirmar que el carbón de madera puede ser empleado sin ningún problema cuando se trate de cementar piezas que necesiten un pequeño espesor de capa carburada, incluso, tenemos que a los 950°C y 10 horas se consiguió un espe-

sor que es usado en la mayoría de las piezas de máquinas, (ver cap. I sección 1.2). Se consiguen espesores mayores, 1,35 mm a 1000°C y 10 horas, pero como se menciona anteriormente, esta temperatura no es usada en la práctica, ya que, a esa temperatura se presenta un problema de crecimiento excesivo del tamaño de los granos del acero que puede ocasionar falta de tenacidad y fragilidad anormales.

En lo que respecta a la dureza, se puede manifestar - que la máxima dureza alcanzada (sólo con el proceso de cementación, sin tratamiento posterior) fue de 30 Rc - conseguida a 1000°C y 10 horas, dureza que es prácticamente la misma que se consiguió a 950°C y 10 horas que fue de 29 Rc. Del análisis de las durezas de los otros carbones, activado y mineral, se observa que los valores alcanzados son superiores a los del carbón vegetal así tenemos, por ejemplo, que a 950°C y 4 horas, cuando se usó el carbón activado como cementante se obtuvo en la superficie de la pieza de acero una dureza de 29 Rc y con el carbón mineral se obtuvo 27 Rc, mientras - que con el carbón vegetal se alcanzó una dureza de 19 Rc, si se analizan los valores de dureza para otros - tiempos y temperaturas se observa la misma tendencia. Todo lo anterior indica que el carbón vegetal a pesar

de tener, relativamente, cualidades inferiores como cementante no significa que no pueda ser usado para procesos de carburación, al contrario, este carbón puede ser usado cuando se trate de cementar piezas que no vayan a desempeñar papeles de gran responsabilidad en la industria.

3.1.2 CARBON MINERAL

El carbón mineral o coke, mostró en las pruebas realizadas, ser un buen sustituto del carbón activado, ya que al realizar los análisis de dureza y de profundidad de capa cementada, se obtienen resultados que si bien no son iguales a los del carbón activado, son muy parecidos, así tenemos que, al analizar las figuras 2.11 y 2.12 se aprecia claramente que las curvas de ambos carbones casi se confunden.

Se obtienen con este carbón excelentes espesores de capas cementadas, así tenemos que a 900°C y 10 horas se logra un espesor de 1 mm y a 950°C y 10 horas se consigue 1,07 mm. La profundidad máxima que se logró fué de 1,3 mm a 1000°C y 10 horas, es necesario recalcar que los espesores obtenidos se refieren exclusivamente a la capa carburada y no a la zona de transición cuyo - contenido de C es superior también al del metal base.

De los gráficos presentados en el capítulo II, se deduce que el carbón mineral puede ser usado en forma eficiente para el proceso de cementación, porque ya se logran buenos espesores a 900°C como se menciona en el párrafo anterior, y se evita de esta manera el problema del crecimiento excesivo del grano del acero - que se presenta a temperaturas superiores a los 950°C .

En lo que respecta a la dureza, los valores obtenidos son superiores a los obtenidos con carbón vegetal, pero son del mismo orden que los del carbón activado bajo las mismas condiciones, esto es, las concentraciones de carbono en las capas cementadas son similares, tanto para el coke como para el carbón activado lo cual explica que las durezas obtenidas sean tan parecidas.

3.1.3 CARBON ACTIVADO

En cuanto al carbón activado, huelgan más comentarios, ya que, está comprobado que es un excelente cementante pues su uso está generalizado en nuestro medio, teniendo como único inconveniente que es más costoso en relación con el carbón mineral y mucho más con relación al carbón de madera.

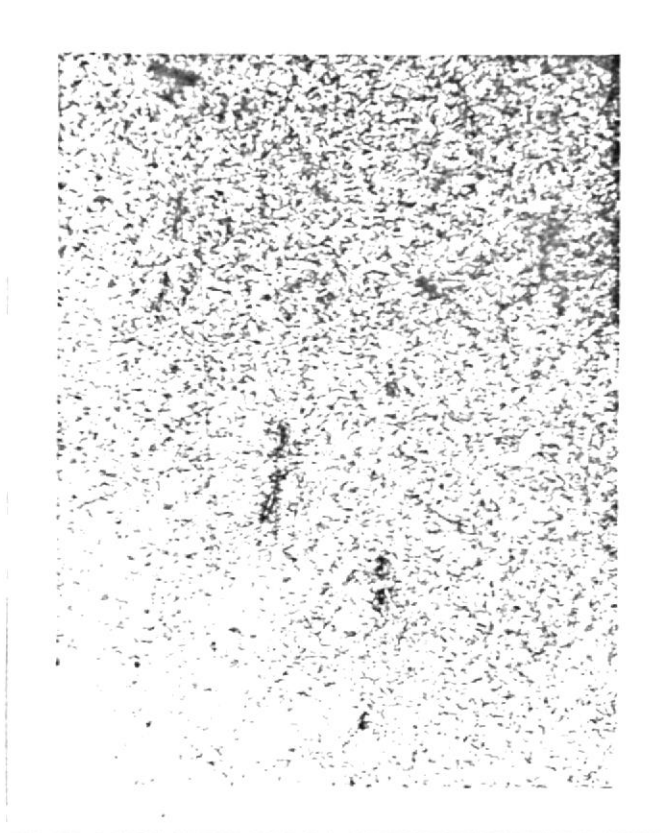
3.2 INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR EN LAS CARACTERISTICAS DE LA CAPA CEMENTADA.

Una vez analizados los resultados obtenidos y al comprobar - que el carbón mineral puede ser usado sin ningún inconveniente en lugar del carbón activado, se cementó con coque una probeta a 950°C y 8 horas, (ver figuras 2.26 y 2.27), y luego se la sometió a los tratamientos de temple y revenido.

El temple se lo realizó a una temperatura de 900°C por una hora, seguido por un enfriamiento en agua, el revenido se lo realizó a 200°C por dos horas.

Se trató con esto de completar un proceso típico de cementación con tratamientos térmicos posteriores utilizando otro cementante diferente al carbón activado. Es necesario anotar que una vez realizados los tratamientos posteriores, se tomó el valor de la dureza superficial de la probeta el cual fue de 62 Rc.

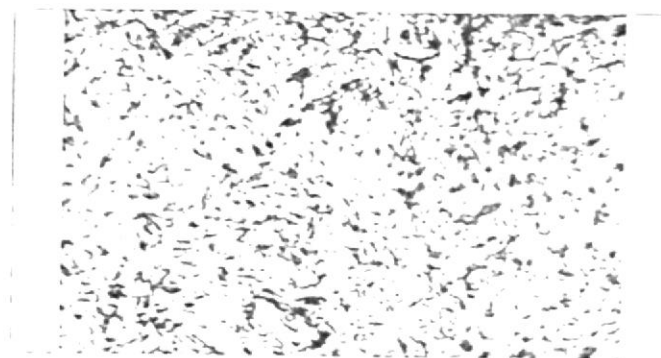
En las siguientes figuras se aprecia la microestructura del acero SAE 1020 después de completados los tratamientos antes mencionados.



200x

Nital 2 %

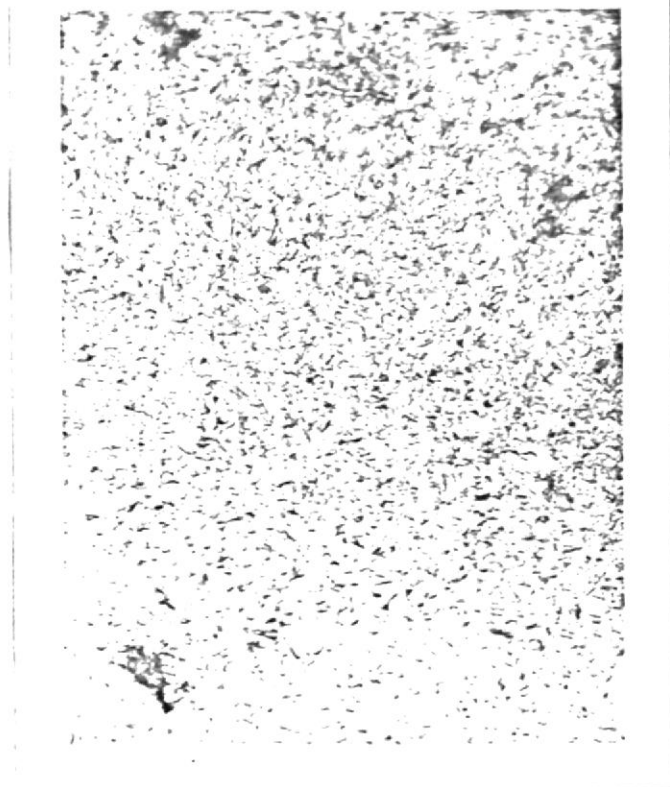
Figura 3.29 Microestructura del acero SAE 1020 después del tratamiento de temple. Estructura martensítica.



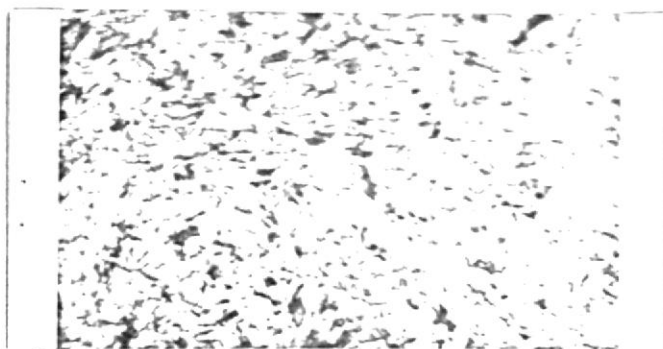
1000x

Nital 2 %

Figura 3.30 Microestructura del acero SAE 1020 después del tratamiento de temple.



200x Nital 2 %
Figura 3.31 Microestructura del acero SAE 1020 después del
tratamiento de revenido. Estructura martensitica.



1000x Nital 2 %
Figura 3.32 Microestructura del acero SAE 1020 después del
tratamiento de revenido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez que se ha efectuado la discusión de los resultados - obtenidos y hecha la evaluación correspondiente a cada cemen tante se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- 1.- El carbón mineral o coke es un buen sustituto del carbón activado y puede ser usado sin problema, en todos aque - llos casos en que se usaba el carbón activado, ya que - los resultados que se obtienen son similares.
- 2.- Cuando se necesiten cementar piezas cuyo espesor de capa cementada no sea muy grande, se puede utilizar sin nin - gún inconveniente el carbón vegetal, ya que para estos - casos, el bajo costo de dicho carbón lo hace muy conve - niente.
- 3.- El proceso de cementación en medio sólido, sea cual fue - re la materia cementante, es lento, debido a que las pie zas tratadas, necesariamente serán sometidas a tratamien - tos térmicos posteriores, pero tiene la gran ventaja en cambio, que se consiguen capas carburadas de gran espe - sor.

- 4.- Pueden usarse para el proceso, aceros al carbono o aceros aleados, con la única condición que el porcentaje de carbono no exceda de 0,25 %.
- 5.- Los resultados obtenidos pueden ser utilizados como referencia para posteriores trabajos de carburación, pero teniendo en cuenta las condiciones y los análisis de los cementantes con los cuales se obtuvieron dichos resultados.

RECOMENDACIONES

- 1.- Es importante que los materiales para la cementación es tén bien secos, porque pequeñas trazas de humedad , pue den dar lugar a descarburaciones locales y luego a puntos blandos en las piezas después del temple.
- 2.- No se debe cementar a temperaturas superiores a los 950 grados centígrados porque se presenta el problema de crecimiento excesivo de los granos del acero que puede ocasionar falta de tenacidad y fragilidad anormales.
- 3.- Cuando se trate de obtener con este proceso, pequeños espesores de capa cementada, se puede utilizar sin pro blema el carbón vegetal o de madera.

5.- El carbón mineral es un buen sustituto del carbón activado, por lo tanto puede ser usado para cualquier aplica - ción en vez del carbón activado.

A P E N D I C E S

DIAGRAMAS

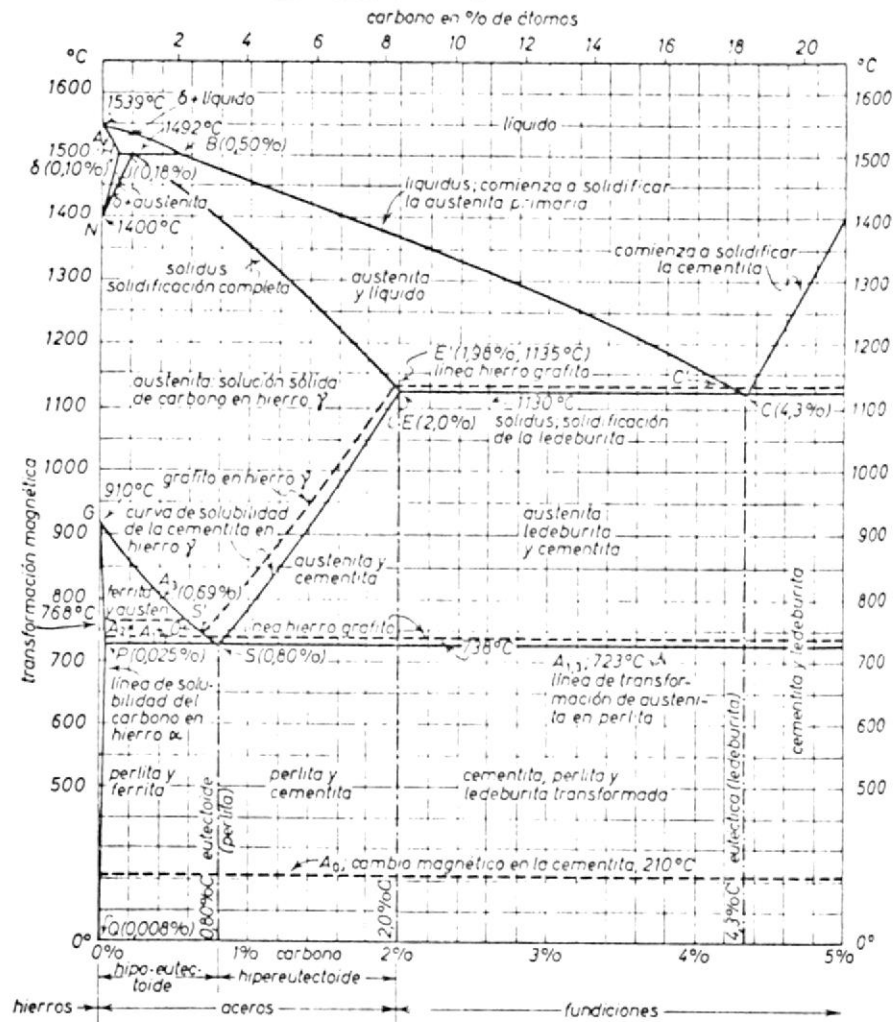


Diagrama de equilibrio
Hierro Carbono.

T A B L A S

Equivalencias aproximadas entre la resistencia y la dureza de los aceros al carbono.

DUREZA								
BRINELL		ROCKWELL		VICIERS	SHORE Para 200 mm	Kg por mm ²	x 1000 Libras por pulgada cuadrada [pounds sq. in.]	Toneladas por pulgada cuadrada (Tons. sq. in.)
Bola 10 mm con 3000 kg	Dureza	C Carga de 150 kg y cono de diamante de 120°	B Carga de 100 kg de 100 kg y bola de 1/16"					
Diámetro de la hue- lla en mm								
2,05	898	—	—	—	—	—	440	—
2,10	857	—	—	—	—	—	420	—
2,15	817	—	—	—	—	—	401	—
2,20	780	70	—	1,040	107	—	384	—
2,25	745	68	—	980	105	—	368	—
2,30	712	66	—	900	101	246	352	—
2,35	682	64	—	830	98	235	337	150
2,40	653	62	—	765	95	227	324	145
2,45	627	60	—	715	91	218	311	139
2,50	601	58	—	670	87	208	298	133
2,55	578	57	—	650	86	200	287	128
2,60	555	55	120	610	82	193	276	123
2,65	534	53	119	575	79	184	266	119
2,70	514	52	119	558	77	177	256	114
2,75	495	50	117	525	74	170	247	109
2,80	477	49	117	510	72	164	238	106
2,85	461	47	116	480	69	159	229	102
2,90	444	46	115	466	67	154	220	98
2,95	429	45	115	453	66	149	212	95
3,00	415	44	114	441	65	141	204	91
3,05	401	42	113	416	62	138	196	87
3,10	388	41	112	404	61	133	189	84
3,15	375	40	112	389	59	128	182	81
3,20	363	38	110	375	57	124	176	79
3,25	352	37	110	363	56	120	170	76
3,30	341	36	109	350	54	116	165	74
3,35	331	35	109	339	53	113	160	71
3,40	321	34	108	327	52	109	155	69
3,45	311	33	108	316	50	106	150	67
3,50	302	32	107	305	49	103	146	65
3,55	293	31	106	296	47	100	142	63
3,60	285	30	105	287	46	98	138	62
3,65	277	29	104	279	45	95	134	60
3,70	269	28	104	270	44	92	131	58
3,75	262	26	103	263	—	90	128	57
3,80	255	25	102	256	—	88	125	56
3,85	248	24	102	248	—	86	122	54
3,90	241	23	100	241	—	84	119	53
3,95	235	22	99	235	—	82	116	52
4,00	229	21	98	229	—	80	113	50

No es recomendable usar el ensayo Brinell para aceros de $R > 200 \text{ kg/mm}^2$. Dureza $Rc > 57$.

Equivalencias aproximadas entre la resistencia y la dureza de los aceros al carbono

DUREZA							
BRINELL		ROCKWELL		VIKERS	SHORE	Kg por mm ²	Toneladas por pulgada cuadrada (Tons. sq. in.)
Bola 10 mm con 3000 kg.	Dureza	C Carga de 150 kg y cono de diamante de 120°	B Carga de 100 kg y bola de 1/16"				
Díámetro de la huella en mm							
4,05	223	20	97	223	En redondos de 80 milímetros da, con respecto a la tabla, 2 unidades menos, y el de 400 mm da 2 unidades Shore más.	78	49
4,10	217	18	96	217		75	48
4,15	212	17	96	212		73	47
4,20	207	16	95	207		71	46
4,25	202	15	94	202		70	45
4,30	197	13	93	197		68	43
4,35	192	12	92	192		67	42
4,40	187	10	91	187		66	42
4,45	183	9	90	183		64	41
4,50	179	8	89	179		63	40
4,55	174	7	88	174		61	39
4,60	170	6	87	170		60	38
4,65	166	4	86	166		59	37
4,70	163	3	85	163		58	37
4,75	159	2	84	159		56	36
4,80	156	1	83	156		55	35
4,85	153	—	82	153		54	34
4,90	149	—	81	149		53	34
4,95	146	—	80	146		52	33
5,00	143	—	79	143		51	32
5,05	140	—	78	140	En redondos de 80 y 400 mm de diámetro de la misma dureza Vickers; el redondo de 80 milímetros da, con respecto a la tabla, 2 unidades menos, y el de 400 mm da 2 unidades Shore más.	50	32
5,10	137	—	77	137		49	31
5,15	134	—	76	134		48	30
5,20	131	—	74	131		47	30
5,25	128	—	73	128		46	29
5,30	126	—	72	126		45	28
5,35	124	—	71	124		44	28
5,40	121	—	70	121		44	27
5,45	118	—	69	118		43	27
5,50	116	—	68	116		42	26
5,55	114	—	67	114		41	26
5,60	112	—	66	112		40	26
5,65	109	—	65	109		39	25
5,70	107	—	64	107		38	25
5,75	105	—	62	105		37	24
5,80	103	—	61	103		37	24
5,85	101	—	60	101		36	23
5,90	99	—	59	99		36	23
5,95	97	—	57	97		35	22
6,00	95	—	56	95		34	22

Tampoco es conveniente efectuar el ensayo Rockwell para aceros de $R < 70 \text{ kg/mm}^2$. Dureza Rc < 15.

BIBLIOGRAFIA

1. APRAIZ BARREIRO JOSE, Tratamiento Térmico de los aceros, editorial Dossat, 8a. edición, Madrid 1981.
2. AVNER S., Introducción a la metalurgia física, Mc Graw - Hill, México 1975.
3. GROSSMAN Y BAIN, Principios de tratamiento térmico, editorial Blume, 1972.
4. VAN VLACK, Materiales para ingeniería, CEGSA, Mc GRAW - Hill, México, 1975.
5. WANKE Y SCHRAMM, Temple del acero, editorial Aguilar, Madrid, edición de 1972.
- 6.- AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Atlas of Microstructures of industrial alloys, edición de 1973, Metals Park, Ohio, volumen 7.
7. DR. FRANCISCO MUNOZ DEL CORRAL, Físico Química Metalúrgica, editorial Montecorvo, Madrid, 1963.
8. JAMES Y KENT, Química industrial, editorial Grijalbo, Madrid, 1964.

9. G. CHAUSSIN, G. HILLY, Metalurgia, tomo 1, Aleaciones Me
tálicas, Ediciones Urmo, Madrid, 1971.
10. J. PASCUAL, Técnica y Práctica del tratamiento Térmico
de los metales férreos, editorial Blume, 1970.
11. HECTOR BOS, Aceros, editorial Alsina, Madrid, 1953.